



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería
Química e Industrias Extractivas

Departamento de Ingeniería en
Metalurgia y Materiales

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE CABLES
COMERCIALES DE MEDIO VOLTAJE
SEMIAISLADOS CON POLIETILENO DE
CADENA ENTRECruzADA**

T E S I S

Que para obtener el título de
Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Presenta:

Oswaldo de Jesús Borges Licona

Directores de tesis:

Dr. Carlos Gómez Yáñez

Dr. Fermín Pascual Espino Cortés

Ciudad de México

Marzo 2022





Folio
T-DEySA-008-22

100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPIICSA
50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"
25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto
Autorización de tema

CDMX, 09 de febrero de 2022

Pasante
Osvaldo De Jesús Borges Licona
PRESENTE

Boleta
2016320917

Programa Académico
I.M.M.

Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza al **Lic. Carlos Gómez Yáñez** y al **Lic. Fermín Pascual Espino Cortés** sean asesores en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

"Análisis del desempeño de cables comerciales de medio voltaje semiaislados con polietileno de cadena entrecruzada"

- Resumen
- Introducción
- Justificación
- Objetivo
- Objetivos particulares
- I. Marco Teórico
- II. Procedimiento experimental
- III. Resultados y análisis de resultados
- Conclusiones
- Bibliografía

De acuerdo al artículo 28 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el trabajo deberá ser concluido en un término no mayor de un año, a partir de esta fecha.

Dr. José Ortiz Landeros
Presidente de la Academia de
Metalurgia Física

Lic. Carlos Gómez Yáñez
Director interno

Lic. Fermín Pascual Espino Cortés
Director externo

Ing. César Rodríguez Guerrero
Jefe del Departamento de Evaluación
y Seguimiento Académico.

M. en C. Isaura García Maldonado
Subdirectora Académica

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.
CRG/mlcp

Edificio 7, 1er piso, Unidad Profesional Adolfo López Mateos,
Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México
Conmutador 01 (55) 57296000 ext. 55104 www.esiqie.mx



2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRELUDIO DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Folio
T-DEySA-008-22

100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPIICSA
50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"
25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto
Autorización de Impresión

CDMX, a 03 de marzo de 2022

Pasante
Oswaldo De Jesús Borges Licona
PRESENTE

Boleta
2016320917

Programa Académico
I.M.M.

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

**"Análisis del desempeño de cables comerciales de medio voltaje semiaislados
con polietileno de cadena entrecruzada"**

encontramos que el citado trabajo escrito de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para **autorizar el examen profesional y proceder a su impresión** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.



Lic. Carlos Gómez Yáñez
Presidente

Atentamente
JURADO



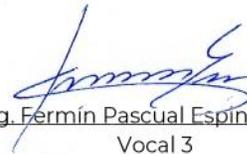
Ing. José Federico Chávez Alcalá
Secretario



Ing. David Hernández Silva
Vocal 1



M. en C. Miguel Ángel Rosa Guzmán
Vocal 2



Ing. Fermín Pascual Espino Cortés
Vocal 3

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.
CRG/mlcp

Folio

T-DEySA-008-22

100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPIICSA
50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"
25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto

Cesión de derechos

CDMX, a 03 de marzo de 2022

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

El que suscribe **Oswaldo De Jesús Borges Licona** estudiante del Programa de: **Ingeniería en Metalurgia y Materiales** con número de Boleta: **2016320917**, manifiestan que es autor intelectual del presente trabajo escrito, por la opción: **Tesis Individual**, bajo la dirección del profesor **Lic. Carlos Gómez Yáñez** y el **Ing. Fermín Pascual Espino Cortés**, ceden lo derechos del trabajo "**Análisis del desempeño de cables comerciales de medio voltaje semiaislados con polietileno de cadena entrecruzada**" al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

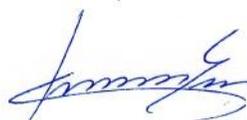
Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico osvaldoborges1407@gmail.com carlos_yanez_2001@yahoo.com y fpespino@gmail.com Sí, el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Atentamente



Carlos Gómez Yáñez

Nombre y Firma
Del Director Interno



Fermín Pascual Espino Cortés

Nombre y Firma
Del Director Externo



Oswaldo de Jesús Borges Licona

Nombre y Firma
Del estudiante

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional y a la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas por haberme permitido formar parte de su comunidad y brindarme conocimiento durante mi estadía.

Al Dr. Carlos Gómez Yáñez y al Dr. Fermín Pascual Espino Cortés por su paciencia y consejo durante la realización de este trabajo. Sin su apoyo no hubiera sido posible.

A mi familia, que sin todo su apoyo y motivación no sería quien soy ahora, este logro es tan suyo como lo es mío.

A todos los maestros de la carrera que dan lo mejor de sí mismos para que siempre podamos aprender algo nuevo.

A todos mis amigos y compañeros por haber hecho de ésta la mejor etapa de mi vida.

A Dany, por ser siempre mi mejor compañía.

Dedicatoria

A mis padres Raymundo y Domitila.

Nunca podré terminar de agradecerles por haberme dado tantas enseñanzas, por nunca dejar de motivarme, por siempre confiar en mí, por siempre estar ahí, dispuestos a todo por sacarnos adelante.

Durante toda mi vida ustedes me han demostrado que con dedicación y esfuerzo nada es imposible.

Todo lo que soy y todo lo que tengo, hoy y siempre, se lo deberé a ustedes.

Índice

Agradecimientos	I
Dedicatoria	II
Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Justificación.....	4
Objetivo.....	4
Objetivos Particulares	5
Capítulo 1	6
1.1 Polietileno	7
1.1.1 Historia del Polietileno.....	7
1.1.2 Estructura del polietileno	7
1.1.3 Cristalinidad en el polietileno.....	8
1.1.4 Clasificación del polietileno.....	9
1.1.5 Propiedades y usos generales del Polietileno	9
1.1.6 Polietileno de cadena cruzada (XLPE).....	11
1.1.7 El proceso de entrecruzamiento	11
1.1.8 Métodos de entrecruzamiento	12
1.1.9 Método Químico	13
1.1.10 Método por radiación	14
1.2 Cables de Media Tensión Semiaislados	15
1.2.1 Las líneas de distribución y los cables semiaislados	15
1.2.2 Características de los cables de potencia.....	16
1.2.3 Componentes de los cables de media tensión.....	16
1.2.4 Fabricación de los cables.....	17
1.3 Normativa de la prueba de plano inclinado.....	18
1.3.1 La prueba de plano inclinado	18
1.3.2 Norma BS EN 50397-1:2006	19
1.3.3 Norma ABNT NBR 10296:2014.....	21
1.4 Fallas comunes de los cables de media tensión semiaislados	22
1.4.1 Erosión superficial o <i>tracking</i>	22
1.4.2 Sistemas con aisladores tipo alfiler	23

1.4.3 Sistemas con espaciadores	23
1.4.4 Defectos de fabricación en el aislante	25
1.4.5 Cavidades	26
1.4.6 Contaminantes	26
1.4.7 Protuberancias	27
1.5 Espectroscopía Raman	28
1.5.1 El efecto Raman	28
Capítulo 2	32
2.1 Preparación de las muestras	33
2.2 Equipo e Instrumentación.....	33
2.2.1 Pruebas en plano inclinado.....	33
2.2.2 Caracterización estructural de las muestras de polietileno.....	38
2.3 Procedimiento Experimental	39
2.3.1 Preparación de la solución contaminante	39
2.3.2 Prueba de plano inclinado en muestras planas	40
2.3.3 Prueba de plano inclinado en muestras de cable	42
Capítulo 3	44
3.1 Muestras planas.....	45
3.1.1 Pruebas de Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)	45
3.1.2 Pruebas de EDS.....	46
3.1.3 Difracción de Rayos X.....	48
3.1.4 Pruebas de Plano Inclinado	52
3.2 Muestras de cable.....	54
3.2.1 Pruebas de Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)	54
3.2.2 Espectroscopia Raman	56
3.2.3 Pruebas de plano inclinado.....	67
Análisis de Resultados	69
Conclusiones	70
Bibliografía	71

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 Unidad molecular del polietileno [7].	7
Figura 1.2 Representación de las fases del polietileno. [6]	8
Figura 1.3 Diferencia estructural entre el LDPE y el LDPE entrecruzado. [11]	12
Figura 1.4 Etapas del entrecruzamiento de polietileno empleando peróxido. [9]	14
Figura 1.5 Extrusor para cables semiaislados. [19]	18
Figura 1.6 Sistema de conductores cubiertos y aisladores tipo alfiler. [1]	23
Figura 1.7 Sistemas de conductores cubiertos con espaciadores. [14]	24
Figura 1.8 Daño observado en la zona de contacto entre el conductor cubierto y el espaciador [2]	25
Figura 1.9 Efecto de los defectos en la tensión de ruptura dieléctrica del XLPE [24]	27
Figura 1.10 Bandas de Rayleigh y Raman Stokes y anti-Stokes [25]	30
Figura 1.11 (a) Variación en la intensidad de las bandas de Raman de acuerdo con la intensidad de la fuente (láser rojo de mayor intensidad). (b) Espectrograma de Raman Típico. [25]	31

Capítulo 2

Figura 2.1 a) Muestra plana sin relleno. b) Muestra plana con relleno.	33
Figura 2.2 Arreglo utilizado para la prueba de plano inclinado con muestras planas y muestras de cables [13]	37
Figura 2.3 Plano inclinado para muestras planas [13]	37
Figura 2.4 Plano inclinado con muestras de cable [13]	38
Figura 2.5 Mediciones de peso de cloruro de amonio y Tritón X-100.	40
Figura 2.6 Prueba de plano inclinado en muestras planas [13]	41
Figura 2.7 Arreglo de plano inclinado para muestras de cable [13]	42
Figura 2.8 Prueba de plano inclinado en muestras de cables [13]	43

Capítulo 3

Figura 3.1 Espectro de muestras planas	45
Figura 3.2 Microanálisis de muestras grises. a) Prueba 1, b) Prueba 2. Las mediciones provienen de zonas amplias.	46
Figura 3.3 Microanálisis de muestras grises, prueba 3. Las mediciones provienen de zonas amplias	47
Figura 3.4 Microanálisis de muestras blancas. a) Prueba 1, b) Prueba 2. Las mediciones provienen de zonas amplias.	47
Figura 3.5 Patrón de difracción de muestra blanca.	48
Figura 3.6 Patrón de difracción de muestra gris.	49
Figura 3.7 Patrón de difracción de una muestra de HDPE. [28]	49
Figura 3.8 Patrón de difracción del cuarzo- α	50
Figura 3.9 Espectro de muestra de cable, fabricante A.	54
Figura 3.10 Espectro de muestra de cable, fabricante B.	54
Figura 3.11 Espectro de muestra de cable, fabricante C	55
Figura 3.12 Espectro de muestras conocidas de a) HDPE y b) LDPE. [28]	55
Figura 3.13 Matriz del aislante, fabricante A	56
Figura 3.14 Espectro Raman de la matriz del aislante, fabricante A	57
Figura 3.15 Aglomerado encontrado dentro del aislante, fabricante A	57

Figura 3.16 Espectro Raman del aglomerado encontrado en el aislante, fabricante A	58
Figura 3.17 Matriz del aislante, fabricante B	58
Figura 3.18 Espectro Raman de la matriz del aislante, fabricante B.....	59
Figura 3.19 Irregularidad encontrada en la matriz, fabricante B.....	59
Figura 3.20 Espectro Raman de la irregularidad encontrada en la matriz, fabricante B	60
Figura 3.21 Matriz del aislante, fabricante C	60
Figura 3.22 Espectro Raman de la matriz del aislante, fabricante C.....	61
Figura 3.23 Partícula incrustada en la matriz del aislante, fabricante C	61
Figura 3.24 Espectro Raman de la partícula incrustada en la matriz, fabricante C.....	62
Figura 3.25 Espectro Raman de muestras conocidas de HDPE y LDPE. [30]	62
Figura 3.26 Espectro Raman de la región C-H de las muestras de polietileno. [30].....	63
Figura 3.27 Espectro Raman de nanotubos de carbono (MWCNTs) en una matriz de PDMS. [31]	64
Figura 3.28 Espectro Raman de grafeno de varias capas (MLG) en una matriz de PDMS. [31].....	65

Índice de tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1 Propiedades de los principales tipos de polietileno. [6,9]	10
Tabla 1.2 Comparación entre el polietileno entrecruzado y el polietileno convencional. [9].....	15
Tabla 1.3 Niveles de tensión de los cables de potencia. [14].....	16
Tabla 1.4 Espesor promedio de aislante-cubierta y tensión de prueba. [16].....	17
Tabla 1.5 Valores de la resistencia y el flujo en función de la tensión de ensayo. [20].....	19

Capítulo 2

Tabla 2.1 Datos de placa del transformador de voltaje monofásico [13].....	34
--	----

Capítulo 3

Tabla 3.1 Resultados de las pruebas de EDS en muestras grises provenientes de zonas amplias..	46
Tabla 3.2 Resultados de las pruebas de EDS en muestras blancas, provenientes de zonas amplias	47
Tabla 3.3 Resultados de la prueba de plano inclinado en muestras planas [13].....	52
Tabla 3.4 Resultados de la prueba de plano inclinado en las muestras de cable [13]	67

Resumen

La Comisión Federal de Electricidad observó una conducta inadecuada ante la caída de rayos, de algunas líneas de media tensión colocadas al sur de la Ciudad de México. Para tratar de determinar la causa de estas conductas, en el presente trabajo se realizaron pruebas de plano inclinado en régimen de CA a muestras de aislante utilizado en cables semiaislados cuyo material de fabricación del aislante es el polietileno de cadena entrecruzada (XLPE). Las pruebas de plano inclinado estuvieron basadas en dos diferentes normas: la británica BS EN 50397-1:2006 y la norma brasileña ABNT NBR 10296:2014. Los procedimientos en ambas normas son similares. La diferencia es que en la norma británica se utilizan muestras de cable y en la norma brasileña se utilizan muestras rectangulares planas. La intención de realizar estas pruebas es comparar el desempeño del material aislante considerando las diferencias existentes entre las muestras de distintos fabricantes.

