



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE UN
PROCEDIMIENTO PARA MEJORAR EL IMPACTO DE
LA LABOR DE LOS PRACTICANTES EN EL ÁREA DE
INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INOVACIÓN DEL
METRO DE MEDELLÍN**

Autor

Mateo Vásquez Restrepo

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería

Metalúrgica y de Materiales

Medellín, Colombia

2021



Elaboración y aplicación de un procedimiento para mejorar el impacto de la labor de los practicantes en el área de Investigación, Desarrollo e Innovación del Metro de Medellín

Mateo Vásquez Restrepo

Informe final de semestre de industria presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero de Materiales

Asesores:

Diego Alejandro Vélez Jaramillo, Ingeniero Mecánico

Diego Hernán Giraldo Vásquez, Ingeniero Mecánico, MSc, PhD

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales

Medellín, Colombia

2021

Contenido

RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2.1. Proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación tiendan a mejorar la vida útil del tornillo M16 del sistema anti hundimiento de los órganos de rodamiento de los vehículos tranviarios.....	10
2.2. Estudio de mercado para la reparación y adecuación de las estaciones solares de la red Metro	18
2.3. Tableros de consumo de energía de las subestaciones eléctricas alimentadoras (SEAs) de Zamora, Envigado y San Diego	20
3. OBJETIVOS	22
3.1. Objetivo general	22
3.2. Objetivos específicos.....	22
4. MARCO TEÓRICO.....	23
4.1. Definiciones de tornillo.....	23
4.1.1. Partes de un tornillo.....	23
4.1.1.1. La cabeza.....	23
4.1.1.1.1. Cabeza hexagonal	23
4.1.1.1.2. Cabeza cuadrada	24
4.1.1.1.3. Cabeza cilíndrica con huella Allen.....	24
4.1.1.1.4. Cabeza ranurada	24
4.1.1.1.5. Cabeza avellanada	24
4.1.1.2. El cuello.....	24
4.1.1.3. La rosca	24

4.1.1.3.1. El filete o hilo	25
4.1.1.3.2. La cresta.....	25
4.1.1.3.3. El fondo o raíz	25
4.1.1.4. Funciones de la rosca	25
4.1.1.5. La rosca métrica ISO.....	26
4.1.1.6. Otros parámetros importantes en la clasificación de las roscas	26
4.1.1.6.1. Diámetro nominal o exterior.....	26
4.1.1.6.2. Diámetro interior	26
4.1.1.6.3. Ángulo de rosca o de flanco	26
4.1.1.7. El paso	27
4.1.1.7.1. El paso fino.....	27
4.1.1.7.2. El paso medio	27
4.1.1.7.3. El paso basto.....	27
4.1.2. Los tornillos M16.....	28
4.2. Materiales.....	29
4.2.1. Acero AISI/SAE 4140.....	29
4.2.3. Principales usos del acero AISI/SAE 4140	29
4.2.4. Composición química del acero de la serie AISI/SAE 4140.....	30
4.2.5. Propiedades metalúrgicas del acero AISI/SAE 4140	30
4.2.6. Microestructura del acero AISI/SAE 4140.....	32
4.2.7. Morfología de la martensita.....	32
4.3. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140.....	33
4.3.1. Sistema métrico	33

4.3.2. Clase métrica 10.9	34
4.4. Ensayo de tracción	34
4.4.1. Límite elástico (R_e)	35
4.4.2. El límite al 0.2% ($R_{p 0.2}$).....	35
4.4.3. La resistencia a la tracción (R_m).....	35
4.4.4. La elongación a la rotura (A)	35
4.5. Ensayo de dureza.....	35
4.5.1. Dureza Brinell (HB)	35
4.5.2. Dureza Vickers (HV).....	36
4.5.3. Dureza Rockwell (HR)	36
4.6. Procesos de fabricación de tornillos.....	38
4.6.1. Laminación	38
4.6.2. Ventajas del proceso de laminación en la fabricación de tornillos.....	39
4.6.3. Maquinado o torneado	39
4.7. La micro-encapsulación	41
4.7.1. Micro-encapsulado de tornillos	41
4.7.2. Justificación del uso de la micro-encapsulación en los tornillos.....	42
4.7.3. Principales ventajas de la utilización de recubrimientos adhesivos (micro-encapsulado de tornillos).....	42
4.8. Análisis de Falla.....	42
4.8.1. Fractura.....	42
4.8.2. Fractura dúctil.....	43
4.8.3. Fractura frágil	44

5. METODOLOGÍA.....	46
5.1. Diseño e implementación de una metodología para articular la labor de los practicantes de Ingeniería de Materiales con los proyectos a cargo del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación.	46
5.2. Metodología utilizada para la proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación tiendan a mejorar la vida útil del tornillo M16 del sistema anti-hundimiento de los órganos de rodamiento de los vehículos tranviarios.....	46
5.3. Metodología para la realización de un estudio de mercado para la adecuación y reparación de las estaciones solares de la red Metro.....	50
5.4. Metodología para la organización de la información de los Tableros de consumo de energía para las subestaciones eléctricas alimentadoras (SEAs) de Zamora, San Diego y Envigado.....	53
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	54
6.1. Resultados para la proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación tiendan a mejorar la vida útil del tornillo M16 del sistema anti-hundimiento de los órganos de rodamiento de los vehículos tranviarios	55
6.2.1. Determinación de la composición química	56
6.2.2. Ensayos de dureza Rockwell	56
6.2.3. Inspección visual y análisis de la superficie de fractura.....	58
6.2.4. Análisis SEM y EDS	62
6.2. Resultados del estudio de mercado para la reparación y adecuación de las estaciones solares de la red Metro	65
6.3. Resultados de los tableros de consumo de energía de las subestaciones eléctricas alimentadoras (SEAs) de Zamora, Envigado y San Diego	65
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
7.1. Conclusiones	67
7.2. Recomendaciones.....	68
8. REFERENCIAS.....	69

ANEXOS	73
Cotización Industrias FAMEC S.A.S.....	73
Cotización Industrias EDAFA S.A.S	74

RESUMEN

El Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) del Metro de Medellín adscrito a la Gerencia de Planeación Estratégica, siempre ha contado con aprendices de Ingeniería de Materiales para que desarrollen habilidades prácticas apoyando los diferentes procesos y proyectos que se ejecutan en este Departamento. Típicamente uno de los procesos que más requiere el apoyo de aprendices de Ingeniería de Materiales es el de homologación y sustitución de piezas, aunque también se precisa de la participación de los aprendices en algunos de los proyectos de innovación que se desarrollan en el Departamento I+D+i. Debido a la contingencia sanitaria vivida durante 2020 la práctica académica se desarrolló en la modalidad de trabajo en casa, prestando apoyo a uno de los procesos de homologación y sustitución que fue la proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación tiendan a mejorar la vida útil del tornillo M16 del sistema anti hundimiento de los órganos de rodamiento de los vehículos tranviarios. También como apoyo a los procesos de innovación del Departamento de I+D+i se realizó un estudio de mercado con 3 empresas del sector metalmecánico con el fin de obtener una propuesta económica para la adecuación y reparación del sistema caja + tapa + puertos de conexión USB de las 32 estaciones solares distribuidas a lo largo de la red Metro. Adicional a esto, se participó en la realización de los tableros de consumo de energía de las subestaciones eléctricas alimentadoras (SEAs) de Zamora, Envigado y San Diego. Para la realización de dichas actividades se utilizó la metodología de gestión de procesos y proyectos HPVA (Hacer-Planear-Verificar-Actuar).

1. INTRODUCCIÓN

La Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada – Metro de Medellín Ltda.- se encarga de la administración y operación del sistema de transporte masivo de la región, conformado por trenes, tranvías, cables aéreos y buses.

Las dependencias de la empresa se dividen en las áreas estratégicas, las áreas misionales y las áreas de soporte. En las áreas estratégicas se determina el accionar y la planeación de la empresa; dichas áreas son la Gerencia General que se apoya en la Gerencia de Planeación Estratégica. La Gerencia de Planeación Estratégica se divide en tres departamentos; el Departamento de Planeación Estratégica, el Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación y el Departamento de Ejecución de Proyectos e Infraestructura.

El Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación del Metro de Medellín, también conocido como I+D+i, es un área donde se ejecutan diferentes proyectos que son de vital importancia para la empresa, como actualmente sucede con la modernización de la flota de trenes referencia MAN, la homologación y sustitución de piezas, equipos, componentes y sistemas para trenes, cables, tranvías y buses, la implementación de tecnologías solares y el internet de las cosas (IoT). Adicionalmente, el Departamento de I+D+i colabora con la Gerencia de Operaciones y Mantenimiento para atender las necesidades y dar solución a diversos problemas técnicos que afectan la operación y se presentan en la infraestructura, el sistema operativo, los vehículos tranviarios, los cables aéreos y la flota de buses.

El Departamento de I+D+i desarrolla con alguna frecuencia proyectos que requieren la aplicación de conceptos y técnicas de la ingeniería de los materiales, por lo cual la dependencia viene contando con el apoyo de practicantes de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquia como una estrategia pertinente para algunos de los proyectos que se desarrollan. Se requiere el apoyo de los practicantes a través de la gestión administrativa, la interacción con contratistas, proveedores y personal operativo, las visitas de campo, la evaluación de soluciones comerciales, la creación y revisión de fichas técnicas y la proposición de respuestas que atiendan las necesidades y problemáticas que se atienden en el Departamento de I+D+i.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad el país se encuentra atravesando una emergencia de salud pública debido a la presencia del virus COVID-19 en el territorio nacional y la declaración de pandemia de éste realizada por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Por esta razón, la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada tomó la decisión de implementar la modalidad de trabajo en casa para aquellos servidores y aprendices que sus proyectos o actividades que desarrollan en la Empresa se lo permitan.

Dentro de las actividades del trabajo en casa se encuentran el análisis de la información que se comparte con proveedores y con otras áreas de la empresa, así como la gestión administrativa y de los procesos que se desarrollan en el Departamento de I+D+i.

En las condiciones actuales, el practicante de ingeniería de materiales que desarrolló su proceso de formación en el Departamento de I+D+i y sus asesores de la empresa y la Universidad identificaron que no existía una metodología con la cual los practicantes puedan articular su labor con los diferentes proyectos y procesos que están a cargo del Departamento.

Con este proyecto se pretendió trazar y ejecutar una metodología para que desde la gestión administrativa los practicantes de Ingeniería de Materiales puedan vincular su labor con los diferentes procesos, proyectos y actividades que se están ejecutando en el área de I+D+i del Metro de Medellín, aplicando la metodología desarrollada en por lo menos un proyecto de los que tiene a cargo la dependencia durante el período de realización de la práctica.

Durante la práctica en el Metro de Medellín se participó en tres proyectos del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación; uno de ellos aplicado a los procesos de homologación y sustitución y los dos restantes a procesos corrientes ejecutados por I+D+i.

2.1. Proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación tiendan a mejorar la vida útil del tornillo M16 del sistema anti hundimiento de los órganos de rodamiento de los vehículos tranviarios

En el campo de los procesos productivos se entiende por homologación a un procedimiento que consiste en poner en relación de igualdad dos elementos, sistemas, equipos técnicos o productos químicos de forma tal que uno de ellos cumpla con determinadas especificaciones o características que tiene el otro [1].

El Metro de Medellín cuenta con el Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) para la ejecución de los procesos de homologación y sustitución de piezas para cables, telecabinas, tranvías, trenes y buses; con estos procesos se pretende identificar qué elementos de los diferentes sistemas de transporte pueden ser fabricados nacionalmente de forma confiable, reduciendo así los costos y tiempos de importación.

El Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación tiene estandarizado un procedimiento para la realización de todos los procesos de homologación y sustitución. Con el paso del tiempo dicho procedimiento se ha ido refinando hasta convertirse en uno de los más sólidos y consolidados del Metro de Medellín, tanto así que las demás áreas de la empresa buscan el acompañamiento de I+D+i cuando se les presenta un problema técnico que puede ser solucionado o mitigado por medio de este procedimiento.

Los procesos de homologación y sustitución se han ido nutriendo con el tiempo gracias a la experiencia y el conocimiento de los profesionales que trabajan en I+D+i, así como también gracias a la colaboración y el trabajo conjunto de instituciones de educación superior y fabricantes nacionales quienes aportan su saber, experiencia, recursos físicos y talento humano para hacer posible que un elemento importado pueda producirse con ingeniería colombiana, lo que se traduce en el aprovechamiento de la industria local, la generación de empleo y la oportunidad de aplicar el conocimiento.

La mayoría de las piezas homologadas por el Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación han sido exitosas, pues, cumplen con las especificaciones técnicas, la calidad, la vida útil y el servicio que se espera de ellas.

En el año 2017 se realizó un proceso de homologación y sustitución a los tornillos M16 del sistema anti hundimiento HUTCHINSON C.R.F 385/65-22,5 x 11,75 de los órganos de rodamiento de los tranvías (vehículos TRANSLOHR STE 5). Dicho sistema se compone de tres segmentos curvos de fibra de carbono que se unen mediante los tornillos M16 mencionados. La función de este sistema es mantener el neumático adherido a él en caso de pérdida de la presión de aire o pinchada del neumático, permitiendo así que el tranvía continúe con su ruta sin necesidad de ser llevado inmediatamente a los talleres y que se tengan que evacuar a los pasajeros afectando la continuidad de la operación.

La figura 1 muestra una unidad completa HUTCHINSON C.R.F 385/65-22,5 x 11,75 con los tornillos M16 que unen a cada uno de los tres segmentos.



Figura 1. Dispositivo HUTCHINSON C.R.F 385/65-22,5 x 11,75, el círculo en rojo muestra al tornillo M16 [2].

La figura 2 es una imagen tomada en los talleres de Miraflores y muestra cómo se monta el segmento del dispositivo sobre la llanta.



Figura 2. Segmento del dispositivo HUTCHINSON C.R.F 385/65-22,5 x 11,75 montado sobre la llanta ALCOA.

La imagen 3 muestra la ranura que permite la inserción de uno de los vástagos del tornillo M16 en los segmentos del dispositivo HUTCHINSON.



Figura 3. Vista del segmento HUTCHINSON donde puede apreciarse la ranura para la inserción de uno de los vástagos del tornillo M16.