Adicionalmente, se realizaron las siguientes pruebas de Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR), Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopía de Energía Dispersa (EDS) y de Espectroscopía Raman. Estas pruebas se hicieron buscando conocer la composición química tanto de la matriz como de los rellenos empleados en las muestras planas y los cables y compararlas. En todas las muestras, tanto planas como cables, se encontró que el material de la matriz es únicamente polietileno de cadena entrecruzada. En ambos tipos de muestras (excepto en las muestras planas blancas) se encontró como relleno negro de humo, el cual es un subproducto de la combustión de combustibles minerales, compuesto casi en su mayoría por carbono. Además, en el relleno de los cables se encontraron trazas de elementos como silicio, aluminio, potasio, calcio, sodio y titanio.

En la espectroscopia Raman se encontraron diversas partículas y aglomerados incrustados en la matriz polimérica de los cables de dos fabricantes, lo que sugiere una pobre dispersión del relleno. El espectro obtenido de esas partículas y aglomerados sugiere la presencia de grafito, lo que podría favorecer descargas parciales a través del aislante y ser una de las causas del mal desempeño de los cables en la prueba de plano inclinado.

Abstract

In some medium tension electric lines located at the south of Mexico city, the Comisión Federal de Electricidad observed an inadequate behavior when some lightning hit the insulation of the cable. To determine the cause of such behavior in this work, inclined-plane tests were carried out on crosslinked polyethylene specimens on an AC regime, according to two different standards: the British standard BS EN 50397-1:2006 and the Brazilian standard ABNT NBR 10296:2014. These two were selected for their similarities in the procedure. The difference between these two tests is that the Brazilian standard uses flat slat-like specimens while the British standard uses actual pieces of cable. The main purpose of performing these tests is to compare the performance of the specimens given their clear differences.

Additionally, the following tests were performed on both types of samples: Fourier Transformed Infrared Spectroscopy (FTIR), X-Ray Diffraction (XRD), Energy-Dispersive Scattering (EDS) and Raman Spectroscopy. The goal for these tests was to find the chemical composition of both, the matrix and the filler material used on the specimens. The first thing that came up is that the matrix of all the specimens is the same, crosslinked polyethylene. It was found that all the samples contained carbon black as the filler (except for the flat white samples). Carbon black is a by-product of the combustion of mineral fuels, made up almost entirely by amorphous carbon, and it was found it contains traces of other elements like silicon, aluminum, potassium, calcium, sodium and titanium.

In the Raman Spectroscopy test, several particles and clusters were found embedded in the polymer matrix of two of the cable manufacturers, which suggest that the dispersion of the filler material across the matrix is deficient. The Raman spectrum of the particles and clusters suggest that graphite was present, representing a factor that could easily cause partial discharges throughout the insulation cover and therefore cause the poor performance of the cables in the inclined-plane test.

Introducción

En años recientes, el uso de cables semiaislados en líneas de distribución ha ganado terreno en el país. Una de las razones principales para emplear cables semiaislados es que reducen significativamente los costos de mantenimiento en las líneas ya que el conductor está más protegido contra perturbaciones por parte de la flora y fauna y las condiciones atmosféricas adversas, con lo que a largo plazo resulta una mejor inversión a pesar de tener un mayor costo de instalación comparado con el conductor desnudo tradicional. [1]

Aunque, en general, estos sistemas son más confiables, con su implementación han surgido nuevas problemáticas que requieren nuevas soluciones. Se ha observado que, en presencia de un medio ambiente con altos niveles de contaminación atmosférica, el material de la cubierta de los cables (generalmente polietileno de cadena entrecruzada) sufre un mayor desgaste como resultado de la generación de descargas superficiales, que erosionan gradualmente esta cubierta, al grado de provocar fallas en las líneas de distribución [2].

La generación de estas descargas superficiales en presencia de un medio contaminado se debe a la presencia de un fuerte campo eléctrico y al propio arreglo del sistema [3], por lo que una buena opción para evitar el desgaste que las descargas provocan es enfocarse en mejorar los materiales de construcción de los cables y aditamentos del sistema.

Aunado a esto, en nuestro país, la regulación vigente para las características que deben cumplir los materiales que se emplean en la cubierta de los cables semiaislados es la especificación E0000-29 de la Comisión Federal de Electricidad, que a su vez emplea la norma ASTM-D2303-1997 para probar la resistencia a la erosión de los materiales aislantes. El mayor problema que viene con esto, es que la norma ASTM-D2303 emplea muestras de material aislante con forma plana y rectangular y no muestras reales del cable y, como se observará más adelante en este trabajo, el desempeño de este tipo de muestras puede no representar de manera fidedigna el desempeño real de los cables.

Justificación

Como se mencionó anteriormente, en los últimos años, en nuestro país se ha reemplazado el cable desnudo en las líneas de distribución de energía eléctrica por cables semiaislados. Este tipo de cables, al tener un recubrimiento aislante, presentan una mayor resistencia a las diversas condiciones climáticas y ambientales a las que son expuestos durante su vida útil.

Sin embargo, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que es el organismo que se encarga en mayor parte de la generación y distribución de energía eléctrica en México, ha reportado fallas en este tipo de conductores debido a la generación de descargas parciales en la superficie del aislante de los cables, lo cual es un comportamiento anormal, ya que estos cables deben estar diseñados para soportar este tipo de descargas sin comprometer su funcionamiento. Por lo anterior, este trabajo se da a la tarea de buscar las posibles causas de este comportamiento anormal observado en el campo, mediante la realización de una serie de pruebas de caracterización y de plano inclinado.

La prueba de plano inclinado es una prueba estándar para observar y medir la conducta de los aisladores de alto y medio voltaje ante la presencia de descargas parciales. Dicha prueba se hace típicamente en muestras planas del material aislante, sin embargo, para los cables este material se manufactura en cilindros que recubrirán el conductor metálico, por lo que sería más adecuado que la prueba de plano inclinado se modificara para cilindros tal y como aplican durante la operación cotidiana.

Objetivo

- ❖ Analizar del desempeño eléctrico de aislantes de polietileno de cadena entrecruzada para cables de medio voltaje en régimen de CA.

Objetivos Particulares

- ❖ Realizar la prueba de plano inclinado en el polietileno de cadena entrecruzada usado en el aislamiento, y comparar las conductas de erosión térmica en régimen de CA.
- ❖ Análisis estructural y microestructural de muestras del polietileno del aislamiento.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1 Polietileno

1.1.1 Historia del Polietileno

La historia del polietileno comienza a finales del siglo XIX, en el año 1898 cuando Von Pechmann notó la formación de un precipitado mientras trabajaba con una forma de metano en éter. En 1900, Eugen Bamberger y Friedrich Tschirner identificaron este precipitado como polimetileno, un compuesto muy cercano al polietileno, cuya fórmula química es $(CH_2)_n$ [4].

Trabajando con etileno a altas presiones Eric Fawcett y Reginald Gibson, científicos ingleses, obtuvieron por primera vez polietileno de forma sólida. En 1953, Karl Ziegler y Erhard Holzkamp desarrollaron un proceso de baja presión. La reacción de un catalizador hecho a base de alquil aluminio y tetracloruro de titanio dio lugar a un polietileno de mayor densidad y punto de fusión debido a la mayor regularidad en su estructura. Este polietileno fue bautizado como polietileno de alta densidad [5,6].

1.1.2 Estructura del polietileno

Por definición, el polietileno es un polímero sintético termoplástico que se obtiene por la polimerización del etileno. Es un material que tiene una parte cristalina y una parte amorfa, es traslúcido y de color blanquizco [4].

La molécula de polietileno, en su unidad estructural (monómero), está formada por dos átomos de carbono y cuatro átomos de hidrógeno unidos mediante enlaces covalentes como se muestra en la figura 1.1.

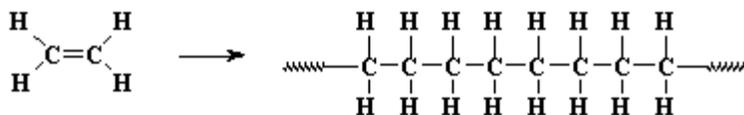


Figura 1.1 Unidad molecular del polietileno [7].

La cadena polimérica se puede extender de 500,000 a 1,000,000 de unidades. Entre más larga sea la cadena central, mayor será el número de átomos y por lo tanto mayor peso molecular. El peso molecular y su distribución, así como el grado de entrelazamiento determinan en buena medida las propiedades del polímero [5].

1.1.3 Cristalinidad en el polietileno

Los polímeros semicristalinos son aquellos que están compuestos de dos o más fases sólidas, donde en al menos una de esas fases, segmentos de las cadenas poliméricas están organizadas en un arreglo tridimensional regular y en una o más fases las cadenas están desordenadas. Las fases no cristalinas forman una matriz continua en la cual las regiones cristalinas están incrustadas. Es imposible preparar una muestra sólida de polietileno que no sea semicristalina. Las propiedades de todos los productos de polietileno están dadas por la proporción relativa de las fases cristalinas y no cristalinas.

El polietileno en su estado sólido consiste de tres fases ordenadas como se muestra en la figura 1.2. Los cristales submicroscópicos están rodeados de una fase no cristalina, formando así, una tercera capa parcialmente ordenada adyacente a las otras fases existentes.

La fase ordenada del polietileno consiste de cristales donde las cadenas moleculares están empaquetadas en arreglos regulares. El espesor de los cristales en el polietileno de alta densidad varía comúnmente entre 80-200 Å. El polietileno de baja densidad tiene cristales más delgados. Las regiones no cristalinas varían aproximadamente entre 50-300 Å [6].

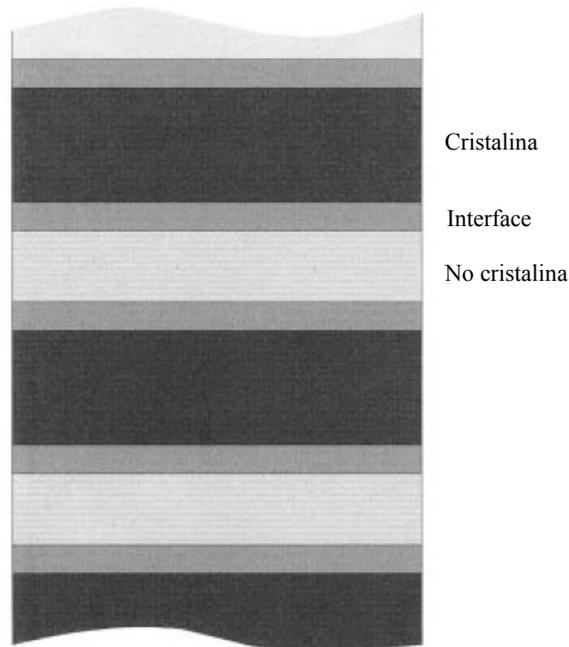


Figura 1.2 Representación de las fases del polietileno. [6]

1.1.4 Clasificación del polietileno

El polietileno se clasifica principalmente en función de su densidad, teniendo dos grandes grupos:

- ❖ Polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés).
- ❖ Polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés).