Como ya se mencionó, en el año 2017 el tornillo M16 entró en el programa de homologación y sustitución del Departamento de I+D+i. Lo que se buscó fue fabricar nacionalmente este elemento considerando que era importando desde Francia, además el mencionado tornillo hace parte de los insumos para defensa militar que son fabricados y

comercializados por HUTCHINSON®, lo cual dificultaba su importación directa y retardaba su entrada al país ya que el Metro de Medellín debía demostrar y justificar que su compra no estaba destinada a actividades bélicas. Lo anterior motivó al equipo de homologación y sustitución de I+D+i junto al personal de tranvías a producir el tornillo localmente salvando así todas las barreras que estaban presentes en su importación. Siguiendo los pasos establecidos en el Procedimiento para solución de problemas técnicos (PE010) del Metro de Medellín, los profesionales de I+D+i realizaron el levantamiento de la información técnica, luego con la participación de ASMECON S.A.S. se realizó el análisis metrológico y dimensional del tornillo y se realizaron los planos del componente homologado. El Grupo de Materiales Poliméricos de la Universidad de Antioquia se encargó de caracterizar químicamente el tornillo mediante un ensayo de espectrometría óptica, también realizaron ensayos de dureza, ensayos de tracción y finalmente realizaron los estudios de análisis de falla para un tornillo nuevo y un tornillo que estuvo en funcionamiento. Posteriormente se realizó la fabricación del primer lote de prototipos con la empresa local del sector metalmeccánico Forjas Bolívar S.A.S.

Los tornillos HUTCHINSON® son fabricados con acero de la serie AISI/SAE 4140. A diferencia de un tornillo convencional, en el tornillo HUTCHINSON® salen dos vástagos de la cabeza hexagonal; como se puede observar en la Figura 4 tanto la parte roscada del vástago izquierdo como la del derecho tienen un recubrimiento o micro-encapsulado que sirve como un sistema de bloqueo químico asegurando que la unión rosca-tuerca no pierda su fuerza de apriete cuando el sistema se encuentre en servicio. Cada tornillo tiene su juego de tuercas, derecha (R) e izquierda (L); las tuercas se insertan en unas ranuras especiales dispuestas en los segmentos HUTCHINSON C.R.F 385/65-22,5 x 11,75.



Figura 4. Tornillos HUTCHINSON M16, se pueden apreciar el encapsulado en cada una de las roscas de los vástagos del tornillo; en la rosca izquierda el encapsulado es de color naranja y en la rosca derecha el encapsulado es de color azul [2].

El en proceso de homologación del tornillo M16 se realizó una innovación con el fin de reemplazar el encapsulado de la rosca del vástago izquierdo. No se tuvo en cuenta el encapsulado de la rosca del vástago derecho considerando que el manual o procedimiento de montaje solo hacía énfasis en el manejo, instalación y ubicación del encapsulado del vástago izquierdo. Para sustituir este recubrimiento se diseñó y fabricó una platina guía; este elemento está pensado para que mantenga la fuerza de precarga entre la rosca y la tuerca del vástago derecho. La platina guía tiene forma de L con una base que tiene una geometría especial en forma de arco que abraza la cabeza hexagonal del tornillo. El extremo vertical de la L tiene una perforación en la cual se inserta un tornillo Allen. La tuerca derecha también tiene una perforación que permite la inserción del tornillo Allen, lo cual asegura que la platina guía se mantiene fija al tornillo M16. El nombre que se le dio a este prototipo fue el de Kit de tornillo M16 ya que es un grupo de piezas constituidas por un tornillo especial, las roscas izquierda (L) y derecha (R), la platina guía y el tornillo Allen, como se describe en la Figura 5. Cada uno de los elementos que conforman el kit (con excepción del tornillo Allen) tienen un tratamiento superficial de galvanizado cuyo espesor varía entre 8 y 15 μm .

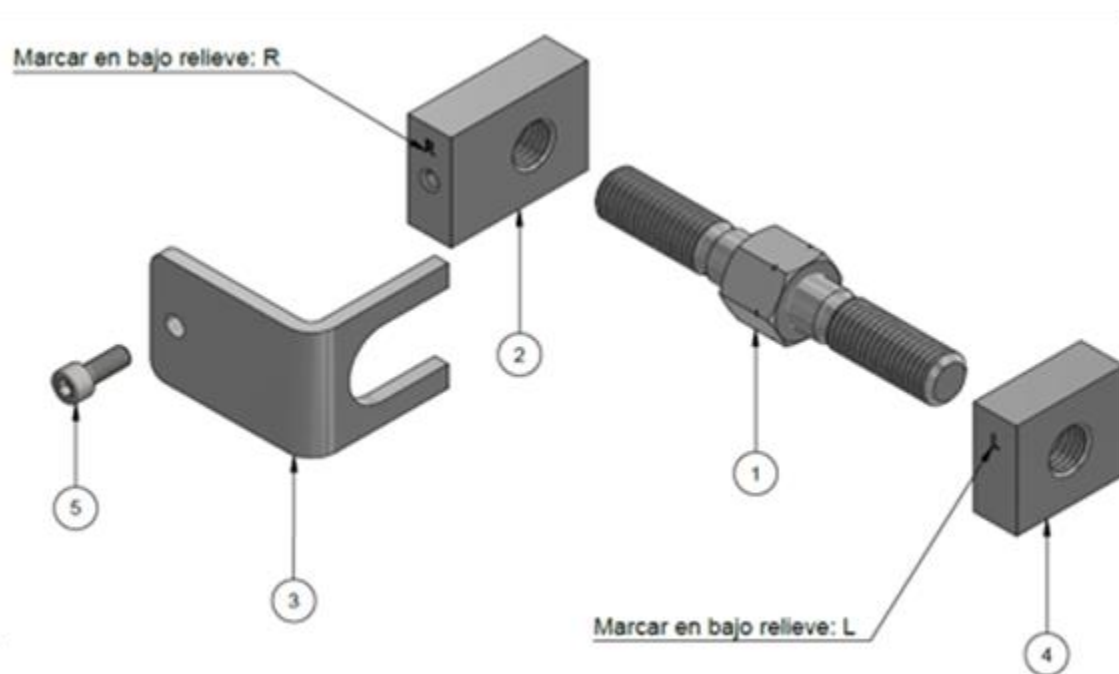


Figura 5. Vista explosionada del kit de tornillos M16, (1) tornillo especial M16, (2) tuerca derecha, (3) platina guía, (4) tuerca izquierda y (5) tornillo Allen [3].

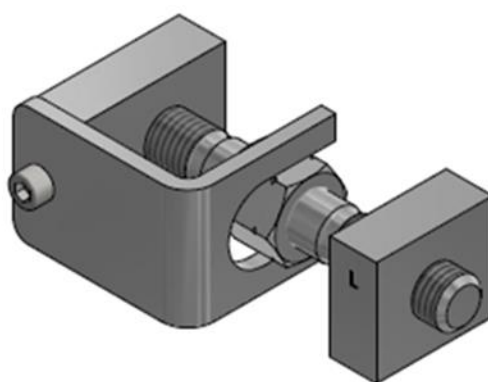


Figura 6. Kit de tornillo M16 [3].

Los primeros prototipos del kit de tornillos M16 fabricados por Forjas Bolívar S.A.S. demostraron ser un éxito, es decir, cumplieron con calidad y la vida útil en servicio que se esperaba de ellos, sin embargo, en vista de que se estaban agotando las unidades de ese primer lote, el Metro de Medellín contrató la fabricación de un segundo lote nuevamente con Forjas Bolívar S.A.S.

La segunda serie de prototipos no tuvo tanto éxito como la primera de tal manera que gran parte de las unidades presentaron una falla temprana, la falla se presentaba en la rosca del vástago izquierdo del tornillo y la morfología de la fractura daba indicios de ser una falla por fatiga.

Con la intención de determinar y esclarecer qué estaba sucediendo con este nuevo lote, en el año 2017 se hizo un contrato con el Grupo de Materiales Poliméricos de la Universidad de Antioquia para realizar los estudios de análisis de falla del tornillo. El informe que se le presentó al Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación concluyó que: la falla se presenta por fatiga, la falla se inicia en el borde del filete y que el material presenta inclusiones no metálicas que corresponden a óxidos y sulfuros los cuales disminuyen la calidad metalúrgica del material [4]. Dentro de las recomendaciones que se hacen en el informe están: pactar con el fabricante la calidad metalúrgica del material, seguir estrictamente el procedimiento de montaje y desmontaje asegurándose que no se excedan los límites de precarga recomendados por HUTCHINSON® [4].

Dado que el segundo lote de prototipos estaba presentando los inconvenientes mencionados, era necesario disponer de más unidades del kit de tornillos M16 para reemplazar los defectuosos y tener existencias en el almacén del taller de Miraflores. En los años 2018 a 2020 se realizaron contratos de fabricación con otras empresas del sector metalmecánico, estas fueron: EDAFA S.A.S e Industrias FAMEC S.A.S. Todas las empresas que han participado en la elaboración del kit de tornillo M16 son proveedores y fabricantes reconocidos por el Metro de Medellín. Además de contar con una amplia experiencia y reconocimiento en el sector metalmecánico antioqueño, dichas empresas se destacan por la calidad de sus productos y la tecnología de punta utilizada en sus procesos.

A pesar de lo anterior la falla de los tornillos M16 continuaba siendo un problema para los tranvías del Metro de Medellín. En un segundo intento por esclarecer la causa de este problema, en el año 2020 se contrató con EDAFA S.A.S. La realización de un nuevo estudio de análisis de

falla para los tornillos, las conclusiones y recomendaciones del informe presentado por EDAFA S.A.S. coinciden con las que en el año 2017 hizo el Grupo de Materiales Poliméricos de la Universidad de Antioquia.

Como parte del proceso de aprendizaje que se realizó en el Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación del Metro de Medellín, se le asignó al practicante de Ingeniería de Materiales la tarea de apoyar este proceso de homologación y sustitución con el aporte de ideas o propuestas que desde el punto de vista del proceso de fabricación tiendan a dar solución al problema que se está presentando con los tornillos. Con este fin se entregó al aprendiz la siguiente documentación para su comprensión y análisis:

- El informe de caracterización realizado en el año 2017 por el Grupo de Materiales Poliméricos de la Universidad de Antioquia.
- El informe de análisis de falla realizado en el año 2017 por el Grupo de Materiales Poliméricos de la Universidad de Antioquia.
- La ficha de homologación del kit de tornillos M16.
- El plano del kit de tornillos M16 elaborado en el año 2017 por ASMECON S.A.S.
- El informe de análisis de falla realizado en el año 2020 por EDAFA S.A.S.
- 2 kits de tornillos completos: uno fabricado por Forjas Bolívar S.A.S y el otro por EDAFA S.A.S.
- 2 tornillos que fallaron en servicio.

La proposición de ideas debía estar apoyada en el análisis de los informes entregados. También era importante tener en cuenta que dichas ideas debían hacerse desde el punto de vista de los procesos de fabricación del elemento; los parámetros de diseño del elemento como el ángulo del filete y la rosca no debían considerarse ya que el tornillo homologado debía cumplir con todos los parámetros de diseño del tornillo HUTCHINSON ®.

2.2. Estudio de mercado para la reparación y adecuación de las estaciones solares de la red Metro

El 20 de diciembre del año 2019 el Metro de Medellín activó las primeras estaciones solares para el suministro de energía solar a dispositivos electrónicos a través de puertos USB [7].

El objetivo de este proyecto liderado por la ingeniera electricista Lina María Parra Hoyos del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación es que los usuarios de la red Metro puedan cargar sus dispositivos móviles con el uso de una energía limpia y renovable como lo es la energía solar. De esta manera, se consolida el compromiso del Metro de Medellín con la implementación de tecnologías que respeten el medio ambiente, además de que este proyecto responde al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que se enmarcan en el Sistema de Gestión Integral (SGI) del Metro de Medellín.

Dentro del SGI se encuentra la iniciativa de gestión ambiental, la cual promueve la movilidad sostenible en la región con la construcción y operación de corredores de transporte con tecnología limpia [8].

Las estaciones solares tienen forma de “árbol” como se ilustra en la Figura 7; en la parte superior tienen un marco metálico en el cual se ubican los paneles solares, mientras que en el tronco del árbol se ubican las cajas que contienen los puertos USB. Se dispone de una superficie circular que rodea el tronco para que el usuario pueda colocar su dispositivo móvil. Toda la estación solar tiene una base la cual se encuentra anclada al piso mediante pernos.

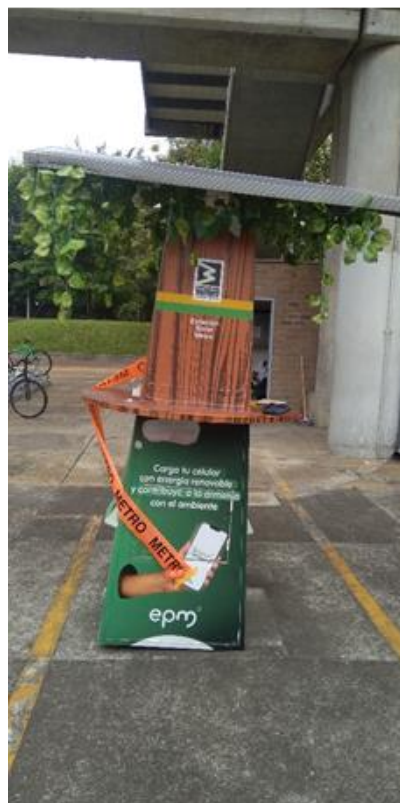


Figura 7. Estación solar ubicada bajos del costado occidental de la estación Itagüí.

Durante su primer año de operación muchas de las estaciones solares estaban presentando averías. Esto como consecuencia de su exposición al medio ambiente y a la incorrecta utilización por parte de algunos usuarios del sistema Metro.

La estación solar de la estación Itagüí quedó casi inutilizable después de que un fuerte viento la desanclara de su base, además las cajas donde estaban ubicados los puertos USB estaban en muy mal estado debido a la corrosión de las mismas. Por las razones expuestas la estación solar tuvo que ser reubicada en el costado oriental de la estación Itagüí (costado en el que se encuentra ubicado el Centro Comercial Mayorca) donde el tránsito de usuarios es mayor.

Con el objetivo de readecuar la estación solar y rehabilitarla para los usuarios se reinstaló nuevamente, sin embargo, la estación solar no estaba funcionando. Al igual que la estación solar de Itagüí, otras estaciones de la red Metro estaban fuera de servicio por lo cual era necesario rehabilitarlas para que los usuarios continuaran cargando sus dispositivos móviles. Debe tenerse

en cuenta también que las estaciones solares no solo fueron concebidas para este fin, sino que se proyectó que en un futuro fueran utilizadas como espacios publicitarios [7].

En uno de los comités del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación que se llevaron a cabo en el mes de junio, la ingeniera Lina María Parra Hoyos solicitó la colaboración de los aprendices para que le ayudaran a mitigar este problema y a reestablecer el servicio de carga de los dispositivos móviles para los usuarios. El practicante de ingeniería de materiales contribuiría con la rehabilitación y adecuación de la estructura de la estación solar teniendo en cuenta la no afectación de la estética de la misma, y encontrar soluciones que mitigaran el problema de corrosión que se estaba presentado en las cajas metálicas que contenían los puertos de conexión USB. También era necesario implementar sistemas que no fueran fáciles de vandalizar por parte de los usuarios.

La figura 8 muestra el estado de los puertos USB de la estación solar de Itagüí.



Figura 8. Elemento de las estaciones solares que debía ser reparado, se pueden observar zonas con corrosión debido a la exposición al medio ambiente.

2.3. Tableros de consumo de energía de las subestaciones eléctricas alimentadoras (SEAs) de Zamora, Envigado y San Diego

En el Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación no solo se trabaja en procesos como los de homologación y sustitución, sino también en proyectos de carácter energético que contribuyan con el cuidado y el mejoramiento del medio ambiente. El Metro de

Medellín como cualquier otra empresa maneja información en forma de datos. Los datos son muy importantes para cualquier compañía ya que su análisis permite hacer proyecciones y tomar decisiones a corto, mediano y largo plazo. Además, los datos permiten evaluar y predecir el comportamiento de los sistemas a través del tiempo. Adicional a esto son indicadores que estiman si están cumpliendo con los diferentes procesos de gestión de la empresa (gestión de calidad, gestión de seguridad y salud en el trabajo y por último gestión ambiental).

Los tableros de consumo de energía de las subestaciones alimentadoras (SEAs) es un proyecto que actualmente se encuentra en fase de desarrollo y que está siendo ejecutado por algunos profesionales de I+D+i junto con personal del Área de Infraestructura del Metro de Medellín. El principal objetivo de este proyecto es disponer de datos en tiempo real que muestren cómo es el consumo de energía en cada una de las subestaciones y que permitan comparar las mediciones realizadas por el Metro de Medellín con las de Empresas Públicas de Medellín – EPM. Se prevé que la disposición de estos tableros de energía será de gran ayuda para la gestión de procesos relacionados con el manejo y el control de la energía eléctrica.

Las subestaciones eléctricas alimentadoras (SEAs) son 3 y están distribuidas de norte a sur: Subestación Eléctrica Alimentadora de Zamora (ZAM), Subestación Eléctrica Alimentadora de San Diego (SDI) y Subestación Eléctrica Alimentadora de Envigado (ENV). Las SEAs son las encargadas de la transformación de la tensión (voltaje) que se suministra al sistema Metro (subestaciones de tracción, estaciones de pasajeros y edificaciones) [9].

Para este proyecto, la ingeniera Diana Marcela Zapata del Departamento de I+D+i solicitó la colaboración del aprendiz.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Diseñar e implementar una metodología para articular la labor de los practicantes de ingeniería de materiales con los proyectos y procesos a cargo del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá.

3.2. Objetivos específicos

1. . Establecer un procedimiento para el análisis de la información de los materiales evaluados en los procesos de homologación y sustitución desarrollados por la empresa en el período junio-noviembre de 2020.
2. Contribuir con la solución o mitigación de un problema que afecte la continuidad de la operación de alguno de los sistemas de la red Metro en el que puedan hacerse aportes utilizando los conocimientos adquiridos en el pregrado de Ingeniería de Materiales.
3. Validar que la metodología desarrollada sea adecuada aplicándola en por lo menos uno de los procesos o proyectos del Departamento de I+D+i en los cuales se cuente con apoyo del practicante.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Definiciones de tornillo

Un tornillo es una pieza normalmente metálica y alargada con forma cilíndrica y roscada y con una cabeza desde donde se ejerce la fuerza necesaria para su fijación. Todos los tornillos están regulados por las normas DIN, y están normalizados en todos sus aspectos; como materiales y propiedades. La mayoría son de aluminio y/o acero, aunque con distinto grado de aleación. La norma EN-ISO 898-1 establece una serie de calidades que van desde la más baja (4.6) a la más alta (12.9), que deben ir señalizadas en la cabeza del tornillo [10].

Un tornillo es un elemento de unión constituido por una barra cilíndrica o cónica, sobre la que se ha realizado un roscado, es decir, el arrollamiento de un resalte de sección generalmente triangular, pero que puede poseer también otras formas [11].

- Un tornillo es una pieza cilíndrica o cónica, por lo general metálica, con resalte en hélice y cabeza apropiada para roscarla [12].

4.1.1. Partes de un tornillo

Los tornillos constan de tres partes básicas que son: la cabeza, el cuello y la rosca:

4.1.1.1. La cabeza

Es la parte del tornillo cuya función es que permite imprimir el movimiento giratorio para atornillar y desatornillar con diferentes herramientas, la forma de la cabeza puede ser redonda, hexagonal, cuadrada, cilíndrica o avellanada [13].

Los tornillos se pueden clasificar según el tipo de cabeza:

4.1.1.1.1. Cabeza hexagonal

Este tipo de cabeza permite aplicación de una elevada fuerza de apriete. Los tornillos de cabeza hexagonal generalmente se utilizan para unir piezas metálicas, es necesario no confundirlos

con los tornillos tipo Allen, que también tienen forma hexagonal pero solo en la ranura o huella [13].

4.1.1.1.2. Cabeza cuadrada

Similares a los tornillos hexagonales, sin embargo, en lugar de seis lados, la cabeza de los tornillos cuadrados tiene 4 lados. Estos tornillos permiten una elevada fuerza de apriete.

4.1.1.1.3. Cabeza cilíndrica con huella Allen

Los tornillos tipo Allen se caracterizan por tener una cabeza redondeada con una huella o ranura hexagonal.

4.1.1.1.4. Cabeza ranurada

La huella o ranura en la cabeza de un tornillo puede ser de varios tipos: Phillips, Torx o estrella, Pozidriv y Allen, este tipo de ranuras dependen de la herramienta para atornillar/desatornillar y en algunas ocasiones del fabricante.

4.1.1.1.5. Cabeza avellanada

Este tipo de tornillos puede tener cualquier tipo de ranura. La cabeza puede quedar al ras de la superficie si el agujero tiene la forma adecuada.

4.1.1.2. El cuello

El cuello corresponde a la parte del cilindro que permanece sin roscar [12].

4.1.1.3. La rosca

Es la parte del vástago o cilindro que está surcada o tallada, la rosca se divide en tres partes: el filete o hilo, la cresta y el fondo o raíz [12].

4.1.1.3.1. El filete o hilo

Se define como filetes o hilos a cada una de las salientes de la rosca. El filete está compuesto por una cresta que decae en dos valles; el del filete anterior y el del posterior.

4.1.1.3.2. La cresta

Es la parte más elevada del filete o hilo.

4.1.1.3.3. El fondo o raíz

Es la parte que forma el valle.

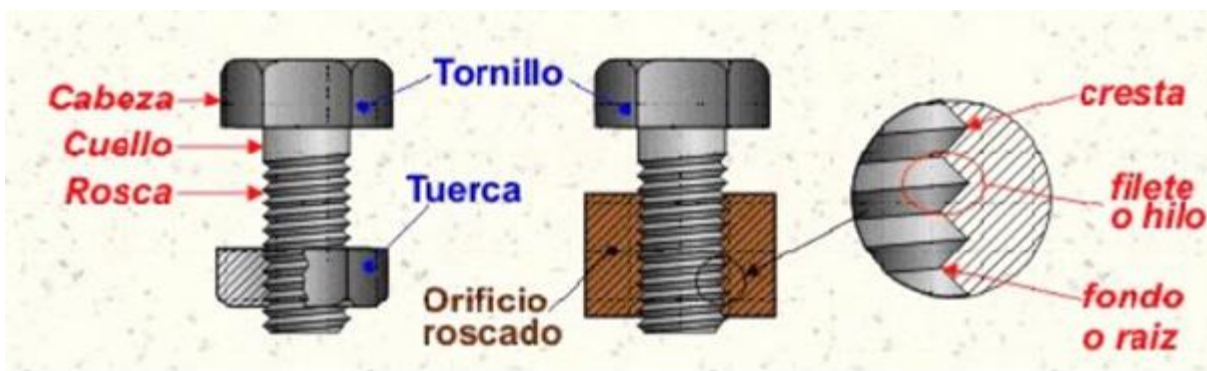


Figura 9. Partes de un tornillo (cabeza, cuello y rosca), detalle de la rosca donde se muestra el filete, la cresta y el fondo [12].

4.1.1.4. Funciones de la rosca

Las funciones principales de una rosca básicamente son tres [14]:

- Formar un acoplamiento mecánico para mantener las piezas unidas (por ejemplo, una tuerca y un perno).
- Transmitir fuerza o movimiento mediante la conversión de un movimiento rotacional en uno lineal o viceversa (por ejemplo, el tornillo de una máquina extrusora).

- Aportar ventajas mecánicas al hacer uso de una fuerza pequeña para crear una fuerza de mayor magnitud.

4.1.1.5. La rosca métrica ISO

La medida de este sistema de roscas está basada en el sistema métrico decimal.

La rosca métrica consiste en un filete con forma de triángulo equilátero cuyo vértice está truncado a $1/8$ de su altura y el fondo a $1/16$ de dicha altura, de esta manera existe una holgura entre el vértice y el fondo del filete, el ángulo de flanco es de 60° .

Estas roscas se designan con la letra M, seguida por la cifra del diámetro nominal del tornillo, luego por el paso en milímetros [13] [14].

4.1.1.6. Otros parámetros importantes en la clasificación de las roscas

4.1.1.6.1. Diámetro nominal o exterior

Es el diámetro mayor de la rosca. En un tornillo es el diámetro entre las crestas de los filetes, mientras que en una tuerca es el diámetro medido entre los valles [14].

4.1.1.6.2. Diámetro interior

El diámetro menor de la rosca en un tornillo corresponde al diámetro medido entre los valles, mientras que en una tuerca es el diámetro medido entre las crestas [14].

4.1.1.6.3. Ángulo de rosca o de flanco

Es el ángulo medido en grados sexagesimales que forman los flancos de un filete según el plano axial [14].

4.1.1.7. El paso

El paso es la distancia entre dos crestas consecutivas que representan la longitud que avanza un tornillo en un giro de 360° , el paso de una rosca puede ser fino (F), medio (M) y basto (B).

4.1.1.7.1. El paso fino

El paso fino (F) se utiliza cuando se necesita una fijación importante o cuando el espesor del diámetro del tornillo es pequeño y no se pueden usar roscas normales por la profundidad.

4.1.1.7.2. El paso medio

El paso medio (M) suele estar normalizado.

4.1.1.7.3. El paso basto

El paso basto (B) no se utiliza para diámetros pequeños por la debilidad que provocaría en el tornillo al ser la profundidad del filete mayor que el paso de tipo medio.

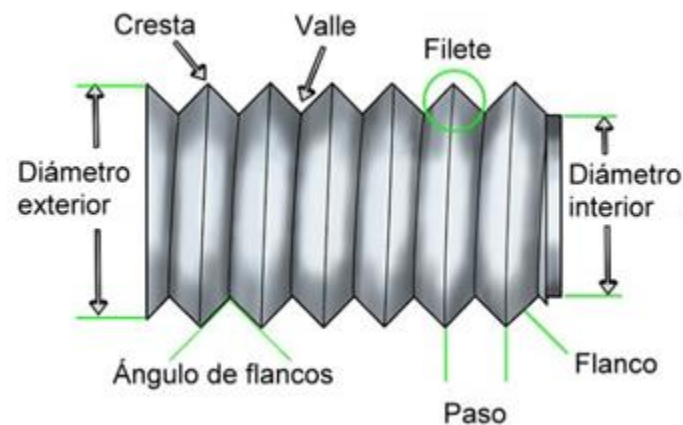


Figura 10. Parámetros de la rosca: cresta, valle, filete, ángulo de flancos, paso, flancos, diámetros exterior e interior [14].

La rosca métrica ISO es de diseño cilíndrico; este cilindro puede ser paralelo o recto. La rosca está formada por un filete helicoidal en forma de triángulo equilátero con crestas truncadas

y valles redondeados, el ángulo que forman los flancos y el del filete es de 60° y el paso medido en milímetros, es igual a la distancia entre los vértices de dos crestas consecutivas [14].

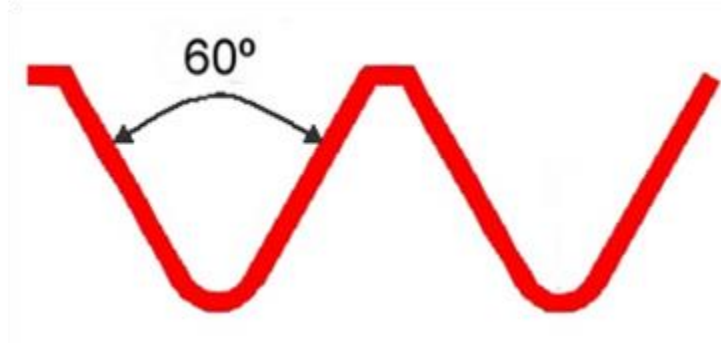


Figura 11. Detalle del filete de la rosca métrica ISO, cuyo ángulo entre filetes es de 60° .

4.1.2. Los tornillos M16

Según las normas ISO 68-1 e ISO 965-1 si la rosca es de paso medio, se designa con la letra M (mayúscula) acompañada con el valor del diámetro nominal en milímetros, para los tornillos M16 se tiene que:

La letra M → Indica que el paso del tornillo es medio y está normalizado.