La principal diferencia entre los dos grupos radica en el grado y regularidad de ramificaciones. El HDPE tiene muy pocas ramificaciones, mientras que el LDPE se caracteriza por tener un grado mayor de ramificaciones irregulares en intervalos irregulares [8].

Dentro de esos grupos existen otras clases de polietileno de uso regular, por ejemplo, el polietileno de cadena cruzada (XLPE o PEX), siendo este el material empleado para la fabricación de la cubierta de los cables. [5,8]

1.1.5 Propiedades y usos generales del Polietileno

Como se ha mencionado arriba en el texto, las propiedades del polietileno dependen en buena medida del tamaño y acomodo de sus cadenas moleculares, las cuales, en el caso del polietileno son altamente manipulables a través del procesamiento de la resina líquida y la solidificación; por esta razón un mismo tipo de polímero puede presentar una amplia gama de propiedades físicas, químicas, mecánicas y eléctricas.

A pesar de ello, de forma general, se puede decir que el polietileno es un polímero flexible y tenaz, químicamente inerte y que cuenta con una elevada resistividad eléctrica. Aunque, por el contrario, no presenta buena estabilidad dimensional bajo cargas constantes y su temperatura de ablandamiento es relativamente baja. [6]

A modo de comparación y para ilustrar la variación de propiedades que puede presentar el polietileno, en la tabla 1.1 se enlistan los valores numéricos de algunas propiedades de los principales tipos de polietileno.

Tabla 1.1. Propiedades de los principales tipos de polietileno. [6,9]

Propiedad	HDPE	LDPE	XLPE*
Densidad (g/cm ³)	0.94-0.97	0.91-0.94	0.96
Grado de cristalinidad (% de la densidad)	62-82	42-62	-
Módulo de Young (psi)	155,000-225,000	35,000-48,000	
Resistencia a la cedencia (psi)	2,600-4,500	1,300-2,800	4,293
Elongación (%)	10-1,500	10-650	22
Impacto Izod con muesca (ft-lb/in)	0.4-4.0	Sin ruptura	-
Temperatura de fusión (°C)	125-132	98-115	-
Temperatura de ablandamiento (°C@66 psi)	80-90	40-44	-

*Propiedades del HDPE Marlex® irradiado a 100 kGy (Radiación Beta)

Cabe mencionar que los datos presentados en la tabla 1 son solo una referencia, puesto que un procesamiento especial al polietileno puede provocar que el material caiga fuera de los rangos presentados.

La principal fortaleza del polietileno es su combinación de propiedades físicas y su bajo precio. El polietileno es un material balanceado, que no destaca por sobremanera en ningún aspecto, pero que tampoco flaquea gravemente en ningún otro, haciéndolo un material idóneo para aplicaciones en productos que no estarán sometidos a una cantidad considerable de desgaste físico. De acuerdo con lo anteriormente mencionado no es de sorprender que el polietileno sea el polímero de mayor producción en el mundo; Hacia 2011, los polietilenos de alta y baja densidad conformaban el 29% de la producción mundial de plásticos, según datos de *PlasticsEurope*, la asociación de fabricantes de plástico de Europa. [6,12]

El HDPE es principalmente empleado en la producción de envases para alimentos y varios productos químicos, como leche y detergente. Es también usado para producir ductos de transporte de agua, desagüe y gas natural. El LDPE, por su lado es empleado mayoritariamente en la producción de películas de diversos espesores que son usadas para

fabricar bolsas de basura y de empaque en general. Este tipo de polietileno es también usado en la producción de piezas inyectadas en molde, como, por ejemplo, juguetes. [6]

En cuanto al polietileno de cadena cruzada, encuentra sus principales usos en cubiertas para cables eléctricos y de telefonía, transportes de líquidos a altas y bajas temperaturas y prótesis para el cuerpo humano. Es de resaltar que este tipo de polietileno puede procesarse de distintas maneras, cada una de ellas con ventajas y desventajas. No hay ningún método que sea eficiente para todas las aplicaciones existentes, tanto es así que un polímero obtenido por un método puede ser excelente en un campo y también muy inadecuado en otro. [10]

1.1.6 Polietileno de cadena cruzada (XLPE)

El avance tecnológico viene siempre acompañado de grandes desafíos, los productos y procesos son cada vez más sofisticados y con ello se requieren mejores materiales. Dado que la creación de nuevos materiales es un proceso largo y complejo, se ha trabajado en mejorar los ya existentes; el XLPE es un ejemplo de este caso. Desde su creación por Engel en la década de 1960 [10], este material ha demostrado mejorar las características de los polietilenos convencionales, permitiendo su uso en aplicaciones de mayor exigencia.

El XLPE, a diferencia del HDPE o del LDPE, es un polímero termofijo. Este tipo de polímeros, por la naturaleza de su estructura, no pueden reblandecerse una vez que han curado.

1.1.7 El proceso de entrecruzamiento

Se denomina entrecruzamiento al proceso en el cual los átomos de dos o más cadenas poliméricas se enlazan, formando una estructura de red tridimensional. El enlace puede darse directamente entre los átomos de carbono de las cadenas o mediante un puente químico. [11] En la figura 1.3 se ilustra la diferencia entre la estructura entrecruzada y una estructura convencional de LDPE.

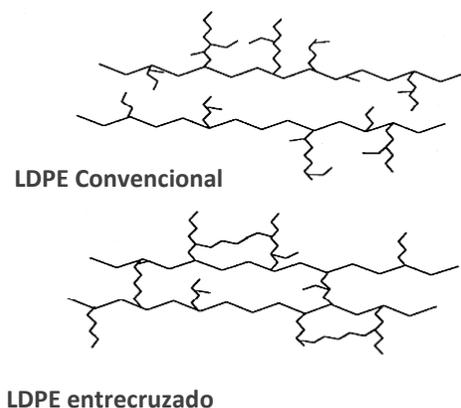


Figura 1.3. Diferencia estructural entre el LDPE y el LDPE entrecruzado. [11]

El proceso de entrecruzamiento tiene lugar en la fase amorfa de la estructura del polímero. Este proceso provoca cambios en las propiedades del polímero, principalmente se observan modificaciones en la dureza, rigidez, elongación, la resistencia a propagación de grietas, la resistencia a la termofluencia y la resistencia al agrietamiento asistido por el ambiente (ESCR por sus siglas en inglés). La densidad del polímero se ve ligeramente alterada con el proceso de entrecruzamiento a causa de la degradación de algunas cadenas poliméricas durante el mismo [11]; en cuanto a la resistencia a la cedencia y la cristalinidad, existe discrepancia entre si esta propiedad se ve o no afectada por el proceso. Esto puede deberse a que, aunque las propiedades del polímero entrecruzado dependerán de la resina original, la técnica empleada para lograr el resultado final puede tener un gran impacto en el grado de variación que se presente. Siendo la técnica de irradiación la que tiene mayor incidencia en los cambios que sufre el polímero. [9,11]

1.1.8 Métodos de entrecruzamiento

Existen dos métodos generales para lograr el entrecruzamiento del polietileno:

- ❖ Químico
- ❖ Radiación

Dentro de estos métodos existen diversos procesos, el más común dentro de la categoría de métodos químicos es el uso de peróxidos; por su parte, la principal diferencia en los procesos de radiación es la fuente que se emplea, esta puede ser particulada o no particulada; algunos ejemplos de fuentes de radiación ionizante empleadas son: partículas α y β , electrones de alta energía, microondas, rayos X, entre otros. [11]

1.1.9 Método Químico

Como se mencionó anteriormente, el proceso más ampliamente usado es empleando peróxido, por lo que será el proceso descrito.

Dependiendo la fuente, se puede encontrar que el proceso se divide en tres o cuatro etapas. Estas etapas se describen a continuación:

❖ **Descomposición térmica del peróxido**

El peróxido es calentado a una temperatura alrededor de 115°C para romper sus enlaces y producir radicales libres. Los radicales libres del peróxido reaccionan con las cadenas poliméricas, extrayendo un átomo de hidrógeno, produciendo así radicales poliméricos.

❖ **Propagación**

Los radicales poliméricos producidos reaccionan con oxígeno atmosférico y producen más radicales peróxidos que a su vez producen más radicales poliméricos.

❖ **Entrecruzamiento**

Cuando dos radicales poliméricos se encuentran, se da el entrecruzamiento.

❖ **Terminación**

La reacción se detiene cuando se agotan los radicales libres, gracias a la acción de aditivos e impurezas. [10,11]

Es importante mencionar que se requiere la adición de estabilizadores para evitar la degradación excesiva del polímero. En la figura 1.4 se muestra una representación gráfica del proceso.

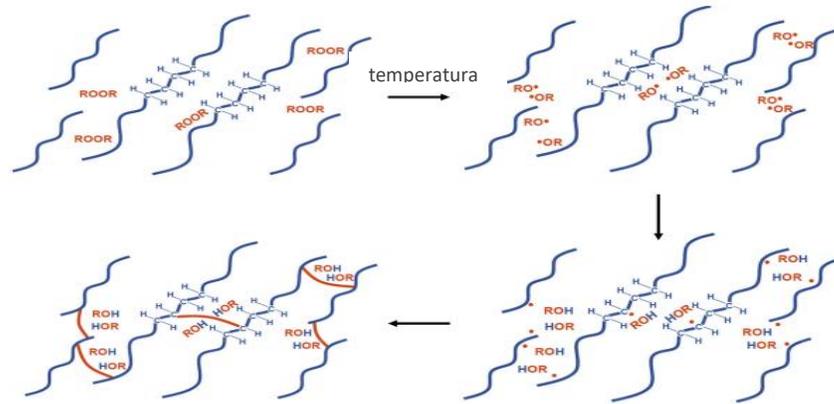


Figura 1.4. Etapas del entrecruzamiento de polietileno empleando peróxido. [9]

1.1.10 Método por radiación

El principio de este método es el mismo que el método químico: la generación de radicales libres que provoquen el entrecruzamiento. En este caso, para generar los radicales poliméricos se emplea radiación ionizante que rompe el enlace carbono-hidrógeno de la cadena polimérica.

Durante este proceso pueden ocurrir dos cosas: el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas a partir de la formación de enlaces carbono-carbono y la generación de moléculas de hidrógeno o la ruptura de las cadenas poliméricas y la pérdida de hidrógeno, este último siendo un resultado indeseable.

Como ocurre siempre, ambos métodos presentan ventajas y desventajas que pueden resultar determinantes cuando se elige cual emplear. Para la fabricación de cables, por ejemplo, el método químico resulta mucho más conveniente puesto que los aditivos necesarios se pueden agregar junto con el polietileno a la entrada de un extrusor y el proceso de entrecruzamiento ocurrirá mientras se recubre el conductor; no obstante, para otras aplicaciones, como la fabricación de prótesis médicas, el método por radiación es el indicado puesto que irradiar el polímero también resulta una excelente manera de esterilizarlo antes de ser utilizado.

Por último, para observar más claramente las diferencias entre el polietileno convencional y el XLPE, en la tabla 1.2 se muestra una comparación de sus propiedades.

Tabla 1.2. Comparación entre el polietileno entrecruzado y el polietileno convencional. [9]

Propiedad	XLPE	PE	Propiedad	XLPE	PE
Memoria de forma	+	-	Resistencia a la tensión	+	-
Propiedades a altas y bajas temperaturas	+	-	Propagación de grietas	+	-
Resistencia a la termofluencia	+	-	Erogación	-	+
Resistencia al impacto	+	-	Reducción de volumen	+	-
Inocuidad química	+	-	Recuperación de forma	+	-
Resistencia al agrietamiento	+	-	Resistencia a la abrasión	+	-

1.2 Cables de Media Tensión Semiaislados

1.2.1 Las líneas de distribución y los cables semiaislados

Las líneas de distribución forman parte de un sistema eléctrico de potencia (SEP), siendo estos los encargados de producir y transmitir la energía eléctrica que llega a todo el país. Las partes de un SEP son: generación, transmisión y distribución. La etapa de distribución puede hacerse de dos maneras: líneas subterráneas o aéreas. En el caso de las líneas subterráneas, el aislamiento de los cables debe ser completo puesto que estarán siempre en contacto con la tierra. Para las líneas aéreas, al no estar tan cerca de seres vivos y objetos varios, representan menor riesgo, por lo que se emplean principalmente cables desnudos, aunque la instalación de cables semiaislados, los cuales cuentan con un único recubrimiento de XLPE, ha ido en aumento en los últimos años. En México se utilizan líneas aéreas de distribución con niveles de tensión de 23 kV y 33 kV, aunque este último nivel de tensión está quedando en desuso.

Anteriormente, las líneas de distribución empleaban conductores desnudos para transmitir la electricidad; utilizar los conductores de esa manera ocasionaba constantes interrupciones en el servicio a causa de problemas ocasionados por diversos factores (principalmente ambientales) como fuertes vientos, tormentas eléctricas o inclusive las copas de los árboles.

El cambio a las líneas con cables semiaislados trajo consigo beneficios como la posibilidad de construir líneas más compactas, reducción en la dificultad del mantenimiento y la reducción de la posibilidad de accidentes por contacto. [13]

1.2.2 Características de los cables de potencia

Un cable de potencia se define como un dispositivo eléctrico utilizado para transmitir energía eléctrica de un lugar a otro a una corriente y tensión definidas [14].

Este tipo de cables se clasifica generalmente de acuerdo a la tensión a la que operan. En la tabla 1.3 se muestran los rangos de tensión a la que trabaja cada tipo de cable.

Tabla 1.3. Niveles de tensión de los cables de potencia. [14]

Nivel	Rango
Baja tensión	300 [V] – 1.0 [kV]
Media tensión	1.1 [kV] – 35 [kV]
Alta tensión	69 [kV] – 161 [kV]
Extra Alta tensión	230 [kV] – 500 [kV]

1.2.3 Componentes de los cables de media tensión

Para este trabajo, se discutirán las características de los cables de media tensión, es decir, que trabajen en un rango de 1.1 a 35 kV. Este tipo de cables se componen de 3 elementos principales, que son:

❖ **El conductor**

El conductor consiste una serie de alambres apilados; estos alambres son trefilados, utilizados en ese estado o con un tratamiento de recocido. El conductor puede ser aluminio (AAC), aluminio reforzado con acero (ACSR) o cobre (Cu). En el caso de ACSR, se emplean alambres de acero galvanizado que se colocan en el centro. [12]

❖ **La pantalla semiconductor**

Sobre el conductor se coloca una capa de semiconductor termofijo extruido de color negro. Por normativa, las propiedades térmicas de esta capa deben igualar o superar a las del aislante [15,16]. Cabe resaltar que esta capa no es un material semiconductor como tal, sino una mezcla de un aislante y un material conductor, comúnmente polietileno mezclado con carbón en una proporción aproximada de 60% y 40% respectivamente. [17]

❖ **Aislante**

El aislante es de igual forma una capa extruida hecha de polietileno de cadena entrecruzada (XLPE) de color negro. El espesor de esta capa según la especificación E0000-29 de la CFE no debe ser menor al 90% del valor indicado en la tabla 1.4. [16]

Tabla 1.4. Espesor promedio de aislante-cubierta y tensión de prueba. [16]

Sección transversal del conductor (mm ²)	Tensión entre fases (kV)	Espesor promedio (mm)	Tensión de prueba	
			(kV) rcm	(kV) c.d.
De 53. 48 a 67.43	15	2.5	15	36
Mayor a 67.43	15	3	18	43
De 53.48 y mayores	25	4	24	58
De 53. 48 y mayores	38	5.3	33	79

1.2.4 Fabricación de los cables

Para la fabricación de este tipo de cables se emplea un extrusor de doble entrada con dado tipo cruceta (crosshead extruder). Este dispositivo consiste en un extrusor con dos tolvas, en cada tolva ingresa un tipo de materia prima, es decir, en una entra el polímero empleado para la pantalla semiconductor (HDPE) y en la otra el polímero para la cubierta (XLPE). En el dado (que se encuentra colocado de manera perpendicular al extrusor) entra el conductor y es jalado al interior del mismo, continuamente por un capstan. [18]

Dentro del dado la temperatura es la suficiente para fundir el polímero y hacer que fluya alrededor del conductor. Es importante que la unión entre el conductor y el polímero sea uniforme y libre de contaminantes. A la salida del dado, el polímero cura y queda

fuertemente adherido al conductor. Si se requieren más capas de aislamiento, varios extrusores pueden trabajar en línea. [19]

Cabe resaltar que el proceso de entrecruzamiento del polietileno para la cubierta se hace de forma simultánea a la extrusión, agregando los aditivos necesarios a la entrada del extrusor. En la figura 1.5 se muestra una representación gráfica del proceso.

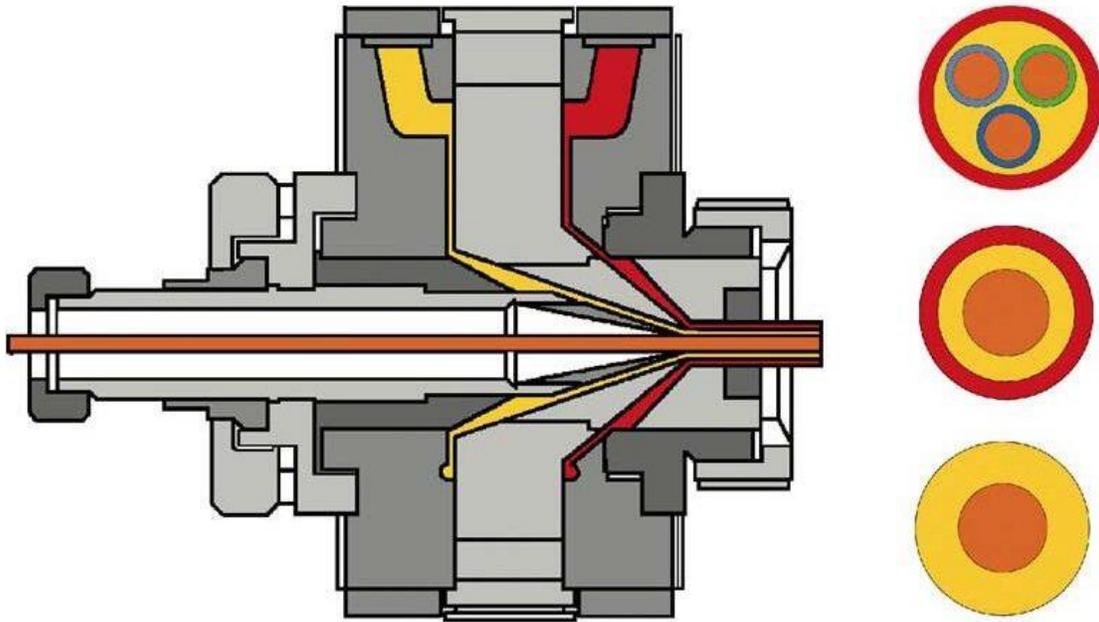


Figura 1.5. Extrusor para cables semiaislados. [19]

1.3 Normativa de la prueba de plano inclinado

1.3.1 La prueba de plano inclinado

Esta prueba consiste en someter una muestra a descargas superficiales provocadas por el fenómeno de banda seca o dry band con la intención de evaluar la resistencia del material aislante a la erosión y a la carbonización, también conocida como tracking.

El fenómeno de banda seca que se aprovecha en la prueba consiste en descargas superficiales provocadas por la combinación de un alto potencial eléctrico y condiciones atmosféricas, como la humedad, los rayos UV y la contaminación [13]. En presencia de tales condiciones, se genera una descarga eléctrica cuando dos zonas húmedas del aislante se encuentran cercanas entre sí. Dichas descargas eléctricas erosionan la superficie del aislante debido al incremento excesivo de temperatura en la zona de la descarga; los cables

semiaislados están diseñados para soportar estas descargas, sin embargo, cuando suceden de manera recurrente o la calidad del aislante es deficiente, este puede llegar a fallar prematuramente.

Esta prueba se puede realizar con dos tipos de muestras: muestras planas del polímero aislante o a secciones del cable que será puesto en servicio. Para ambas pruebas existen normas que dictan los procedimientos y parámetros que deben seguirse para obtener resultados confiables; estas son, para el caso de las muestras planas la norma brasileña ABNT NBR 10296:2014 y para las secciones de cable la norma británica BS EN 50397-1:2006. Ambas normas son muy parecidas entre sí, por lo que se describirá en profundidad solamente la norma británica BS EN 50397-1:2006 y posteriormente se indicarán las diferencias existentes en la norma brasileña.

1.3.2 Norma BS EN 50397-1:2006

- ❖ **Dimensiones de la muestra**
Los especímenes deben tener al menos 200 mm de longitud.
- ❖ **Preparación de la muestra**
La superficie de la muestra debe ser desgastada con lija número 600 y agua desionizada o destilada hasta que toda la superficie sea uniforme. Si la abrasión no ha sido el método utilizado deberá mencionarse en el informe de prueba.
- ❖ **Fuente de energía**
Fuente de tensión de salida estabilizada a $\pm 5\%$ y corriente nominal no inferior a 0.1 A.
- ❖ **Resistor**
Un resistor de 200 Watts con tolerancia de $\pm 10\%$ en el lado de alta tensión conectado en serie entre la fuente de alimentación y cada una de las muestras.

En la tabla 1.5 se muestran los valores del flujo del contaminante y el resistor, en función de la tensión a la que se realiza la prueba de plano inclinado.

Tabla 1.5. Valores de la resistencia y el flujo en función de la tensión de ensayo. [20]

Tensión de ensayo [kV]	Flujo de contaminante [mL/min]	Resistor en serie [k Ω]
3.5	0.30	22

- ❖ **Redes de sobrecorriente**
Un relé de sobrecorriente que opere cuando circulen en el circuito de alta tensión 60 mA durante 2 segundos.
- ❖ **Electrodos**
Los electrodos y accesorios de montaje como tornillos deben ser de acero inoxidable. Se deben limpiar antes de cada prueba y sustituirlos cuando ser necesario.
- ❖ **Contaminante**
A menos que se especifique lo contrario, se deberá usar 0.1 ± 0.002 % en masa de NH_4Cl (cloruro de amonio) de calidad analítica y 0.02 ± 0.002 % en masa de iso-octil fenoxipolietoxietanol (un agente humectante no iónico conocido comercialmente como Tritón X-100) en agua destilada o desionizada. El contaminante debe tener no más de cuatro semanas de haber sido preparado y su resistividad será comprobada antes de cada serie de pruebas. Este contaminante tendrá una resistividad de $3.95 \pm 0.05 \Omega\text{m}$ a $23 \pm 1^\circ\text{C}$.
Es importante mencionar que el contaminante que se emplea en este tipo de pruebas sirve para simular las condiciones atmosféricas de humedad y contaminación necesarias para que ocurra el fenómeno de banda seca.
- ❖ **Papel filtro**
Se deberán colocar ocho capas de papel filtro como un depósito del contaminante entre la muestra y el electrodo superior.
- ❖ **Flujo del contaminante**
Antes de la conexión del potencial eléctrico, el flujo deberá ser uniforme entre el electrodo superior y el inferior.
- ❖ **Tasa de flujo del contaminante**
La aplicación del flujo del contaminante será de acuerdo con la tabla 1.5.
- ❖ **Dispositivo para medición del tiempo**
Un reloj con precisión de aproximadamente ± 1 min/h.
- ❖ **Medidor de profundidad**
De ser usado el medidor de profundidad debe tener una precisión de ± 0.01 mm. La punta del medidor debe ser hemisférica con un radio de 0.25 mm.

- ❖ **Condiciones ambientales**
A menos que se especifique lo contrario, la prueba deberá realizarse a 23 ± 2 °C.
- ❖ **Montaje**
La muestra debe ser montada con la superficie plana hacia abajo, inclinada en un ángulo de 45° con respecto a la horizontal y con una separación entre electrodos de 50 ± 0.5 mm.
- ❖ **Ajuste del flujo contaminante**
La velocidad del flujo se ajustará de acuerdo con lo indicado en la tabla 1.5. Una vez que el papel filtro se ha humedecido se deberá esperar 10 minutos a que el goteo se estabilice. Cuando el goteo sea uniforme desde el electrodo superior al electrodo inferior se podrá aplicar potencial a la muestra.
- ❖ **Aplicación de la tensión**
Cuando el flujo del contaminante es constante sobre la superficie de la muestra se conecta el potencial eléctrico al electrodo superior y se inicia el conteo del tiempo.
- ❖ **Criterio de aceptación**
La muestra pasará la prueba si la corriente en el lado de alta tensión no excede los 60 mA para ninguna de las muestras. [13,20]

1.3.3 Norma ABNT NBR 10296:2014

La diferencia principal entre ambas normas, como se mencionó previamente, es que esta norma se enfoca en muestras planas y no en muestras de cable. Los parámetros que se modifican se describen a continuación:

- ❖ **Aplicación de la tensión**
Método 1 - Tensión constante de carbonización.
Cuando el flujo de contaminante se ha uniformizado se debe conectar la tensión de acuerdo con el nivel deseado (2.5, 3.5 o 4.5 kV), en ese momento se debe iniciar el conteo del tiempo. La tensión debe ser mantenida por 6 horas.
Si es necesario repetir la prueba a una tensión más baja o más alta, se deberá utilizar un nuevo grupo de muestras.