El número 16 → Indica que el diámetro nominal o exterior del tornillo es de 16 mm.

A continuación se presenta una tabla para algunos tornillos de rosca métrica con las especificaciones de paso medio y fino.

Tabla 1. Algunas referencias de tornillos M con sus especificaciones de paso medio y paso fino.

Nomenclatura normalizada	M12	M14	M16
Diámetro exterior o nominal en milímetros	12	14	16
Paso normalizado en milímetros	1,75	2,00	2,00
Paso fino en milímetros	1,25	1,50	1,50

4.2. Materiales

4.2.1. Acero AISI/SAE 4140

El acero de la serie AISI/SAE 4140 es un acero de baja aleación de Cr-Mo (serie cromo-molibdeno). Este material se caracteriza por su alta resistencia y templabilidad, además posee una buena tenacidad y su deformación es baja cuando se somete a un proceso de enfriamiento rápido [15].

4.2.3. Principales usos del acero AISI/SAE 4140

Típicamente los aceros de esta denominación se utilizan para la fabricación de:

- Recipientes a presión de paredes delgadas
- Engranajes
- Todo tipo de ejes (ejes de motores, ejes de bombas, ejes hidráulicos, entre otros)
- Resortes
- Eslabones de cadenas
- Cuerpos de herramientas de corte

- Pernos de alta resistencia
- Tornillos
- Tuercas
- Barras de torsión

4.2.4. Composición química del acero de la serie AISI/SAE 4140

La Tabla 2 presenta los principales elementos (porcentaje en peso) de aleación del acero AISI/SAE 4140.

Tabla 2. Composición química del acero AISI/SAE 4140 (% en peso).

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
0,38-0,43	0,20-0,35	0,75-1,00	0,00-0,03	0,00-0,04	0,80-1,10	0,15-0,25

El contenido de cromo en este acero le permite una buena penetración de la dureza, el molibdeno por su parte le otorga al material una buena resistencia y homogeneidad en la dureza.

4.2.5. Propiedades metalúrgicas del acero AISI/SAE 4140

La Tabla 3 presenta las principales propiedades metalúrgicas del acero AISI/SAE 4140 (maquinabilidad, soldabilidad y tratamientos térmicos).

Tabla 3. Propiedades metalúrgicas del acero AISI/SAE 4140 (maquinabilidad, soldabilidad y tratamientos térmicos).

Propiedad	Descripción
Maquinabilidad	El acero AISI/SAE 4140 posee una buena maquinabilidad (aproximadamente del 66% tomando como referencia al acero SAE J403 grado 1212 cuya maquinabilidad sería del 100%)

<p>Soldabilidad</p>	<p>Todos los procesos de soldadura como SAW, SMAW, FCAW, GMAW y GTAW se pueden utilizar para soldar el acero AISI/SAE 4140, con el fin de evitar el agrietamiento es necesario realizar un precalentado de 170 a 350 °C [16].</p>
<p>Tratamientos térmicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Normalizado: El acero AISI/SAE 4140 normalmente se normaliza a 870 °C, se debe enfriar a temperatura ambiente. • Recocido esferoidal: Se realiza a 749 °C seguido de un enfriamiento lento a 665 °C con una velocidad de 10 °C/h, se puede realizar un enfriamiento rápido a 675 °C para un recocido isotérmico. • Recocido completo: El tratamiento se realiza hasta 845 °C, el enfriamiento lento parte de los 755 °C a una velocidad de 14 °C/h hasta los 665 °C, el enfriamiento rápido por su parte va hasta los 675 °C y se realiza durante 5 horas de recocido isotérmico. • Temple La temperatura de temple para el acero AISI/SAE 4140 puede ser de 204 a 649 °C, después de la normalización y el enfriamiento en aceite se puede obtener la dureza correspondiente.

	<ul style="list-style-type: none">• Forja: La temperatura de forja del acero AISI/SAE 4140 es de aproximadamente 1232 °C [16].
--	---

4.2.6. Microestructura del acero AISI/SAE 4140

La microestructura del acero AISI/SAE 4140 es una estructura de tipo martensita. La martensita es un micro-constituyente de los aceros y consiste en una solución sólida sobresaturada de carbono (C) en hierro α (Fe- α). Las estructuras de martensita pueden contener hasta un 1% de porcentaje en peso de carbono. La martensita es el constituyente típico de los aceros que han sido sometidos a un proceso de templado, se caracteriza por su elevada dureza. La dureza y la resistencia a la tracción de los aceros de martensita varían en función del porcentaje de carbono y el tratamiento térmico aplicado [17].

- **Resistencia a la tracción:** 1700 a 2500 MPa
- **Dureza:** 50 a 68 HRC

4.2.7. Morfología de la martensita

La martensita tiene una morfología de tipo acicular, es decir de aguja y su orientación preferencial es de 60° [17]. Sin embargo, la martensita se puede observar en la microestructura del acero de dos formas diferentes: listones o placas (véase la figura 12), dichas formas dependen del contenido de carbono presente en el acero.

En general, la martensita en forma de listones está asociada a una alta tenacidad y ductilidad en el acero, sin embargo, su resistencia a la tracción es baja.

Los aceros de estructuras de martensita en forma de placa tienden a ser más frágiles, poco dúctiles, pero más resistentes que los aceros cuyas estructuras de martensita tienen forma de listón [18].

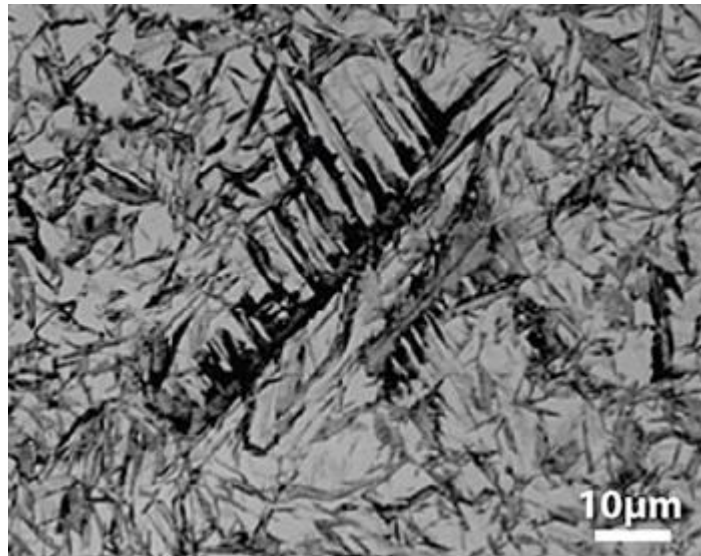


Figura 12. Listones o agujas de martensita en un acero [18].

4.3. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140

4.3.1. Sistema métrico

Se utilizan 10 formas de clasificar los elementos de fijación de acuerdo a sus propiedades mecánicas [19].

Tabla 3. Sistema métrico de clasificación de los tornillos según sus propiedades mecánicas.

Clase métrica	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
----------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------

El sistema métrico utiliza dos números:

- El primer número es 1/100 del mínimo de la resistencia a la tracción en N/mm^2 .
- El segundo número es 1/10 de la relación entre el límite de fluencia inferior y la resistencia a la tracción.

Por ejemplo para la designación 5.6 tenemos:

- **Primer número:** $5 \times 100 = 500 \text{ N/mm}^2$ (Resistencia a la tracción mínima).
- **Segundo número:** $6 \times 10 = 60\%$ de $500 \text{ N/mm}^2 = 300 \text{ N/mm}^2$ (Esfuerzo o límite de fluencia).

4.3.2. Clase métrica 10.9

Considerando que los tornillos M16 pertenecen a la clase métrica 10.9 se definen cada una de sus cifras:

- La primera cifra (10 para la clase 10.9) indica en N/mm^2 , un 1/100 de la resistencia nominal a la tracción, para la clase de calidad 10.9 la resistencia a la tracción es $10 \times 100 = 1000 \text{ N/mm}^2$.
- La segunda cifra (9 para la clase 10.9), por 10, indica la relación entre el límite de fluencia y la resistencia a la tracción: $9 \times 10 = 90\%$ de $1000 \text{ N/mm}^2 = 900 \text{ N/mm}^2$.

4.4. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción implica la aplicación de una carga de tensión al tornillo o una pieza hasta que ésta falle.

Inicialmente el tornillo sufre una *deformación elástica* a medida que se le aplica la carga, cuando se retira la carga la pieza vuelve a su longitud original.

Si el tornillo se somete a una carga más alta se deformará permanentemente, esto se conoce como *deformación plástica*, si se aumenta la carga aplicada al tornillo en algún momento éste se romperá [19].

Un ensayo de tracción brinda los siguientes parámetros que son importantes para la evaluación de las propiedades mecánicas de un material:

4.4.1. Límite elástico (R_e)

Se conoce también como punto elástico o esfuerzo de fluencia, en una curva esfuerzo deformación indica el punto en donde se da la transición entre la deformación plástica y la deformación elástica.

4.4.2. El límite al 0.2% ($R_{p 0.2}$)

También representa el punto de transición de una deformación elástica a una deformación permanente (plástica), especificada cuando se presenta un 0.2% de cambio en la longitud. Este valor es de vital importancia para calcular la capacidad de carga del tornillo.

4.4.3. La resistencia a la tracción (R_m)

Es la carga más alta que puede soportar el tornillo. Por encima de este valor la resistencia del tornillo decrece, la rotura en los tornillos ocurre siempre en la rosca o en el vástago, no se debe presentar rotura en la cabeza o en el cuello del tornillo.

4.4.4. La elongación a la rotura (A)

Es el alargamiento permanente en porcentaje (%) con respecto a la longitud inicial.

4.5. Ensayo de dureza

La prueba de dureza consiste en medir que presenta un material cuando se presiona un indentador contra él [19].

4.5.1. Dureza Brinell (HB)

La dureza Brinell se utiliza para materiales de dureza suave a media, esta prueba consiste en presionar un indentador esférico contra el material y medir el diámetro de la huella.

4.5.2. Dureza Vickers (HV)

Este ensayo se realiza para materiales blandos y duros. Se usa un indentador en forma de pirámide cuya base es cuadrada, se miden las diagonales de la huella.

4.5.3. Dureza Rockwell (HR)

La prueba mide la diferencia entre una carga preliminar y una carga de prueba. Los valores de medición se pueden leer directamente desde los dispositivos de medición. HRC y HRA se prueban para materiales duros usando un penetrador de diamante, mientras que HRB y prueba de área HRF para materiales blandos usando una bola de acero endurecido.

La Tabla 4 resume las principales propiedades mecánicas del acero de la serie AISI/SAE 4140.

Tabla 4. Propiedades mecánicas para una barra de acero de 1 pulgada de diámetro (25,4 mm), se presenta la resistencia a la tracción, el esfuerzo de fluencia, el porcentaje de elongación y la dureza Brinell (HB) para un acero en condiciones de normalizado, recocido y templado [15], [16].

Resistencia a la tracción (en MPa)	Esfuerzo de fluencia (en MPa)	Porcentaje de elongación (en 50 mm)	Dureza Brinell (HB)	Condiciones del acero
1020	655	17.7	302	Normalizado a 870 °C
655	414	25.7	197	Recocido a 815 °C
1075	986	15.5	311	Temple a 845 °C

La tabla 5 resume las propiedades mecánicas para los aceros de la clase métrica 10.9, a la que pertenecen los tornillos M16.

Tabla 5. Principales propiedades mecánicas para el sistema o clase métrica 10.9

Resistencia a la tracción nominal (R_m) en N/mm²	1000
Resistencia a la tracción mínima (R_{min}) en N/mm²	1040
Dureza Vickers (HV) F ≥ 98N	320 (mínimo) 380 (máximo)
Dureza Brinell (HB) F = 30D²	304 (mínimo) 361 (máximo)
Dureza Rockwell (HRC)	32 (mínimo) 39 (máximo)

Limite al 0.2% (R_p) en N/mm²	900 (valor nominal) 940 (mínimo)
Elongación a la rotura (A) en %	9

4.6. Procesos de fabricación de tornillos

4.6.1. Laminación

Por regla general la mayoría de los tornillos se fabrican por procesos de conformación en frío; el conformado en frío por laminación implica la provocación de deformación plástica a temperatura ambiente. Los materiales que se listan a continuación son aptos para el proceso de laminación:

- Aceros no aleados
- Aceros cementados
- Aceros templados
- Aceros revenidos
- Cobre
- Latón
- Aleaciones de aluminio

La laminación es el método de fabricación más económico. Sin embargo, solo es comercialmente viable para lotes de producción con una gran cantidad de piezas.

La laminación no requiere de la remoción de material y se utiliza para la fabricación de pernos, tornillos y pasadores con un diámetro de vástago de 30 mm y una longitud de hasta 300 mm.

Un aspecto importante en cualquier proceso de fabricación es la cuidadosa selección del material. Esta es la primera consideración que debe hacerse ya que asegura la calidad del producto final. Cuando se fabrican los tornillos es necesario la realización de un tratamiento térmico después del proceso de laminación, esto con el fin de mejorar y obtener las propiedades mecánicas deseadas en el material [20].

4.6.2. Ventajas del proceso de laminación en la fabricación de tornillos

- El material sufre un endurecimiento en la dirección de laminación.
- Se presenta un aumento en el límite elástico y la resistencia a la tracción.
- Se crea una superficie lisa en los filetes.
- Se presenta un alargamiento del grano en la dirección de laminación.
- La continuidad del grano permanece intacta.
- Los defectos del material se hacen visibles en el proceso de conformado.
- La laminación es un proceso de fabricación económico.

4.6.3. Maquinado o torneado

Las piezas mecanizadas se caracterizan típicamente como piezas torneadas, algunos tornillos también se fabrican como piezas maquinadas, un ejemplo de esto son los tornillos moleteados [20]. El moleteado es un proceso de conformación en frío que se realiza en piezas que deben ser manipuladas a mano con el fin de darles una mayor superficie de agarre y así, evitar su deslizamiento (véase la figura 13) [21].



Figura 13. Tornillo DIN 653 con cabeza cilíndrica sin huella y con moleteado en su parte lateral [21].