La tensión constante de carbonización es la tensión más elevada soportada por las 5 muestras, sin ocurrencia de fallas durante 6 horas.

Método 2 - Tensión de carbonización en escalones.

Seleccionar un inicio de tensión múltiplo de 250 V tal que la falla ocurra antes del tercer nivel o incremento. Cuando el flujo del fluido sea constante y uniforme a la velocidad especificada se conecta la tensión por 1 hora y se incrementa 250 volts cada hora subsecuentemente hasta que la muestra falle.

La velocidad del flujo del contaminante irá de acuerdo con la tensión a la que se está realizando la prueba.

La tensión de carbonización es la tensión más elevada soportada por las 5 muestras sin ocurrencia de falla por 6 horas.

❖ **Criterio de evaluación**

Criterio A

El término de la prueba ocurre cuando la corriente en el circuito de alta tensión excede los 60 mA.

Criterio B

El término de la prueba ocurre cuando la erosión en la muestra tiene una longitud mayor a 25 mm a partir del electrodo inferior. [13,21]

1.4 Fallas comunes de los cables de media tensión semiaislados

Las causas que provocan el deterioro y la falla de los cables de media tensión se pueden dividir en tres grupos: erosión superficial, los defectos de fabricación que empeoran su desempeño y el envejecimiento de los cables. A continuación, se describe cada uno de ellos.

1.4.1 Erosión superficial o *tracking*

Antes de explicar el fenómeno conocido como *tracking*, es necesario profundizar en el arreglo de las líneas de distribución aéreas con conductores semiaislados. Existen tres tipos de arreglos para estas líneas de distribución: sistemas con aisladores tipo alfiler, sistemas con espaciadores y sistemas con cables trenzados [3]. Dado que los dos primeros

son los sistemas que se emplean mayormente en México, solo se discutirán los problemas que se presentan en éstos.

1.4.2 Sistemas con aisladores tipo alfiler

Este sistema de distribución se compone de tres aisladores tipo alfiler en donde descansan los cables de fase. Para soportar el arreglo se emplean postes hechos casi en su totalidad de hormigón. Este arreglo se observa en la figura 1.6. Entre las principales ventajas que se pueden encontrar para este sistema es un menor uso de derecho de vía y la reducción de riesgos de corte en el suministro por accidentes con la flora y la fauna. [1]



Figura 1.6. Sistema de conductores cubiertos y aisladores tipo alfiler. [1]

1.4.3 Sistemas con espaciadores

Como su nombre lo indica, este sistema emplea espaciadores hechos de polietileno. Estos espaciadores se colocan con aproximadamente 10 metros de distancia entre cada uno, y cumplen con tres funciones principales: mantener separadas las fases, servir como guía y soporte y ofrecer protección contra descargas, a través de la implementación de un hilo de guarda. Estos espaciadores se observan en la figura 1.7. La implementación de este tipo de sistema ofrece aún más protección contra factores ambientales, la flora y la fauna comparados con el sistema de aisladores, ya que pueden soportar incluso la caída de ramas

sin que se presenten interrupciones al servicio, sin mencionar que representan un menor riesgo al ambiente. [1]



Figura 1.7. Sistemas de conductores cubiertos con espaciadores. [3]

Aunque estos sistemas tienen una gran cantidad de ventajas cuando se les compara con las líneas que emplean conductores desnudos no están exentos de problemas. Se han observado distintos casos en los que estos sistemas presentan erosión superficial y tracking poco tiempo después de haber sido colocados. Este desgaste superficial se presenta en las zonas donde los cables están en contacto con los aisladores o con los espaciadores, según sea el caso. Este problema puede provocar interrupciones en la línea de distribución y en casos muy severos puede llegar incluso a provocar la falla total de los conductores o los espaciadores, presentando un peligro latente para las personas y el ambiente.[3]

Es bien sabido que el tracking se produce en esas zonas debido a la concentración del campo eléctrico en el área, generando descargas superficiales. De igual forma, se sabe que la concentración es causada principalmente por el ángulo de contacto entre el cable y los soportes, el cual es de cero grados (efecto cuña). Existen formas de mitigar este problema, una de ellas es utilizando materiales que sean *compatibles dieléctricamente*; por compatibilidad dieléctrica se entiende que el valor de permitividad de los materiales que estarán en contacto sea lo más cercano posible. Otra forma de mitigar este efecto es el uso de capas resistentes al tracking sobre el aislante de los cables. [2,3]

Aunque se conocen estos métodos para mitigar el efecto cuña, no es posible evitarlo, ya que incluso en el caso de los sistemas de espaciadores, en donde el material tanto del soporte, como del cable es el mismo se observa el incremento del campo eléctrico en las zonas de contacto. Aunado a esto, se ha observado que, en zonas con altos niveles de contaminación atmosférica, se da otro fenómeno que afecta más a este tipo de sistemas. La relativamente baja hidrofobicidad del polietileno permite la formación de una capa de contaminantes, los cuales pueden ser conductores. Bajo estas condiciones el fenómeno de banda seca o *dry band arcing* toma lugar. En la figura 1.8 se muestra un sistema de espaciadores que ha sufrido de erosión causada por estos mecanismos. [2]

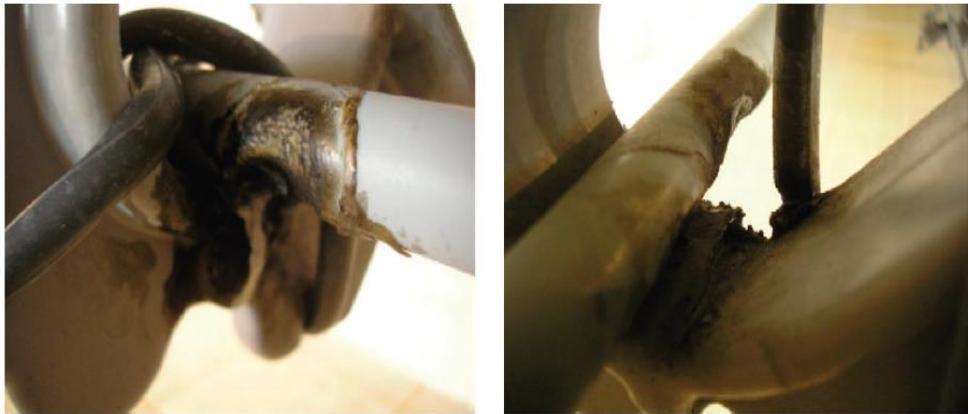


Figura 1.8. Daño observado en la zona de contacto entre el conductor cubierto y el espaciador. [2]

1.4.4 Defectos de fabricación en el aislante

Para entender de mejor manera el efecto de los defectos en el funcionamiento de los cables es necesario definir los conceptos de *rigidez dieléctrica* o *tensión de ruptura dieléctrica*. Aunque ambos conceptos hacen alusión al mismo fenómeno, no son exactamente iguales; la rigidez dieléctrica se refiere al máximo voltaje que soporta un aislante antes de permitir el flujo de carga, mientras que la tensión de ruptura dieléctrica se refiere a la máxima tensión soportada por un aislante antes de perforarse. En ambos casos las unidades de medida son MV/m o kV/mm. En el caso del XLPE se habla propiamente de una tensión de ruptura dieléctrica puesto que el material se calcina al alcanzar un valor de aproximadamente 21 MV/m [22,23].

Los defectos de fabricación que se pueden encontrar en el material aislante son principalmente tres: cavidades y protuberancias en el aislante y la presencia de contaminantes.

1.4.5 Cavidades

Las cavidades o discontinuidades en el aislante de los cables pueden ser provocados durante en proceso de entrecruzamiento si existen variaciones de presión durante el curado del material.

Según un estudio realizado por Katsuta y colaboradores [24], la presencia de cavidades disminuye la tensión de ruptura de los cables de manera considerable. Este efecto se agrava a medida que el tamaño de los huecos en el aislante aumenta. Durante la prueba observaron la ocurrencia de descargas parciales que aceleraron el proceso de ruptura dieléctrica del cable. Este comportamiento se observa en la figura 1.9a.

En cuanto a los efectos a largo plazo, se observó mediante un estudio de Weibull que este defecto tiende a deteriorar los cables gradualmente, siendo la causa las PD que se generan en las cavidades hasta llegar a la ruptura dieléctrica del aislante [24].

1.4.6 Contaminantes

Los contaminantes son todas aquellas partículas ajenas a los componentes de los cables que son introducidas durante el proceso. Estas se introducen principalmente durante el manejo de la resina y los rellenos, aunque también pueden resultar durante el proceso de entrecruzamiento. Pueden ser de distinta naturaleza y tamaño, generalmente partículas de polvo o arena.

En la figura 1.9b se observa que la tensión de ruptura empieza a disminuir después de un cierto tamaño de partícula contaminante, lo cual implica según Katsuta, la generación de cargas espaciales alrededor de las partículas contaminantes.

Para este caso, en el largo plazo, el estudio de Weibull arrojó que este tipo de defecto presenta un mecanismo de “falla repentina”, que es el mismo mecanismo que presentan los cables sin defectos. Lo anterior lleva a pensar que este tipo de defectos, afectará principalmente al tiempo de vida útil del cable y no tanto a su desempeño durante ese tiempo [24].

1.4.7 Protuberancias

Las protuberancias se generan en la pantalla semiconductora y pueden ser causadas principalmente por imperfecciones en el conductor o por la presencia de aire al momento de la extrusión del cable.

Este defecto demostró tener el mismo comportamiento que los anteriores en el corto plazo: causar la reducción de la tensión de ruptura del XLPE, siendo más marcado su efecto a medida que aumentaba la longitud de la protuberancia. Este comportamiento se observa solo en régimen de CA (figura 1.9c).

En el largo plazo, este defecto demostró tener un comportamiento de “falla repentina”, al igual que con la presencia de contaminantes en el aislante [24].

Cabe mencionar que en el estudio realizado por Katsuta [24], se comparó el comportamiento de los cables tanto en régimen de corriente alterna (AC) como en régimen de voltaje de impulso (Imp), en donde se observa que los defectos tienen un comportamiento diferente.

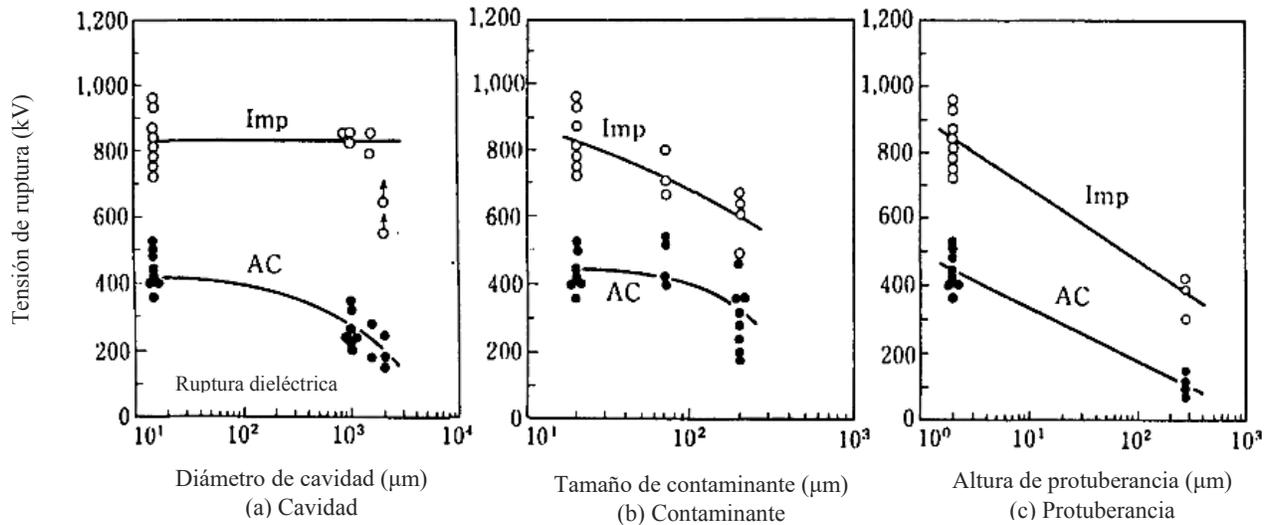


Figura 1.9. Efecto de los defectos en la tensión de ruptura dieléctrica del XLPE [24].

Los primeros cables aislados con XLPE contenían un mayor número de defectos, que, combinados con las condiciones de trabajo a las que son sometidos, depreciaban mucho su

vida útil; con el tiempo la tecnología para la manufactura de los cables ha mejorado, con diversas implementaciones como el proceso de entrecruzamiento en seco o la extrusión simultánea descrita anteriormente. Dichas mejoras permiten construir cables con menor volumen de defectos y contaminantes. [24]

La presencia de estos defectos puede tener un efecto más significativo en líneas de distribución subterráneas que en líneas aéreas, puesto que en estas últimas existen más factores que pueden causar la erosión y falla prematuras de los cables.

1.5 Espectroscopía Raman

1.5.1 El efecto Raman

El efecto Raman fue descubierto en 1928 por el físico hindú Chandrasekhara Venkata Raman, trabajo que le valió el premio Nobel de física en el año de 1930. A grandes rasgos, este efecto consiste en la dispersión inelástica de la luz que permite el estudio de las rotaciones y vibraciones moleculares [25].

La espectroscopia Raman se basa en hacer incidir un haz de luz monocromática de frecuencia ν_0 sobre la muestra de material que se desea estudiar y examinar la luz dispersada por la muestra. La mayor parte de la luz que incide sobre la muestra, saldrá de ésta con la misma frecuencia, a esa porción de luz se le conoce como dispersión de Rayleigh. La pequeña fracción de luz que sale de la muestra a una frecuencia distinta a la que entró (tanto a menor como mayor frecuencia) es la que constituye el espectro de Raman, y es la que proporciona información sobre las características químicas de la muestra y de su estado físico. Dichas frecuencias se conocen como $+\nu_r$ y $-\nu_r$ [25].

Cuando se presenta una de frecuencia que resulta menor a la del haz original se dice que se presenta una dispersión de Raman Stokes; en el caso contrario, cuando la frecuencia del haz que sale de la muestra es mayor al original, se presenta una dispersión de Raman anti-Stokes.

La variación en frecuencia que se observa en la dispersión Raman es equivalente a variaciones de energía. Cada enlace químico que conforma una molécula está sometido a constantes oscilaciones vibracionales y rotacionales; dichas oscilaciones suceden a una frecuencia determinada que está en función de la masa de las partículas que conforman la

molécula y de la naturaleza del enlace químico presente. Cada movimiento rotacional y vibracional de las moléculas tiene un valor de energía determinado.

Cuando se hace incidir un haz de luz cuyos fotones sobrepasan por mucho la diferencia de energía entre dos niveles de energía de la molécula en cuestión, se dice que sucede lo siguiente: aunque la mayoría de los fotones del haz atraviesan la muestra, una muy pequeña fracción de ellos serán dispersados debido a que el fotón lleva a la molécula transitoriamente a un nivel de energía superior no permitido, el cual abandona rápidamente para pasar a un nivel de energía permitido, emitiendo un así un fotón. Cada material tiene un conjunto de valores ν_r característicos.

El espectro Raman muestra estos fenómenos representando la intensidad óptica dispersada en función del número de onda normalizado al que se produce. El número de onda normalizado $\tilde{\nu}$ es una magnitud proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la longitud de onda y sus unidades son cm^{-1} . Estas unidades se deducen de las siguientes ecuaciones [25,26]:

Primero se tiene la frecuencia (ν):

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Donde c es la velocidad de la luz (3×10^{10} cm/s) y λ es la longitud de onda expresada en centímetros.

El número de onda será:

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} \quad (2)$$

De este modo se tiene:

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} \text{ (cm}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

El espectro Raman está conformado entonces por una banda principal o banda de Rayleigh situada al centro y por las bandas de Raman Stokes y Raman anti-Stokes situadas simétricamente a los lados de la banda principal (figura 1.10).

Es de mencionarse que la distribución de las bandas de Raman Stokes es independiente de la frecuencia de la banda principal, por lo cual este suele usarse como abscisa en la gráfica del espectro Raman, de tal forma que este eje representa la diferencia entre la frecuencia de Raman y la frecuencia del láser que se emplea como haz monocromático (figura 1.11a).

De igual manera es importante mencionar que a temperatura ambiente, las moléculas normalmente se encuentran en su estado vibracional y rotacional de menor energía, por lo que las dispersiones Raman Stokes son mucho más comunes que las dispersiones Raman anti-Stokes, razón por la cual, un espectrograma de Raman típico solo incluirá las dispersiones Raman Stokes. (figura 1.11b).

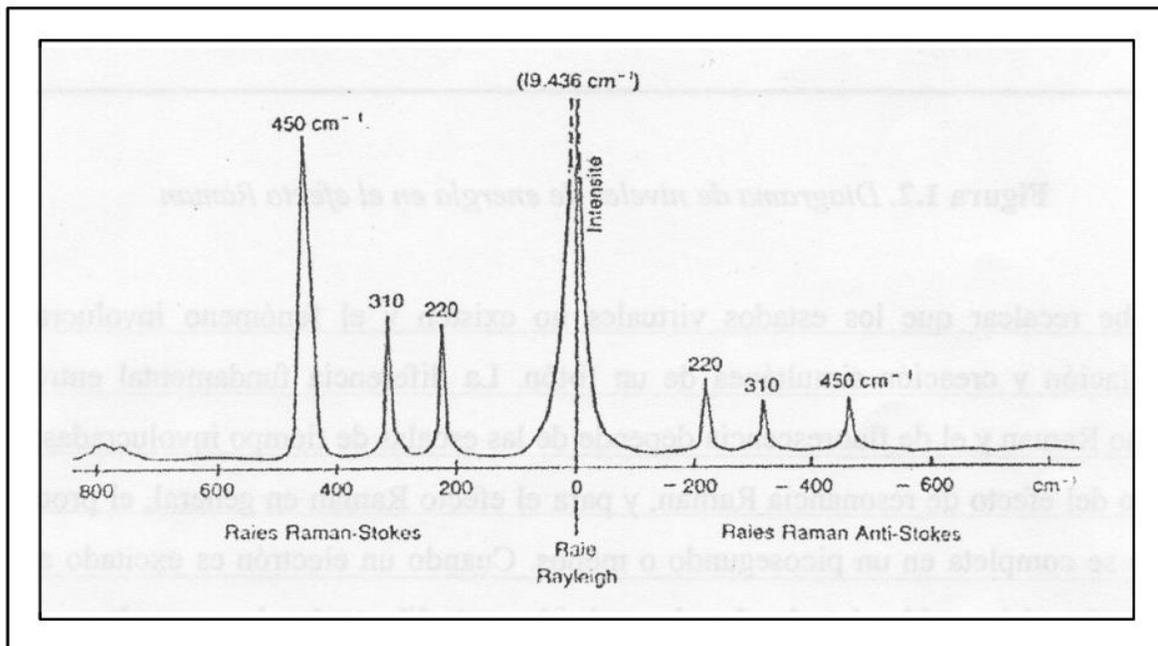
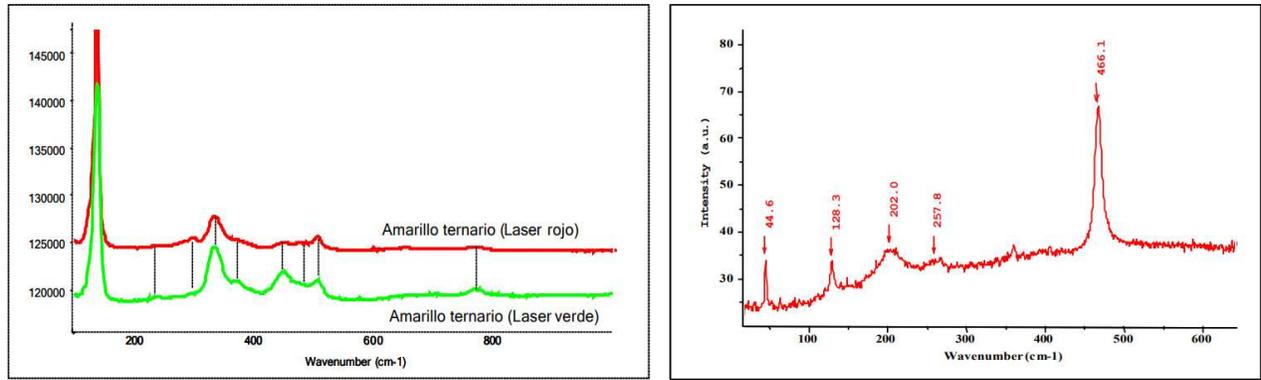


Figura 1.10. Bandas de Rayleigh y Raman Stokes y anti-Stokes [25].



a

b

Figura 1.11. (a) Variación en la intensidad de las bandas de Raman de acuerdo con la intensidad de la fuente (láser rojo de mayor intensidad). (b) Espectrograma de Raman Típico. [25]

Capítulo 2

Procedimiento Experimental

2.1 Preparación de las muestras

Para la realización de este trabajo se emplearon dos tipos de muestras: muestras de cable de medio voltaje semiaislado provenientes de tres fabricantes distintos que serán denominados fabricante A, B y C (es decir, el aislamiento tiene forma de cilindro) y muestras planas hechas fabricadas de XLPE que fueron proporcionadas por el fabricante A. En el caso de las muestras planas se contaba, a su vez, con dos variantes, una que no contiene ningún relleno y una muestra cuya proporción de relleno es menor comparada con la cantidad habitual empleada en los cables. En la figura 2.1a, se observa la muestra plana sin relleno (blanca) y en 2.1b se observa la muestra con aditivo (gris).



Figura 2.1. a) Muestra plana sin relleno. b) Muestra plana con relleno.

2.2 Equipo e Instrumentación

2.2.1 Pruebas en plano inclinado

Las pruebas de plano inclinado fueron realizadas en las instalaciones del laboratorio de alta tensión de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional. El equipo empleado se describe a continuación; dicho

equipo fue construido por el Ing. José Carlos Santos Álvarez bajo la supervisión del Dr. Fermín Pascual Espino Cortés [13].

❖ **Fuente de alimentación de corriente alterna**

Fuente que provee a todos los equipos utilizados dentro del laboratorio cuya tensión nominal es $127 V_{rms}$ @ 60Hz.

❖ **Reóstato**

Reóstato marca Haefely, utilizado para regular la tensión de entrada en el transformador de potencial para así ajustar la tensión aplicada a las muestras durante la prueba de plano inclinado.

❖ **Transformador de voltaje monofásico**

Transformador de la marca New Line, con el cual se eleva la tensión hasta los valores requeridos para la prueba, que van desde 2.5 hasta 4.0 kV.

En la tabla 2.1 se muestran los datos de la placa de datos del transformador de voltaje monofásico.

Tabla 2.1. Datos de placa del transformador de voltaje monofásico [13].

Potencia nominal	10 kVA
Altitud de operación	3000 msnm
Frecuencia de operación	60 Hz
Tensión de entrada	$127 V_{rms}$
Tensión de salida	$7500 V_{rms}$
Corriente de entrada	79 A
Corriente de salida	1.39 A

❖ **Cable de alta tensión**

Se han utilizado dos tipos de conductor, cobre y aluminio. El de cobre para conectar el lado de alta tensión del transformador de potencial con los resistores y el de aluminio para conectar los resistores con el electrodo superior de cada una de las muestras en el plano inclinado.

❖ **Resistor bobinado**

Dos resistores variables cerámicos bobinados de 200 W cada uno conectados en serie entre el lado de alta tensión del transformador de potencial y el electrodo superior de cada espécimen de prueba colocado en el plano inclinado.

❖ **Resistor cerámico de ¼ de Watt**

Como no se cuenta con un sistema para la medición de la corriente de fuga en cada muestra, se ha utilizado un resistor de 330Ω unido a un resorte, esto se coloca entre el electrodo inferior y la conexión a tierra. En caso de que la corriente se exceda, el resistor se quemaría actuando como un fusible y se abriría el circuito de la muestra.

❖ **Bomba peristáltica**

Por medio de esta bomba se realiza el goteo del contaminante a cada uno de los especímenes colocados en el plano inclinado. Se utilizan principalmente dos velocidades de goteo que son 0.3 y 0.6 mL/min.

❖ **Tubería de silicón**

Manguera flexible de silicón marca Masterflex modelo L/S 13 utilizada para dirigir el flujo del contaminante que se bombea a modo de goteo a cada uno de los especímenes de prueba colocados en el plano inclinado.

❖ **Regulador de tensión**

Regulador de tensión marca Koblenz de 1500 VA de potencia, $120 V_{\text{rms}}$ @ 60 Hz utilizado como protección para la bomba peristáltica.

❖ **Balanza analítica**

Marca Boeco Germany, modelo BPS 40 PLUS, es empleada para la medición de la masa de las muestras antes y después de la prueba de plano inclinado.