El maquinado o torneado es adecuado como una técnica de fabricación y de acabado con ella se puede realizar bordes afilados, se pueden maquinar radios pequeños y perfiles especiales. Además de esto hay algunos materiales que no se pueden conformar sin mecanizado.

Los tornos automáticos que se utilizan en la fabricación de algunos tornillos dan forma a perfiles redondos (varillas) y a bobinas. Como regla general el diámetro del producto semi-terminado es igual al diámetro más grande requerido para la pieza terminada.

El modelado se realiza mecanizando con la herramienta de torneado. A diferencia del conformado por laminación, esto tiene el efecto de destruir la continuidad de la estructura de grano del material primario.

En el torneado no se requiere el uso de herramientas especiales como fresas y taladros.

Con el maquinado no solo se pueden obtener piezas con forma cilíndrica, también se pueden realizar procesos de fresado de áreas planas, taladrado y rectificado, como por ejemplo cuando se le quiere dar a la pieza una rugosidad específica.

4.7. La micro-encapsulación

La micro-encapsulación se define como el proceso de envoltura de una sustancia dentro de otra, en una escala muy pequeña, obteniendo cápsulas desde menos de 1 μm a varios cientos de ellas.

Las micro-cápsulas pueden ser esféricas, con una pared continua envolviendo el material encapsulado, o presentar una gran diversidad de formas, estas pueden ser simétricas o no, con una gran multitud de gotitas del material incrustado en el material de soporte, además, pueden ser encapsulados materiales en los tres estados: sólido, líquido y gaseoso [22].

4.7.1. Micro-encapsulado de tornillos

Los micro-encapsulados son recubrimientos adhesivos poliméricos que evitan el aflojamiento entre la unión tuerca-tornillo, estos recubrimientos están compuestos de diminutas micro cápsulas, estas se destruyen al atornillar las piezas roscadas con recubrimiento en la rosca opuesta. Las micro cápsulas se destruyen mediante la presión y el cizallamiento [23].

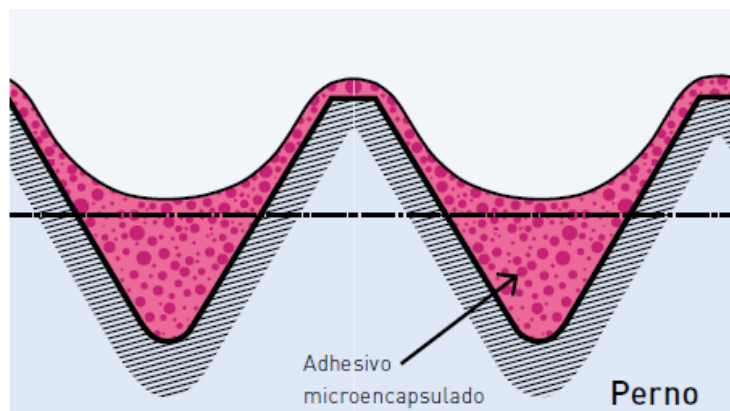


Figura 14. Recubrimiento adhesivo (micro-encapsulado) en los filetes de la rosca de un perno [24].

4.7.2. Justificación del uso de la micro-encapsulación en los tornillos

Debido a las cargas dinámicas como las vibraciones u oscilaciones térmicas, las uniones roscadas se aflojan por sí mismas en caso de que la fuerza de apriete sea insuficiente y las superficies no encajen perfectamente. Esto se debe a que se producen movimientos relativos que hacen que las uniones se desatornillen por sí solas.

Las cargas cambiantes (cargas dinámicas) producen estados breves sin fricción, con lo cual el tornillo se mueve de manera relativa con respecto a la tuerca. Estos minúsculos movimientos tienen como consecuencia el aflojamiento de la unión roscada.

El desatornillado puede evitarse con la utilización de medios adecuados para la fijación de tornillos; una de las posibilidades de este tipo de fijación son los recubrimientos adhesivos, dichos recubrimientos se aplican por todo el perímetro [24].

4.7.3. Principales ventajas de la utilización de recubrimientos adhesivos (micro-encapsulado de tornillos)

- Los recubrimientos adhesivos ofrecen una fijación fiable contra el proceso de desatornillado.
- Los recubrimientos adhesivos ofrecen propiedades sellantes adicionales como son: la fijación, el bloqueo y la estanqueidad.
- Se pueden aplicar en casi todo tipo de materiales.
- Son adecuados para prácticamente todas las superficies roscadas.

4.8. Análisis de Falla

4.8.1. Fractura

Se define fractura como la separación de un cuerpo en dos o más piezas, esta es la respuesta del cuerpo a la aplicación de una tensión que puede ser; estática (cuando se somete al elemento a un esfuerzo constante en el tiempo), por fatiga (cuando se somete al elemento a tensiones cíclicas o variables en el tiempo) y por fluencia (que básicamente se presenta cuando el elemento

experimenta una tensión que depende del tiempo a una temperatura elevada). Los esfuerzos aplicados a un elemento metálico pueden ser de tres tipos: de tracción, de compresión y de cizallamiento o torsión, los tornillos pueden experimentar estas tres formas de esfuerzo.

En los materiales existen dos posibles modos de fractura: la fractura frágil y la fractura dúctil, estas dos clasificaciones están basadas en la capacidad que posee el material para experimentar deformación plástica.

Los metales dúctiles se caracterizan de manera típica por presentar una deformación plástica y absorber una gran cantidad de energía antes de la fractura, por su parte, los materiales frágiles presentan una deformación plástica casi nula, lo que indica que su absorción de energía es muy baja.

Hablar de que un material es dúctil o frágil es algo relativo, ya que el tipo de fractura se puede presentar de acuerdo con las condiciones o esfuerzos a los que estuvo sometido el material.

Cualquiera de los dos mecanismos de fractura involucra dos procesos; el primero de ellos es la formación de la grieta y el segundo es la propagación de la misma [25].

4.8.2. Fractura dúctil

La fractura dúctil se caracteriza por una deformación plástica que se va extendiendo en las proximidades del material conforme la grieta avanza, este proceso es relativamente lento, es por eso que se puede afirmar que la grieta permanece “estable”, es decir, que se mantiene a menos de que se produzca un aumento en la tensión aplicada. Este fenómeno se evidencia en la superficie de fractura donde se puede apreciar zonas de torsión o desgarre [25].

El proceso de fractura por tracción tiene las siguientes etapas:

- La primera etapa es la formación del cuello o “necking”.
- Después de la formación del cuello se forman pequeñas cavidades (micro-cavidades) en el interior de la sección transversal.
- Conforme la deformación continua, las micro-cavidades se hacen más grandes.

Para analizar a fondo la morfología de una fractura se utilizan técnicas como la microscopía óptica y la microscopía electrónica. La microscopía electrónica permite tomar imágenes sub-micrométricas de alta resolución (véase la figura 15), en una fractura causada por una tensión uniaxial es característico encontrar pequeños hoyos esféricos.

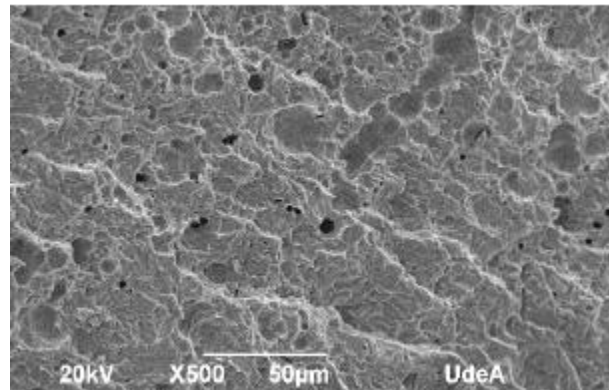


Figura 15. Microscopía SEM de la superficie de fractura de los tornillos M16 donde se pueden apreciar los micro-hoyuelos y la coalescencia de micro-hoyuelos en la superficie de la fractura [4].

4.8.3. Fractura frágil

La fractura frágil se caracteriza porque ocurre de forma repentina y catastrófica. La fractura frágil no da ningún tipo de aviso debido a la rápida propagación que presenta la grieta [25].

La fractura frágil no presenta ningún tipo de deformación. La fractura frágil tiene patrones distintivos:

- En la fractura frágil no se aprecian los signos de deformación plástica que pueden verse en la fractura dúctil.
- En algunas piezas o elementos fabricados de acero se forman una serie de marcas distintivas en forma de “V”; estas marcas se conocen como marcas de sargento o Chevron marks, dichas huellas se sitúan cerca del centro de la sección transversal de la fractura que apunta hacia el sitio de inicio de la grieta.

- Algunas superficies de fractura frágil contienen líneas o crestas que se irradian desde el origen en un patrón con forma de abanico (véase la figura 16).

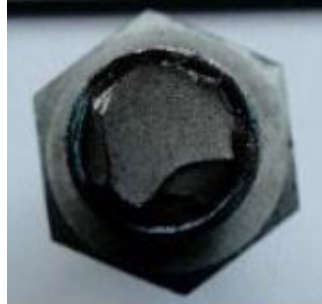


Figura 16. Imagen de la superficie de fractura de los tornillos M16 donde se pueden apreciar un patrón de abanico en la superficie de la fractura [4].

5. METODOLOGÍA

5.1. Diseño e implementación de una metodología para articular la labor de los practicantes de Ingeniería de Materiales con los proyectos a cargo del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Tradicionalmente los practicantes de Ingeniería de Materiales que llegan al Departamento de I+D+i son asignados como apoyo a los procesos de homologación y sustitución, sin embargo en I+D+i se ejecutan otros procesos y proyectos en los cuales el aprendiz puede participar aportando desde su especialidad ingenieril. Por esta razón se consideró el diseño y la implementación de una metodología para articular la labor de los practicantes de Ingeniería de Materiales con los proyectos y procesos a cargo del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación.

5.2. Metodología utilizada para la proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación tiendan a mejorar la vida útil del tornillo M16 del sistema anti-hundimiento de los órganos de rodamiento de los vehículos tranviarios

La metodología utilizada para la proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación tiendan a mejorar la vida útil del tornillo M16 del sistema anti-hundimiento de los órganos de rodamiento de los vehículos tranviarios, consistió en 4 etapas basadas en el ciclo HPVA (Hacer-Planear-Verificar-Actuar). Esta metodología es ampliamente utilizada en gestión de procesos y proyectos por parte de las empresas. Esta herramienta es sencilla de aplicar y con el debido uso, puede colaborar en gran medida con la ejecución de tareas de una forma organizada y eficaz [5]:

Primera etapa: Hacer. En esta fase se realizó el análisis de los informes de análisis falla que fueron presentados al Metro de Medellín por la Universidad de Antioquia y EDFA S.A.S en los años 2017 y 2020. Los objetivos principales de analizar estos informes fueron:

- Entender cómo se presentó el proceso de falla de los tornillos M16.

- Realizar un comparativo entre ambos informes para establecer cuáles eran sus principales similitudes y diferencias.
- Revisar los resultados de cada informe y establecer cuál era la causa de falla de los tornillos.
- Verificar las recomendaciones que las instituciones sugerían al Metro de Medellín en cuanto al manejo, correcto montaje y calidad metalúrgica de los tornillos M16.

Con esta primera etapa se pudo entender de forma global la problemática que se estaba presentando con estos elementos de sujeción. También, se establecieron algunas hipótesis que serían confirmadas o descartadas en las siguientes fases de la metodología. De igual manera se estaban gestando algunas ideas como propuesta para la solución del problema basadas en las recomendaciones de ambas instituciones.

Teniendo claro el cómo y por qué fallaban los tornillos se procedió también a hacer una indagación con los profesionales de I+D+i para que ellos aportaran más detalles y más información que era de su conocimiento y que podía ampliar la que ya se disponía. Además de esto, era importante conocer el punto de vista de los profesionales de I+D+i. Puesto que ellos conocían muy bien el proceso de homologación y sustitución que se había hecho con el tornillo HUTCHINSON® y habían hecho seguimiento al proceso de fabricación del elemento homologado así como también al correcto funcionamiento del tornillo en la unidad HUTCHINSON C.R.F.

Dentro de esta etapa también se realizó la lectura del procedimiento de montaje y desmontaje de la unidad HUTCHINSON C.R.F. Así como también se realizó una revisión bibliográfica para comprender mejor el funcionamiento de un tornillo, sus partes, la micro-encapsulación de los tornillos entre otros.

Segunda etapa: Planear. Esta fase se ejecutó con la colaboración del docente asesor. El objetivo principal de la planeación fue organizar las ideas y la información recolectada en el Hacer, esto con el fin de clasificar cual era la información o los datos esenciales que nos ayudarían a proponer ideas que dieran soluciones adecuadas al problema. También era necesario discutir sobre las hipótesis que inicialmente se tenían en mente teniendo en cuenta que podían ser verificadas o descartadas en etapas posteriores.

Segunda etapa: Planear. Esta fase se ejecutó con la colaboración del docente asesor. El objetivo principal de la planeación fue organizar las ideas y la información recolectada en el Hacer, esto con el fin de clasificar cual era la información o los datos esenciales que nos ayudarían a proponer ideas que dieran soluciones adecuadas al problema. También era necesario discutir sobre las hipótesis que inicialmente se tenían en mente teniendo en cuenta que podían ser verificadas o descartadas en etapas posteriores.

Las actividades que se desarrollaron en la etapa de planeación fueron las siguientes:

- Se realizó una primera reunión con el docente asesor para contarle el problema. Al finalizar esta reunión se acordó organizar en una presentación toda la información esencial del problema de forma que este pudiera ser fácilmente comprendido por cualquier persona y que se contara como una historia con un principio, un desarrollo y un final pero utilizando una metodología científica.
- De acuerdo con lo descrito anteriormente se realizó una presentación donde se hacía un barrido por todo el problema; se trazaron unos objetivos. Se realizó una introducción, se consignaron las causas o atribuciones del problema y finalmente se establecieron algunas propuestas o ideas basadas en la refinación de las hipótesis que se habían hecho en la primera etapa. En teoría, estas propuestas no estaban consolidadas completamente, aun podían ser modificadas, verificadas y/o descartadas en la tercera etapa del proceso.
- Para el desarrollo estas ideas fue necesario complementar toda la información recolectada en la primera etapa con información más específica del problema. Por ejemplo: el material de fabricación del tornillo, propiedades mecánicas de este material, características de la fractura, procesos de fabricación de elementos de fijación, fuerzas que actúan sobre los tornillos, entre otros.