❖ **Punta para osciloscopio**

Marca Tektronix, modelo P6015A 1000x0.3pF 100M Ω , con cable de 10ft de longitud y pinza de tierra. Utilizada para la facilitar la medición de potencial en el lado de alta tensión en el arreglo de plano inclinado.

❖ **Osciloscopio**

Marca Tektronix, modelo TDS 1001B de dos canales. Utilizado para medir la tensión que se aplica a las muestras en el plano inclinado.

❖ **Pértiga para tierra**

De 1m longitud con cable de cobre conectado a tierra utilizada para aterrizar y descargar los elementos del arreglo para la prueba de plano inclinado en el lado de alta tensión.

❖ **Multímetro**

Multímetro marca BK Precision, modelo 2703C empleado para medir y ajustar el valor de la resistencia serie.

❖ **Medidor de conductividad**

Marca Hanna Instruments, con este instrumento se verifica que la conductividad del contaminante sea la indicada para realizar la prueba según los valores establecidos por la norma utilizada. La unidad de lectura del instrumento es en mili siemens [mS].

❖ **Vaso de precipitados de 500 ml**

Vaso graduado de cristal con capacidad de 500 ml, utilizado para depositar el contaminante utilizado en la prueba del plano inclinado y desde ahí es succionado por la bomba peristáltica hacia cada una de las muestras.

El diagrama a bloques del arreglo utilizado para las muestras planas y muestras de cable es el que muestra en la figura 2.2.

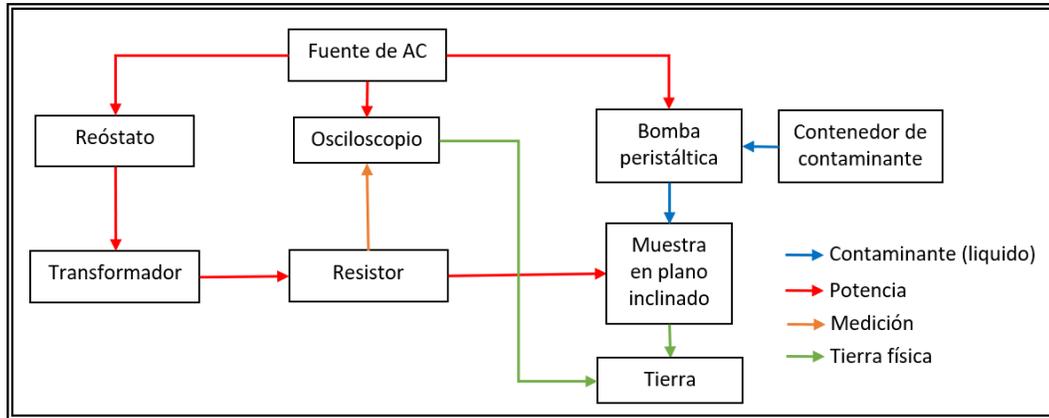


Figura 2.2. Arreglo utilizado para la prueba de plano inclinado con muestras planas y muestras de cables [13].

❖ **Arreglo con muestras planas**

En la figura 2.3 se muestra el arreglo para muestras planas utilizado en el laboratorio de alta tensión.



Figura 2.3. Plano inclinado para muestras planas [13].

❖ **Arreglo en secciones de cable**

En la figura 2.4 se muestra el arreglo para muestras de cable utilizado en el laboratorio de alta tensión.

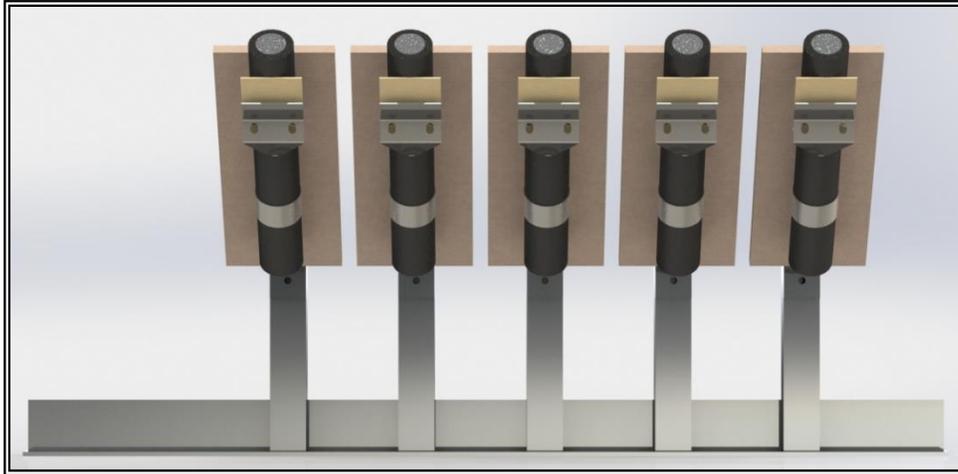


Figura 2.4. Plano inclinado con muestras de cable [13].

2.2.2 Caracterización estructural de las muestras de polietileno

Las distintas muestras fueron sometidas a distintas pruebas, con la intención de obtener información sobre su composición química y estructura. Las pruebas que se realizaron fueron las siguientes:

❖ **Espectroscopía de Infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)**

Esta prueba se realizó con un espectrofotómetro con atenuador de reflectancia ATR de la marca Perkin Elmer, modelo Frontier, con una energía de 236 U.E, con el objetivo de identificar el material empleado para fabricar la cubierta de los cables.

❖ **Espectroscopía Raman**

El equipo empleado fue un espectrómetro LabRam, modelo HR800 de la marca Horiba Jobin Yvon con láseres de operación de 532 nm, 633 nm y 785 nm. Las pruebas en este equipo se realizaron con la intención de distinguir entre las fases de carbón que se encuentran dispersas como rellenos en el material aislador. La espectroscopía Raman puede distinguir entre fases como diamante, grafito carbón amorfo, nanotubos, bukyballs, etc. Se hizo este estudio en el rango de $0\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ con esta intención. Se piensa que la presencia de grafito en los rellenos del material aislador, puede ser la causa de la conducta inadecuada de los cables ante descargas parciales.

❖ **Espectroscopía de Energía Dispersa (EDS)**

Para esta prueba se empleó un microscopio electrónico de barrido de la marca JEOL, modelo JSM-6701F EDS (Oxford). Esto se hizo para identificar los elementos que se encuentran presentes en las muestras planas, y que por lo tanto estarán presentes en el aislante de los cables.

❖ **Difracción de Rayos X (DRX)**

Esta prueba se realizó en un difractómetro de la marca Bruker, modelo D8 ADVANCE. Esta prueba se realizó con el objetivo de identificar las fases en las que se pueden encontrar los elementos identificados con las pruebas de EDS. Como se mencionó previamente, la presencia de fases cristalinas dentro del aislante disminuye notablemente su desempeño.

2.3 Procedimiento Experimental

2.3.1 Preparación de la solución contaminante

La preparación de dicha solución se llevó a cabo conforme a la norma brasileña ABNT NBR 10296:2014, que especifica se debe usar una solución con 0.02% en peso de Tritón X-100 y 0.1% en peso de NH_4Cl . El procedimiento para su elaboración se describe a continuación:

Se midieron 222.03 mol de agua destilada con una probeta. Posteriormente se procedió a verter 0.075 mol de NH_4Cl en el contenedor con el agua destilada empleando un vidrio de reloj y una espátula.

Aunque en líneas generales el procedimiento para agregar el Tritón X-100 a la solución fue el mismo, debido a la gran viscosidad del fluido, no fue posible agregar en una sola ocasión la cantidad requerida puesto que una buena porción se quedaba adherida al vidrio de reloj. Para asegurar que la solución contuviera 0.0032 mol de Tritón X-100, después de verter una porción se pesó nuevamente el vidrio de reloj y así saber la cantidad que realmente cayó al recipiente y la que se quedó adherida al vidrio. En la imagen 2.5 se observan las mediciones hechas de NH_4Cl y Tritón X-100.

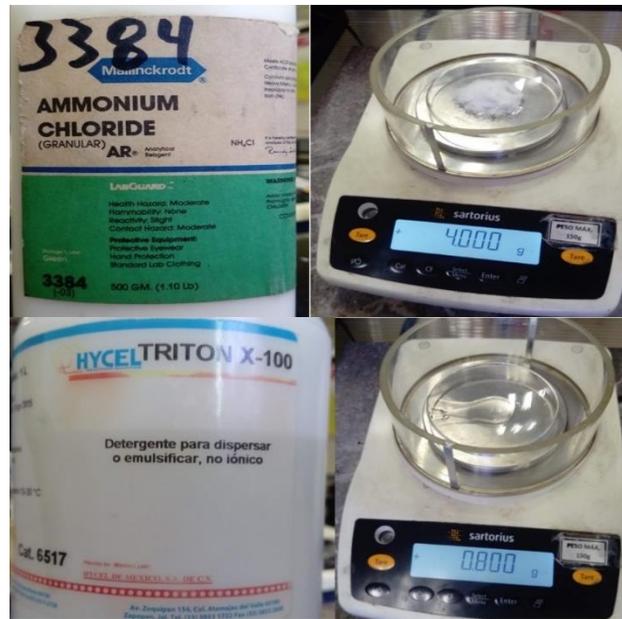


Figura 2.5. Mediciones de peso de cloruro de amonio y Tritón X-100.

Finalmente, para corroborar que la solución contaminante fue preparada correctamente, se midió la conductividad de la misma; la norma estipula que la conductividad de la solución debe oscilar entre 2.24 y 2.89 mS [13]. La medición de conductividad de la solución preparada se registró en 2.5, valor situado dentro del rango permitido.

2.3.2 Prueba de plano inclinado en muestras planas

Se sometieron a la prueba ocho muestras, divididas en dos grupos de cuatro muestras cada uno; el primer grupo conformado por muestras blancas y el segundo por muestras grises.

Antes de colocarlas en el arreglo de plano inclinado, la superficie de prueba se preparó con una lija grado 400 y se registró su masa inicial. Ya con las muestras listas, se colocaron en el arreglo y se inició el goteo de contaminante con un flujo de 0.3 ml/min, la resistencia del sistema se ajustó en 22 k Ω .

El criterio usado para determinar si las muestras fallaron la prueba es el siguiente:

- ❖ La erosión sea tan severa que provoque la perforación de la muestra.

- ❖ Aparezca un surco carbonizado (tracking) en la región próxima al electrodo inferior con dirección al electrodo superior y éste llegue a la mitad de la distancia entre electrodos que es de 25 mm.
- ❖ La mancha de erosión tenga una longitud mayor a la mitad de la distancia entre electrodos, que es de 25 mm [13].

Cuando se observó que el goteo del contaminante era uniforme, se energizó el sistema con una potencia inicial de 3 kVrms y ésta se fue incrementando 0.25 kVrms cada hora hasta alcanzar los 4 kVrms, una vez llegado a este punto, el flujo de contaminante se incrementó a 0.6 ml/min y la resistencia se incrementó a 33 k Ω ; se mantuvieron estas condiciones hasta el final de cada prueba. La prueba se detuvo cuando se observó erosión en la superficie de todas las muestras. Finalmente se registró la masa final de todas las muestras. En la figura 2.6 se observa el arreglo final de plano inclinado para las muestras planas.



Figura 2.6. Prueba de plano inclinado en muestras planas [13].

2.3.3 Prueba de plano inclinado en muestras de cable

Esta prueba se realizó bajo los lineamientos marcados por la norma británica BS EN 50397-1:2006. Para ello, se conformaron grupos tres grupos de muestras, cada uno conformado por cinco piezas provenientes de los fabricantes mencionados anteriormente.

Para preparar cada muestra se tomó una sección de aproximadamente 1 metro de largo de cada cable y se cortaron secciones de 20 cm; las suficientes para conformar los tres grupos, cada uno correspondiente a un fabricante distinto.

Una vez que se tuvieron todas las piezas, se lijó su superficie con una lija grado 600 y se registró la masa inicial de cada pieza. Para poder acoplar las piezas al sistema de plano inclinado, se sustituyó el electrodo inferior por una abrazadera metálica y se aseguró adicionalmente con un cincho de plástico. En la figura 2.7 se observa una fotografía del arreglo final para cada pieza.