Al final de la fase de planeación se realizó al docente asesor la socialización de la presentación con toda la información esencial del problema; junto con las ideas o propuestas, luego de esto se procedió a implementar las sugerencias, aportes y correcciones realizadas por el docente.

Tercera etapa: Verificar. La verificación de las ideas o propuestas desarrolladas en la primera y segunda fase, se hizo con una visita a los talleres y patios de tranvías en la estación Miraflores; gracias a esta salida de campo se pudo verificar lo siguiente:

- Que el procedimiento de montaje y desmontaje se realizaba de manera correcta y de acuerdo con las especificaciones consignadas en el manual de la unidad HUTCHINSON C.R.F. Además dicho procedimiento era subcontratado por el Metro de Medellín con la empresa SERVIREENCAUCHE MEDELLIN S.A.S. Los técnicos de tranvías del Metro de Medellín junto con el personal de SERVIREENCAUCHE MEDELLIN S.A.S. hicieron pruebas internas y seguimiento a este proceso chequeando que todas las etapas del mismo se realicen de forma correcta.
- Se pudieron conocer algunos de los lotes de los tornillos que aún estaban disponibles en el almacén de tranvías.
- Se verificó cuál era la función de los demás elementos que hacen parte del kit de tornillo M16 y se indagó sobre la encapsulación de la rosca izquierda.
- Se conoció la unidad HUTCHINSON C.R.F. Se verificó que esta constaba de 3 segmentos que formaban una corona circular; que las unidades tenían los segmentos para la inserción de los tornillos y de las tuercas.
- Se tomó registro fotográfico y de audio durante la visita. Esto con el fin de disponer de información visual y comprobar, fortalecer o en su defecto descartar algunas ideas que se estaban desarrollando de acuerdo con la información que el técnico de tranvías encargado de la visita iba suministrando.

Esta etapa fue una de las más importantes de la metodología; ya que ella permitió no solo verificar o descartar las ideas concebidas en las fases anteriores sino también conocer de primera mano el funcionamiento, las dimensiones, el montaje y la importancia de la unidad HUTCHINSON C.R.F y el papel del kit de tornillo especial M16.

Cuarta etapa: Actuar. La fase final consistió en la elaboración y presentación de las ideas que de acuerdo con lo investigado en las fases 1 y 2, y con la verificación en la visita a los patios y

talleres de tranvías en la estación Miraflores, tendería a solucionar el problema desde el punto de vista de la fabricación del tornillo.

- Se elaboraron dos propuestas que desde el punto de vista del proceso de fabricación del tornillo M16 tiendan a mejorar la vida útil del tornillo. Una de estas propuestas fue la de producir el elemento de fijación por laminación y no por operaciones que involucren arranque de viruta. Considerando que se ha demostrado que la manufactura de tornillos por laminación es una técnica que mejora el acabado superficial de las roscas; además de crear una deformación o alargamiento del grano en relación a la dirección de laminación. La segunda propuesta consistió en verificar o pactar con el proveedor la calidad metalúrgica del acero que se utilizará para la realización del tornillo; teniendo en cuenta que el número y la severidad de las inclusiones no metálicas correspondientes a óxidos y a sulfuros debe ser el más bajo posible. Fue necesario prestar especial detalle a este tópico ya que según los informes de la Universidad de Antioquia y EDAFA S.A.S., las grietas nucleaban en elementos dispersos como las trazas de óxidos y sulfuros de diferente naturaleza.
- Se realizó la presentación de la propuesta con los profesionales de I+D+i, con el fin de mostrarles cual había sido la comprensión del problema y principalmente cuales eran las propuestas que se tenían para solucionarlo.

5.3. Metodología para la realización de un estudio de mercado para la adecuación y reparación de las estaciones solares de la red Metro.

Para atender esta tarea de nuevo se optó por una metodología HPVA con actividades que estuvieran orientadas desde; el hacer, el planear, el verificar y el actuar con el fin de adecuar y rehabilitar la estación solar de Itagüí inicialmente, ya que después por solicitud de la ingeniera Lina este proceso se implementó en las 9 estaciones solares distribuidas en la red Metro.

Fase I: Identificación del problema (Hacer).

Para identificar y conocer de primera mano el problema que se estaba presentando en las estaciones solares de la red Metro fue necesario la realización de una visita de campo a la estación solar de la estación Itagüí con el fin de:

- Observar el estado general de la estructura de la estación solar e identificar cuáles eran los principales inconvenientes, daños o averías que esta tenía.
- Observar el estado de los puertos o salidas USB para la carga de baterías de dispositivos móviles de los usuarios de la red Metro.
- Tomar registro fotográfico de la estructura de la estación solar y observar cómo estaban afectados debido a la corrosión algunas de las partes de la misma.
- Se efectuaron las medidas o levantamiento de los datos dimensionales de los puertos USB de las estaciones solares.

Fase II: Caracterización de empresas para el estudio de mercado (planear).

Se procedió con la búsqueda de algunas empresas del sector metalmecánico que estuvieran en la capacidad de efectuar la reparación y adecuación de las estaciones solares; las empresas que se eligieron como candidatas fueron las siguientes:

- EDAFA S.A.S
- Industrias FAMEC S.A.S
- Mecánica Sistematizada S.A.S
- Aceros Arquitectónicos S.A.S
- Acerinox S.A

Era necesario buscar empresas que tuvieran experiencia y la capacidad de realizar trabajos garantizados de metalmecánica. Se consiguió entonces el correo electrónico de cada compañía para contactarlos a través de ese medio.

Fase III: Establecimiento del primer contacto y visita a la estación solar de Itagiú para conocer el estado de la misma (Verificar).

Como ya se mencionó, el primer contacto con las empresas se estableció vía email. Se redactó un correo electrónico con toda la información de la estación solar, se les presentó la necesidad y se les dejó un registro fotográfico para que pudieran tener una idea de qué se requería con esta reparación. Los requerimientos fueron los siguientes:

1. Reparar y adecuar las estaciones solares para ponerlas de nuevo al servicio de los usuarios de la red Metro.
2. Se debían cambiar las cajas que contenían los puertos USB para cargar los dispositivos móviles.
3. El material de las cajas debía ser resistente a las condiciones ambientales de la ciudad de Medellín. Además debían ser visualmente agradables para conservar la estética de la estructura de la estación solar.

A cada una de las 5 empresas se les envió un email con la información mencionada, luego se verificó su interés en participar en esta labor de acuerdo con su respuesta.

Se programó una visita a la estación solar de Itagiú con cada uno de los asesores comerciales de las empresas que devolvieron el email contestando que estaban interesados en realizar el proceso de reparación y adecuación. Estas empresas fueron: Aceros Arquitectónicos S.A.S, EDAFA S.A.S e Industrias FAMEC S.A.S.

Durante la realización de la visita se pudo verificar con cada uno de los asesores comerciales el estado de la estación solar, el material a utilizar y la puesta en servicio para los usuarios.

Se optó por un servicio donde se proveyera el suministro e instalación. El suministro estaría compuesto de una caja para los puertos USB y una tapa para su protección. El sistema completo incluido los herrajes y elementos de fijación sería fabricado en acero inoxidable 304, además la empresa debía cotizar las salidas o multi-puertos USB.

Fase IV: Solicitud y recepción de las cotizaciones del estudio de mercado para la reparación y adecuación de las estaciones solares (Actuar).

Se le pidió a cada uno que realizaran sus propuestas económicas teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Suministro completo de la tapa y la caja en acero inoxidable 304 incluyendo el puerto USB con las siguientes especificaciones: Mutipuertos HUB con 7 puertos USB 3.0, con luces LED de encendido individual con capacidad de conmutación de 5Gbps.
- Instalación del Mutipuertos, caja y tapa y puesta en servicio de las estaciones solares.

En esta etapa se recibieron las cotizaciones de las empresas y estas fueron remitidas a la profesional de I+D+i encargada del proceso.

5.4. Metodología para la organización de la información de los Tableros de consumo de energía para las subestaciones eléctricas alimentadoras (SEAs) de Zamora, San Diego y Envigado.

La primera fase de este proyecto consistió en evaluar los comportamientos de los consumos de energía para las tres subestaciones eléctricas, para lo cual era necesario tabular los diferentes consumos de energía en Kilovatios/hora (KWh) y su facturación en pesos colombianos (COP). También fue necesario tabular otros datos que se utilizaran en el desarrollo de los tableros de consumo de energía. Esto se hizo para los años 2019 y parte del año 2020, se reportó la información de cada mes y finalmente se entregó un unificado tanto para el año 2019 como para algunos meses del 2020.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como resultado de diseñar e implementar una metodología para articular la labor de los practicantes de Ingeniería de Materiales con los proyectos a cargo del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación se pudo participar en dos procesos de I+D+i ajenos a los de homologación y sustitución. Estos procesos fueron el estudio de mercado para la reparación de las estaciones solares y los tableros de energía. Gracias a la participación en los comités de I+D+i fue posible vincularse con estas dos actividades. Los efectos de estos procesos se explican en los apartados 6.2 y 6.3.

La metodología diseñada e implementada consiste en los siguientes pasos:

1. Participar en los comités del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación:

Los comités del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación son el espacio en el cual los profesionales se reúnen con el gerente del I+D+i para socializar el estado de los diferentes procesos y proyectos que tienen a cargo. En este encuentro el practicante de Ingeniería de Materiales tiene la oportunidad conocer como es el avance, el estado y que posibles necesidades se están presentado en los diferentes proyectos. Además puede interactuar con otros profesionales diferentes a sus tutores. Con la participación en los comités el practicante puede ganar visibilidad ante los profesionales de I+D+i, en muchas ocasiones ellos solicitaran de su apoyo para un proceso, proyecto o actividad que estén ejecutando. También este espacio es útil porque el practicante de forma libre puede identificar un proyecto o proceso en cual desee participar.

2. Vincularse con los procesos o proyectos de I+D+i ajenos a homologación y sustitución:

Como ya se mencionó, existen dos escenarios que permiten que el practicante se vincule con uno de los procesos o proyectos del Departamento: (1) que uno de los profesionales solicite su apoyo o (2) que el practicante identifique un proyecto o proceso en el que quiera participar. En cualquiera de los dos casos es necesario que el practicante se vincule completamente con el proceso o proyecto. Para lo cual el aprendiz deberá: solicitar información al profesional encargado, realizar responsablemente las tareas que se le asignen, aceptar las invitaciones a reuniones con profesionales de otros departamentos de

la empresa, interactuar con el personal operativo de la empresa, tomar datos y registro fotográfico en las visitas de campo y participar en encuentros con proveedores y usuarios del sistema Metro.

- 3. Socializar las ideas:** Cuando se participa en uno de los proyectos o procesos de I+D+i siempre es necesario socializar las ideas. Muchas veces una idea puede ser una buena semilla para darle solución a un problema o para abordarlo desde otra óptica que no había sido considerada. Es por esto que no se debe tener temor a expresar las ideas que estén bien fundamentadas y que sean el resultado de un análisis estructurado de la información del proceso o proyecto en el que el practicante se vinculó. En ocasiones es necesario que el aprendiz exponga los resultados a los que llegó, los datos que recogió o las propuestas que elaboró, con sus compañeros de trabajo o con el personal de otras áreas e incluso con los usuarios del sistema.

6.1. Resultados para la proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación tiendan a mejorar la vida útil del tornillo M16 del sistema anti-hundimiento de los órganos de rodamiento de los vehículos tranviarios

A continuación se recopilan los resultados obtenidos por la Universidad de Antioquia (2017) y por EDAFA S.A.S (2020). Basado en los resultados de ambos informes se estableció un análisis comparativo para determinar cuáles eran las similitudes y diferencias entre ellos.

Los ensayos que se reportan en los informes son los siguientes:

- Determinación de la composición química (Universidad de Antioquia y EDAFA S.A.S.)
- Ensayos de dureza Rockwell C (Universidad de Antioquia y EDAFA S.A.S.)
- Metalografía y análisis de la microestructura (Universidad de Antioquia y EDAFA S.A.S.)
- Inspección visual y análisis de la superficie de fractura (Universidad de Antioquia y EDAFA S.A.S.)
- Análisis SEM y EDS (Universidad de Antioquia)

6.2.1. Determinación de la composición química

Para la determinación de la composición química del tornillo M16 ambas instituciones realizaron ensayos de espectrometría de emisión óptica. La Universidad de Antioquia utilizó un espectrómetro de emisión óptica Bruker Magellan Q8, EDAFA S.A.S. por su parte realizó este mismo ensayo en un equipo Oxford Foundry Master. Los resultados de ambas instituciones se presentan a continuación

Tabla 6. Tabla comparativa con los resultados de composición química del tornillo M16 obtenidos por la Universidad de Antioquia y EDAFA S.A.S. (% en peso).

Institución	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
Universidad de Antioquia	0.394	0.220	0.743	0.017	0.022	1.055	0.159
EDAFA S.A.S.	0.381	0.227	0.882	0.010	0.010	0.853	0.162

Ambos informes coinciden en que de acuerdo con los porcentajes en peso de cada elemento aleante (C, Si, Mn, P, S, Cr y Mo), el material de fabricación de los tornillos corresponde a un acero de la serie AISI/SAE 4140.

6.2.2. Ensayos de dureza Rockwell

En ambos informes se reporta que se realizaron ensayos de dureza Rockwell C (HRC). Para la realización de estas pruebas se utilizaron patrones de calibración de 27 HRC y 62 HRC. Los resultados de ambas instituciones son los siguientes:

Tabla 7. Resultados de los ensayos de dureza Rockwell C (HRC) para el tornillo M16 (Universidad de Antioquia y EDAFA S.A.S).

Institución	Valor reportado de dureza Rockwell C (HRC)
Universidad de Antioquia (2017)	34.8 ± 0.28
EDAFA S.A.S. (2020)	32.0 ± 0.50

La dureza se encuentra entre el rango especificado para la clase métrica 10.9: 32 HRC (min) a 39 HRC (máximo).

Metalografía y análisis de la microestructura

Ambas instituciones realizaron un estudio de metalografía con el fin de dilucidar las características microestructurales del acero 4140. Los resultados de las metalografías revelaron tres características importantes:

- La microestructura del acero AISI/SAE 4140 del tornillo M16 está compuesta principalmente de martensita revenida con algunas trazas de bainita.
- Las metalografías sin ataque químico revelan la presencia de inclusiones no metálicas; según el informe de EDAFA S.A.S. dichas inclusiones corresponden principalmente a óxidos de la serie fina y con un grado de severidad medio. Por su parte la Universidad de Antioquia revela que las inclusiones no metálicas son principalmente óxidos y sulfuros de la serie gruesa con un grado de severidad medio (véase la figura 18).
- Según EDAFA S.A.S. la microestructura de martensita indica que el tornillo fue sometido a un proceso de tratamiento térmico de templado en aceite y revenido; estos procesos son adecuados para el material del tornillo.
- Según la Universidad de Antioquia la microestructura está constituida por martensita revenida; dicha microestructura es característica de la serie AISI/SAE 4140 en estado templado y revenido. Además, se identificó la presencia de bandas de deformación típicas de aceros deformados en caliente (véase la figura 17).

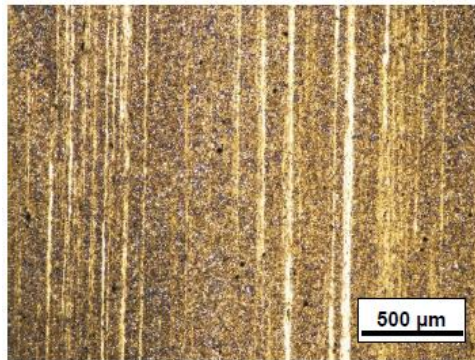


Figura 17. Microestructura del acero AISI/SAE 4140, la microestructura está compuesta principalmente de martensita revenida, se pueden apreciar las bandas de deformación que son características de los aceros deformados en caliente [4].

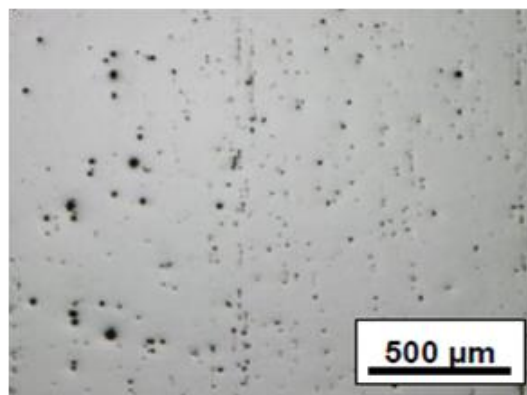


Figura 18. Microestructura del acero AISI/SAE 4140 sin ataque químico, se pueden apreciar (como puntos negros) las diferentes inclusiones no metálicas, dichas inclusiones están constituidas principalmente por óxidos y sulfuros [4].

6.2.3. Inspección visual y análisis de la superficie de fractura

Ambas instituciones realizaron una inspección visual del área de la fractura para determinar las principales características de la misma.

Según se recopila en el informe de EDFA S.A.S. en la superficie de la fractura se presentan principalmente las marcas de playa (véase la figura 19). Este tipo de morfología es característica

de un daño dependiente del tiempo, así mismo se puede observar que el inicio de la fractura se presenta en el borde del filete (véase la figura 20).

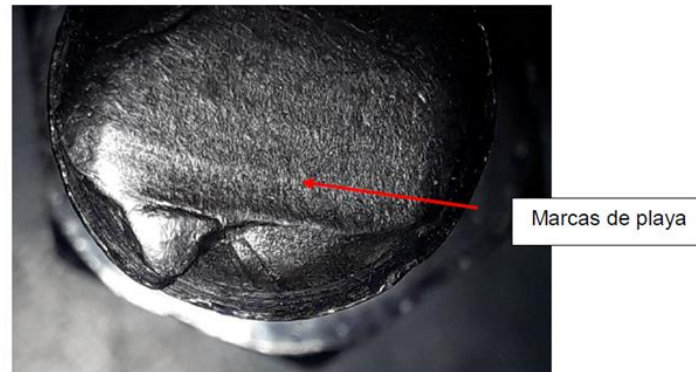


Figura 19. Inspección visual de la superficie de fractura del tornillo M16, se observa que se presentan una morfología típica de marcas de playa [26].

Las marcas de playa en las superficies de fractura parten de un origen común y además indican un proceso de deterioro que principalmente está asociado a la fatiga mecánica.

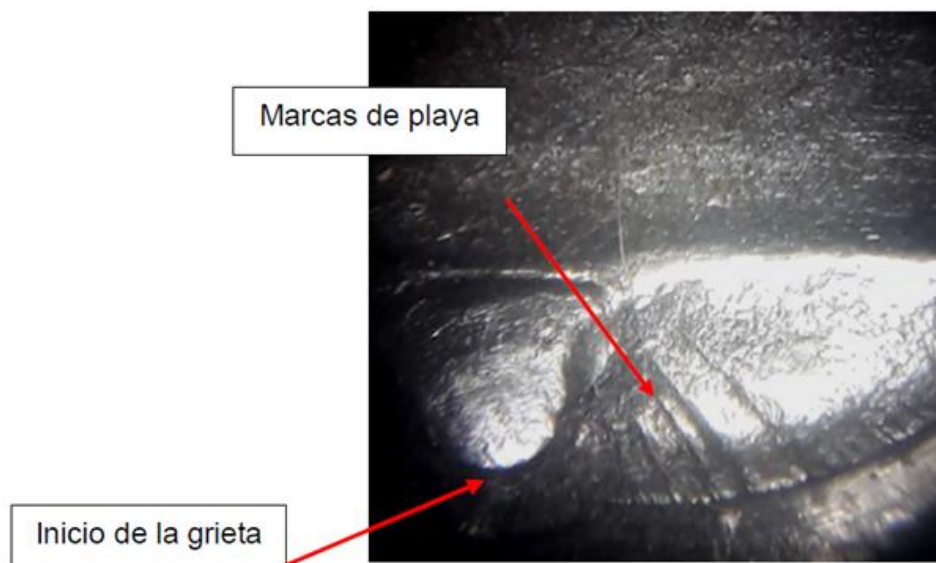


Figura 20. Inspección visual de la superficie de fractura del tornillo M16, se observa que la grieta se inicia en el filete de la rosca, se observan también marcas de playa al inicio de la grieta [26].

Según EDAFA S.A.S. las marcas de playa son típicas de una falla mecánica por fatiga de carga alta y bajos ciclos.

En la inspección visual realizada no se observan signos de desgarre o desprendimiento asociados a una falla súbita, tampoco se observan signos de corrosión.

Las causas de la falla según EDAFA S.A.S se atribuyen posiblemente a dos factores:

- A un efecto entalla que se pudo haber generado por un esfuerzo instantáneo durante el apriete de una tuerca.
- A un exceso de torque.

En cuanto a las recomendaciones EDAFA S.A.S. asegura que se debe verificar que no se está sobrepasando el límite de torque recomendado por el fabricante en el procedimiento de montaje y desmontaje de la unidad HUTCHINSON C.R.F 385/65-22,5 x 11,75. También EDAFA S.A.S. afirma que se debe verificar que las condiciones de servicio del tornillo sean las adecuadas [26].

La Universidad de Antioquia también realizó una inspección visual de la superficie de fractura y encontró que:

- La falla se inicia en la superficie del filete. En este nuclea la grieta en una de las inclusiones no metálicas correspondientes a sulfuros. Dicha grieta se propaga al interior del material; se observan marcas de trinquete (véase la figura 21).
- En la superficie de la falla se identificaron marcas de playa y líneas radiales.

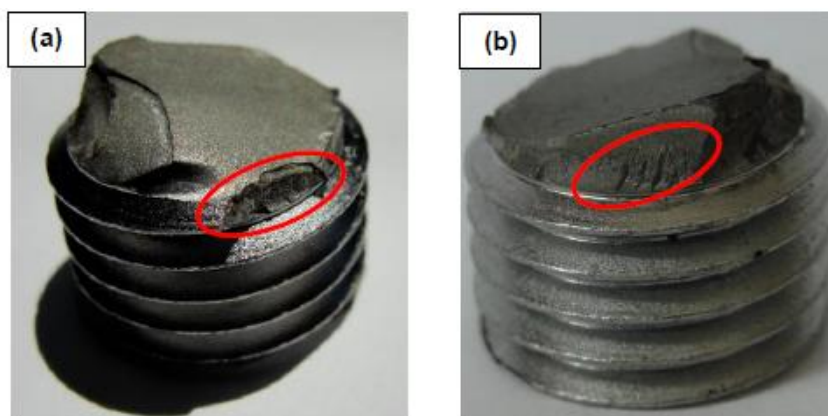


Figura 21. Superficie de fractura donde se observa que falla del tornillo se inicia en el borde del filete, en ambas fotografías (a) y (b) son apreciables las marcas de trinquete, la grieta se propaga desde el filete (exterior) al interior del material [4].

Según el informe de análisis de falla realizado por la Universidad de Antioquia las inclusiones no metálicas actúan como concentradores de esfuerzos en el material y pueden afectar su desempeño cuando éste es sometido a cargas de naturaleza estática o dinámica.

Para tener una mejor comprensión acerca de la severidad y la clasificación de las inclusiones no metálicas es necesario remitirse a la norma ASTM E45. Esta norma establece que las inclusiones no metálicas se clasifican en 4 tipos: A-Sulfuros, B-Alúmina, C-Silicatos y D-Óxidos globulares. En cuanto a la severidad dicha norma establece que está directamente relacionada con la cantidad y la longitud de las inclusiones y que mientras más alta sea la severidad más bajas serán las propiedades mecánicas del material.

En cuanto a la morfología de la superficie de fractura, la presencia de marcas de playa es un claro indicador de que el mecanismo de falla fue la fatiga. Según se recoge en el informe de análisis de falla las causas de la misma son posiblemente atribuibles a:

- Una precarga insuficiente (en los tornillos y demás elementos de sujeción la precarga es dependiente del torque aplicado durante el proceso de montaje y de la fricción entre el macho y la hembra).
- La alta cantidad de inclusiones no metálicas presentes en el material.

Referente a las recomendaciones en el informe realizado por la Universidad de Antioquia se sugiere (siempre y cuando sea posible) revisar la calidad metalúrgica de los tornillos y acordar este aspecto con el fabricante. Se recomienda también seguir de manera estricta cada uno de los pasos del procedimiento de montaje y desmontaje de la unidad HUTCHINSON C.R.F., verificando que no se contamine la rosca con algún material extraño y que los límites de torque son los especificados en el manual.

6.2.4. Análisis SEM y EDS

La Universidad de Antioquia realizó diferentes microscopías electrónicas de barrido y encontró lo siguiente:

- En las imágenes de microscopía electrónica de barrido SEM es posible la observación de ciertas estrías de fatiga las cuales están asociadas a uno de los puntos en los cuales se inicia la falla.
- Se observa también la presencia de microhoyuelos.
- Se puede apreciar que la coalescencia de los microhoyuelos (lo que indica que la fractura fue dúctil).
- Se evidencia la presencia de inclusiones no metálicas.

Las similitudes y diferencias encontradas en ambos informes fueron las siguientes:

Tabla 7. Comparación de resultados de los informes de la Universidad de Antioquia y EDAFA S.A.S.

Universidad de Antioquia (2017)	EDAFA S.A.S (2020)
✓ Los ensayos de composición química, dureza y análisis de la microestructura evidenciaron que el material utilizado para la fabricación del tornillo M16	✓ Al igual que la Universidad de Antioquia, los ensayos de caracterización realizados por EDAFA S.A.S dieron cuenta de que el

<p>fue un acero templado y revenido de la serie AISI/SAE 4140.</p>	<p>material del tornillo es un acero AISI/SAE 4140 con un proceso de templado y revenido.</p>
<p>✓ Según el estudio metalográfico realizado por la Universidad de Antioquia estima que el acero en cual fue fabricado el tornillo tiene la presencia de inclusiones no metálicas correspondientes a sulfuros y a óxidos globulares. La Universidad de Antioquia también afirma que la severidad de estas inclusiones va en detrimento de las propiedades mecánicas del acero y por eso recomiendan pactar con el proveedor la calidad metalúrgica del material.</p>	<p>✓ Las metalografías realizadas por EDAFA S.A.S también indican la presencia de elementos no metálicos principalmente de óxidos globulares, no se menciona la presencia de sulfuros, silicatos o alúmina. La empresa EDAFA S.A.S. no menciona lo de pactar y/o revisar la calidad metalúrgica del material.</p>
<p>✓ El inicio de la fractura se presenta en el borde del filete.</p>	<p>✓ La fractura se inicia en el borde del filete.</p>
<p>✓ La morfología de la fractura indica la presencia de marcas de playa en la superficie de fractura y marcas de trinquete en el borde del filete.</p>	<p>✓ La morfología de la fractura presenta solo marcas de playa.</p>
<p>✓ La fractura es dúctil y se atribuye a fatiga mecánica.</p>	<p>✓ El tipo de fractura es dúctil y está asociada a la fatiga mecánica.</p>
<p>✓ La fractura se debe a una baja precarga. Se recomienda revisar el</p>	<p>✓ La fractura se debe a un exceso de torque. Se recomienda revisar el</p>

<p>manual o procedimiento de montaje y desmontaje.</p>	<p>manual o procedimiento de montaje y desmontaje.</p>
--	--

De acuerdo con la tabla 8 había tres ideas principales en los cuales debía enfocarse la solución:

- Revisar por qué la falla siempre se iniciaba en el filete.
- Verificar que el montaje y desmontaje de la unidad HUTCHISON C.R.F. se estuviera realizando correctamente y respetando los límites de torque especificados dentro del procedimiento.
- Verificar la calidad metalúrgica del material.

Teniendo en consideración dichas ideas se procedió con la elaboración de algunas propuestas que pudieran dar una solución al problema. Las propuestas fueron las siguientes:

1. Puesto que la falla se presenta al borde del filete de la rosca izquierda del tornillo, se tuvo en mente la idea de rediseñar la rosca, es decir, disminuir el ángulo del filete. Sin embargo, esta idea fue descartada puesto que el tornillo homologado tiene que cumplir con las mismas especificaciones y el diseño mecánico del tornillo original. Se procedió entonces a investigar cómo es posible mejorar el acabado superficial de la parte roscada del tornillo. Esto puede hacerse a través del proceso de conformación; el método de fabricación ideal para este fin es la laminación en lugar del torneado, la laminación consiste en colocar una barra o perfil entre dos rodillos estriados, el proceso se realiza en frío y tiene algunas ventajas que lo hacen óptimo en comparación con los procesos que involucran desprendimiento del material o arranque de viruta.
2. Durante la visita a los patios y talleres de la estación Miraflores fue posible verificar que el montaje y el desmontaje de la unidad HUTCHINSON C.R.F. se realiza correctamente y se siguen todos los pasos estipulados en el manual. Este servicio es subcontratado por el Metro de Medellín con SERVIREENCAUCHE MEDELLIN

S.A.S. El Metro y la mencionada empresa realizaron pruebas de campo para constatar que no se excedían los límites de torque recomendados. Además, fue posible observar que el manejo de los tornillos era el adecuado, dichos elementos no eran contaminados con material lubricante.

3. Se determinó que todas las empresas involucradas en este proceso de homologación y sustitución trabajaban con acero BOHLER importado. Considerando que el acero usado debe ser importado a nuestro país, es muy difícil hacer un control de calidad metalúrgica directamente con el productor, por lo tanto se debe confiar en la calidad del material que se ha utilizado por las empresas.
4. Considerando que el tornillo HUTCHINSON ® tiene un recubrimiento micro-encapsulado en la rosca izquierda y que éste sirve como un sistema de bloqueo químico entre la rosca y el tornillo cuando éste está en servicio, se tuvo en consideración la idea hacer un estudio para determinar si en nuestro país era posible realizar procesos de micro-encapsulación. Sin embargo, los profesionales de I+D+i consideraron que era más adecuado implementar un sistema de bloqueo mecánico (platina guía y tornillo Allen).

6.2. Resultados del estudio de mercado para la reparación y adecuación de las estaciones solares de la red Metro

Como resultado de este proceso de apoyo a los proyectos del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación del Metro de Medellín se obtuvieron tres cotizaciones completas del suministro y la instalación del multipuertos USB (Ver anexos). Las cajas y las tapas en acero inoxidable 304 para la adecuación y puesta punto de las estaciones solares de la red Metro. Este proceso fue continuado por los profesionales del área de I+D+i y entró en estudio para contratación. El practicante participó en la etapa de realización del estudio de mercado.

6.3. Resultados de los tableros de consumo de energía de las subestaciones eléctricas alimentadoras (SEAs) de Zamora, Envigado y San Diego

Como resultado de este proceso se realizaron dos hojas de cálculo donde se discriminaban los diferentes consumos de energía en kWh (energía activa, capacitiva y reactiva) y sus respectivos

valores en pesos colombianos (COP) para las subestaciones eléctricas de Zamora, Envigado y San Diego. Esta tarea fue una pequeña parte de un proyecto desarrollado por algunos profesionales del Departamento de I+D+i junto con los del Departamento de Infraestructura. Al momento de la terminación del contrato de aprendizaje este proyecto aún se encontraba en ejecución. Los diseños de los tableros y la información contenida en los mismos es información exclusiva del Metro de Medellín.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

1. En este proceso de aprendizaje se pudo participar en la proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación mejoren la vida útil del tornillo M16 del sistema anti hundimiento de los vehículos tranviarios. Se pudo establecer que el ciclo HPVA (Hacer-Planear-Verificar-Actuar) es una metodología adecuada para la revisión y análisis de la información de los materiales evaluados en los procesos de homologación y sustitución del Metro de Medellín.
2. En el Metro de Medellín se presentan problemas que afectan la continuidad de la operación de los diferentes sistemas de transporte. Desde la Ingeniería de Materiales se puede contribuir con la mitigación de algunos de ellos. Un claro ejemplo de lo anterior fue la participación del practicante en la proposición de ideas que desde el punto de vista del proceso de fabricación mejoren la vida útil del tornillo M16 del sistema anti hundimiento de los vehículos tranviarios.
3. Se validó que el ciclo HPVA es un procedimiento adecuado y que puede ser fácilmente aplicado por el practicante de Ingeniería de Materiales en proceso de aprendizaje en el Departamento de I+D+i. Esta metodología le permite al aprendiz dividir un proceso o proyecto en 4 etapas diferentes que conducen a la comprensión, generación de ideas, desarrollo y creación de propuestas para la solución de un problema.
4. En este proceso de aprendizaje fue posible diseñar una metodología que consiste en tres pasos sencillos para articular la labor de los practicantes de ingeniería de materiales con los diferentes procesos y proyectos del Departamento de I+D+i. Los pasos mencionados consisten en una mayor integración del practicantes a los comités de área, incorporar el apoyo de los practicantes de Ingeniería de Materiales a otros procesos de ingeniería diferentes a la homologación de componentes, y velar por que se socialicen de manera asertiva las ideas que pueda tener el practicante y resultados que el practicante ha obtenido.

7.2. Recomendaciones

1. Se recomienda que el practicante de Ingeniería de Materiales que llega al Departamento de I+D+i implemente en sus labores herramientas de la gestión administrativa como el ciclo HPVA o la matriz DOFA; considerando que la mayoría de las actividades que desarrollaran en I+D+i se basan en el sistema de gestión integral (SGI) de procesos y proyectos.
2. Se recomienda que el practicante de Ingeniería de Materiales que llega al Departamento de I+D+i no solo participe en los procesos de homologación y sustitución (donde típicamente se requiere el apoyo su apoyo), sino que también participe activamente en las actividades y eventos de innovación; en estos eventos hay grandes oportunidades de conocer sistemas tecnológicos, procesos administrativos y de seguridad industrial y salud ocupacional del Metro de Medellín.
3. Se recomienda que el practicante de Ingeniería de Materiales que desarrollará su proceso de aprendizaje en I+D+i disponga de buenas habilidades sociales, ya que a lo largo de su paso por el Metro de Medellín estará en interacción directa con el personal operativo, los proveedores, contratistas y profesionales de la empresa.

8. REFERENCIAS

- [1] Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada (Metro de Medellín Ltda), «Procedimiento de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) PE007,» Medellín, 2017.
- [2] HUTCHINSON, «Procedimiento de montaje y desmontaje del conjunto neumático C.R.F 385/65 R 22,5 llanta ALCOA 22,5 x 11,75,» Persan, 2015.
- [3] Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada (Metro de Medellín Ltda), Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación, *Plano kit de tornillo M16*, Medellín, 2017.
- [4] Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación de Materiales Poliméricos, «Informe de Análisis de falla del tornillo M16,» Medellín, 2017.
- [5] Escuela Europea de Excelencia, «NUEVA ISO 9001:2015,» Escuela Europea de Excelencia, 28 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.nueva-iso-9001-2015.com/2019/05/ciclo-phva-en-iso-9001/#:~:text=Edward%20Deming%20desarroll%C3%B3%20el%20ciclo,y%20proyectos%20de%20las%20organizaciones>. [Último acceso: 21 Junio 2020].
- [6] ASTM International, *ASTM E45-13. Standart Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*, West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- [7] Metro de Medellín, «Noticias Metro, Usuarios del Metro podrán recargar sus dispositivos electrónicos con energía solar,» Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada (Metro de Medellín Ltda), 20 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.metrodemedellin.gov.co/al-d%C3%ADa/noticias-metro/artmid/6905/articleid/1146/usuarios-del-metro-podr225n-recargar-sus->

- dispositivos-electr243nicos-con-energ237a-solar. [Último acceso: 11 Noviembre 2020].
- [8] Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada (Metro de Medellín Ltda), «Sistema de Gestión Integral SGI. Gestión Ambiental (GA001),» Medellín, 2017.
- [9] Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada (Metro de Medellín Ltda). Gerencia de Planeación Estratégica, «Especificaciones técnicas para la elaboración de la doble vía férrea para un sistema Metro en la vía de enlace y los diseños de arquitectura e ingeniería de las dos estaciones de la línea C del Metro,» Medellín, 2015.
- [10] POVEDA FERRETERÍA INDUSTRIAL, «Para qué sirve un tornillo, Blog de tornillería y anclaje,» POVEDA FERRETERÍA INDUSTRIAL, 14 Agosto 2015. [En línea]. Available: <https://ferreteriapoveda.com/para-que-sirve-un-tornillo/>. [Último acceso: 11 Noviembre 2020].
- [11] MOTOR GIGA, «Diccionario Motor GIGA,» MOTOR GIGA, 2014. [En línea]. Available: <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/tornillo-definicion>. [Último acceso: Noviembre 2020].
- [12] NOUTAC, «Los tornillos y sus partes: Cabeza, cuello y rosca,» NOUTAC, 2018. [En línea]. Available: <https://nou-tac.com/los-tornillos-y-sus-partes-cabeza-cuello-y-rosca/>. [Último acceso: Noviembre 2020].
- [13] NOUTAC, «Clasificación de los tornillos según la forma de su cabeza,» NOUTAC, 2018. [En línea]. Available: <https://nou-tac.com/los-tornillos-y-sus-partes-cabeza-cuello-y-rosca/>. [Último acceso: Noviembre 2020].
- [14] De Máquinas y Herramientas, «¿Cuáles son los distintos tipos de roscas y cómo se clasifica? Una guía para distinguirlas y conocerlas,» De Máquinas y Herramientas, 2016. [En línea]. Available: <http://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-manuales/cuales-son-los-distintos-tipos-de-roscas-y-como-se-clasifican-una-guia-para-distinguirlas-y-conocerlas>. [Último acceso: Noviembre 2020].

- [15] ThyssenKrupp Steel, «Cátalogo comercial acero 4140,» 2015. [En línea]. Available: https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/cl/media/aceros/aceros_de_f_cil_mecanizaci_n/aceros_aleados/sae_4140.pdf. [Último acceso: Diciembre 2020].
- [16] Material Mundial, «SAE AISI Acero 4140 Ficha Técnica: Propiedades, Dureza, Características, Tratamientos Térmicos,» Grados Material Mundial, 2016. [En línea]. Available: <https://www.materialmundial.com/sae-aisi-acero-4140-ficha-tecnica-propiedades//>. [Último acceso: 1 Diciembre 2020].
- [17] Universidad de Valladolid, «Martensita y martensita revenida,» Escuela de Ingenierías Industriales, 2016. [En línea]. Available: https://www.eii.uva.es/metalo/Ayuda/mart_rev.htm#:~:text=Conjunto%20de%20microconstituyentes%20resultantes%20de,y%20del%20tiempo%20de%20revenido. [Último acceso: Diciembre 2020].
- [18] D. H. Herring, «Martensite,» INDUSTRIAL HEATING, 1 Junio 2011. [En línea]. Available: <https://www.industrialheating.com/articles/90008-martensite>. [Último acceso: Diciembre 2020].
- [19] BOLLHOFF, «Materials,» de *The Manual of Fastening Technology*, Bielefeld, BOLLHOFF, 2015, pp. 26-43.
- [20] BOLLHOFF, «Manufacture,» de *The Manual of Fastening Technology*, Bielefeld, BOLLHOFF, 2015, pp. 44-51.
- [21] Tornillos Normalizados DIN, «Tornillo moleteado DIN 653,» [En línea]. Available: <https://tornillos.enlinea.plus/din-653/>. [Último acceso: 2 Diciembre 2020].
- [22] INESCOP INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL CALZADO Y CONEXAS, «Desarrollo y puesta a punto de tecnologías basadas en visión artificial para sistemas industriales de fabricación de microcápsulas,» Valencia, 2016.
- [23] R.-M. A, «Técnicas de microencapsulación: una propuesta para encapsular probióticos,» *ARS Pharmaceutica*, vol. 50, n° 1, pp. 43-50, 2009.

- [24] BOSSARD Proven Productivity, *Protección contra el aflojamiento: Recubrimientos adhesivos*, Zug: BOSSARD, 2018.
- [25] W. D. Callister y R. D. G, *Materials Science and Engineering, An Introduction*, Hoboken: Wiley, 2013.
- [26] Industrias EDAFA S.A.S, «Análisis de falla tornillo especial M16,» La Estrella, 2020.

ANEXOS**Cotización Industrias FAMEC S.A.S****INDUSTRIAS FAMEC S.A.S****811.003.677****Cotización**Número: **A - 00002140**

Medellín, 27 de Agosto de 2020

Señores
Metro de Medellín Ltda
Medellín

Asunto: Cotización

Cordial Saludo,

Muchas gracias por contar con nosotros, de acuerdo a sus requerimientos y a la información suministrada le presentamos nuestra oferta para la fabricación de:

Código	Detalle	Plano	Cant	Valor unitario	Valor total
030122-013	Tapa Largo: 220 mm, Alto: 36 mm, Profundidad: 21 mm		4	\$270.000	\$1.080.000

Total Cotizado: \$1.080.000

Cotización Industrias EDFA S.A.S



811003608-3

fabricación de
Repuestos y herramientas
Para la industria

La Estrella, 20 de Octubre de 2020

OFERTA #
2020-2338

Señores:

MATEO VASQUEZ RESTREPO

Practicante Investigación, Desarrollo e Innovación
Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada
Metro de Medellín Ltda.

Apreciados señores(as):

De acuerdo a su gentil invitación de presentar cotización para la fabricación de los siguientes elementos, presentamos a consideración nuestra oferta para:

Ítem #	Plano #	Descripción	Cant.	V/Unitario	V/Total
1	n. a.	Fabricación: Multipuerto usb para carga solar con herraje en inox. e instalación en sitio Material: INOX. 304 Recubrimiento : Sin - Tratamiento térmico: Sin Se oferta: Material, proceso de mecanizado e instalación en sitio + el suministro de multipuerto usb de carga rápida para 7 conexiones Entregamos pre-diseño para aprobación	36	\$ 519.000	\$ 18'684.000

Estos precios no incluyen IVA.

Visto bueno del asesor interno y asesor externo

Como asesor conozco el informe y avalo el contenido del mismo.



Diego Hernán Giraldo Vásquez

Firma del Asesor interno

C.C. 71.753.897



Diego Alejandro Vélez Jaramillo

Firma del Asesor externo

C.C. 98.646.306