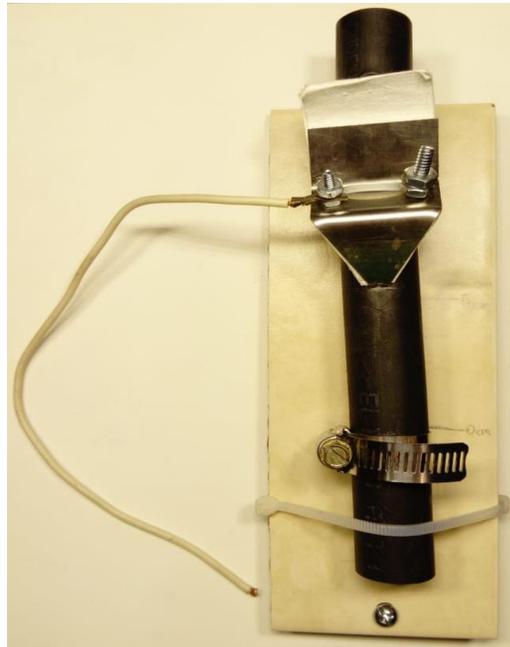


Figura 2.7. Arreglo de plano inclinado para muestras de cable [13].

Antes de montar todas las piezas en el sistema de plano inclinado se realizó una prueba colocando una muestra de sacrificio. La tensión inicial se ajustó en 3.0 kVrms y el goteo de contaminante en 0.3 mL/min en conformidad con la norma BS EN 50397-1:2006.

El criterio para determinar si la muestra falló la prueba es el que sigue:

- ❖ Si la longitud del tracking es mayor a la mitad de la distancia entre electrodos, en este caso, mayor a 25 mm.
- ❖ Perforación en el espécimen de prueba.

Con estas condiciones la pieza de sacrificio tardó 8 segundos en superar la longitud permitida de tracking, por lo que se consideró que falló la prueba. Por lo anterior, para evitar la falla prematura de las muestras, la tensión inicial para la prueba se ajustó en 2.5 kVrms aunque se mantuvo el mismo flujo de contaminante.

Bajo esas nuevas condiciones se corrieron las pruebas con cada grupo de muestras, registrando en cada caso el tiempo y la tensión a la que falló cada muestra. Finalmente, al terminar cada prueba se registró la masa de cada muestra. En la figura 2.8 se observa el arreglo final del plano inclinado para las muestras de cable.



Figura 2.8. Prueba de plano inclinado en muestras de cables [13].

Capítulo 3

Resultados y Análisis de Resultados

3.1 Muestras planas

3.1.1 Pruebas de Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)

Como se mencionó previamente, las pruebas de infrarrojo se realizaron en un espectrofotómetro Germanium Brand Perkin Elmer, modelo Frontier. La intención de estas pruebas es poder identificar el material con el cual están hechas estas muestras. En la figura 3.1 se observa el espectrograma resultante de ambas muestras.

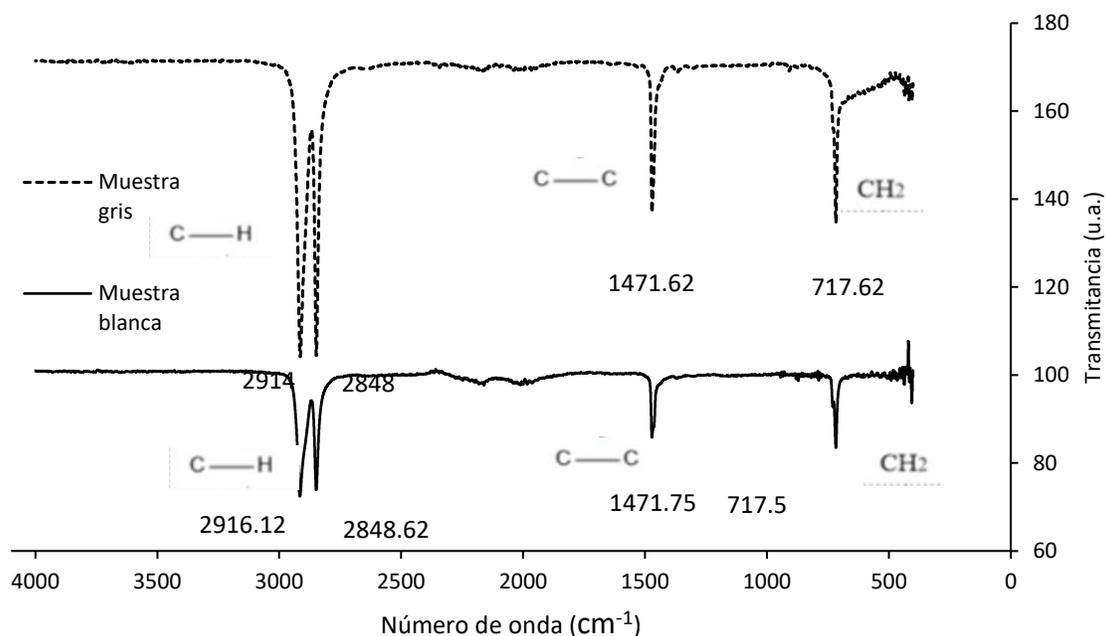


Figura 3.1. Espectro de muestras planas.

Al comparar los resultados obtenidos en la prueba con espectrogramas conocidos de polímeros de uso regular, obtenemos que en ambos casos se trata de polietileno; citando a Velandia J. [27], se tienen tres grupos de bandas correspondientes a movimientos de tensión de los enlaces C-H a 2850 cm^{-1} , tensión C-C a 1500 cm^{-1} y a un movimiento de flexión de $-\text{CH}_2$ en 700 cm^{-1} .

Aunque es posible identificar el tipo de polímero, en este caso polietileno, no es posible determinar de qué variante se trata (HDPE, LDPE) mediante este método, puesto que químicamente son idénticos [27]. De igual forma, no se observaron diferencias

significativas entre las muestras, lo que indica que las señales provenientes del relleno no están contenidas dentro del rango de energía estudiado.

3.1.2 Pruebas de EDS

Para obtener mayor información acerca de la composición química de las muestras se realizaron pruebas de Espectroscopía de Energía Dispersa, EDS, para así conocer los elementos químicos que componen las muestras. Hay que enfatizar que los análisis EDS son semicuantitativos, es decir, no son muy precisos. A continuación, en las tablas 3.1 y 3.2 y figuras 3.2, 3.3 y 3.4 se muestran los resultados de dichas pruebas.

Tabla 3.1. Resultados de las pruebas de EDS en muestras grises provenientes de zonas amplias.

Muestra gris	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
Elemento	% Peso	% Atómico	% Peso	% Atómico	% Peso	% Atómico
<i>C</i>	81.62	86.41	58.0	67.07	43.67	54.89
<i>O</i>	16.03	12.74	33.28	28.89	38.58	36.41
<i>Al</i>	0.19	0.09	-	-	1.33	0.74
<i>Si</i>	0.59	0.27	0.25	0.12	1.25	0.67
<i>Ca</i>	0.32	0.10	0.81	0.28	2.33	0.88
<i>K</i>	0.33	0.11	1.45	0.51	3.47	1.34
<i>Na</i>	-	-	3.11	1.88	4.75	3.12
<i>S</i>	-	-	0.55	0.24	0.33	0.15
<i>Cl</i>	0.42	0.15	2.55	1.0	3.95	1.68
<i>Ti</i>	0.51	0.13	-	-	0.34	0.11
Total	100.0		100.0		100.0	

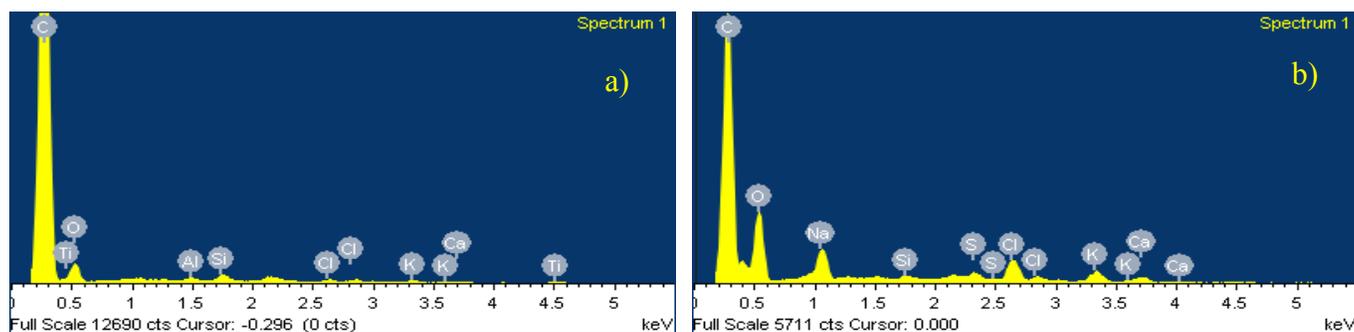


Figura 3.2. Microanálisis de muestras grises. a) Prueba 1, b) Prueba 2. Las mediciones provienen de zonas amplias.

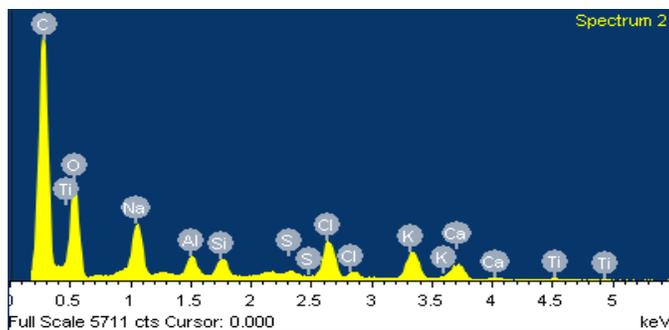


Figura 3.3. Microanálisis de muestras grises, prueba 3. Las mediciones provienen de zonas amplias.

Tabla 3.2. Resultados de las pruebas de EDS en muestras blancas, provenientes de zonas amplias.

Muestra blanca	Prueba 1		Prueba 2	
Elemento	% Peso	% Atómico	% Peso	% Atómico
C	98.11	98.57	97.20	97.88
O	1.89	1.43	2.80	2.12
Total	100.00		100.00	

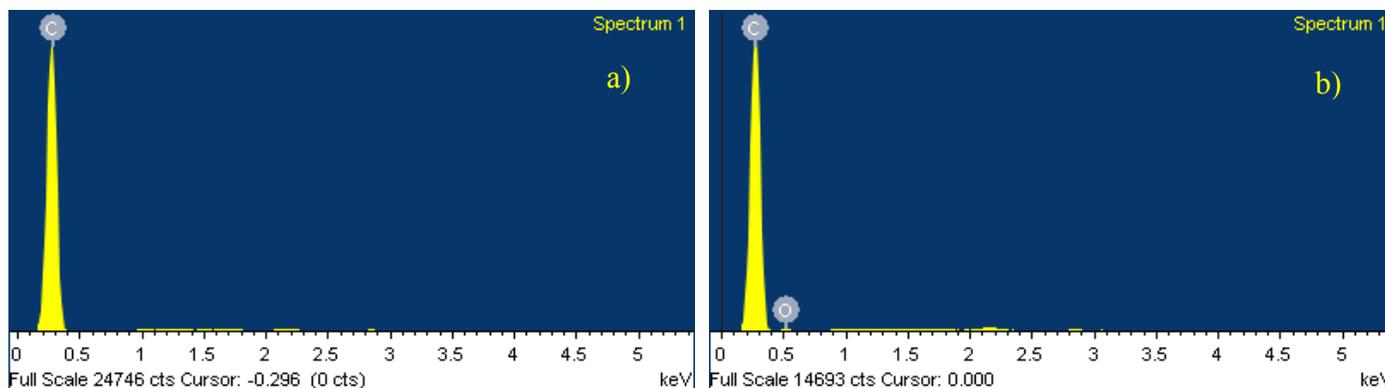


Figura 3.4 Microanálisis de muestras blancas. a) Prueba 1, b) Prueba 2. Las mediciones provienen de zonas amplias.

Lo primero que se observa al comparar los resultados es que parecen estar formadas solamente por material orgánico, es decir, los resultados sugieren que las muestras blancas constan sólo del polímero y no contienen rellenos. En el caso de las muestras grises, la concentración de rellenos no parece ser muy homogénea.

Una cosa importante a tener en cuenta es que la prueba de EDS tiene sus limitantes, la primera y principal, es que es un análisis puntual, semicuantitativo. La presencia de

ciertos elementos en la muestra usada para la prueba no garantiza que sea así en el resto del material. Aunado a esto, no puede detectar elementos de muy bajo peso molecular, como lo es el hidrógeno, parte importante en la composición del polietileno. Finalmente, el material analizado no es conductor, por lo que tuvo que ser recubierto con oro-paladio antes de realizar la prueba, además de que su forma no era perfectamente uniforme. Estos factores pueden provocar la aparición de trazas de elementos que realmente no están presentes en el material.

No obstante, aun teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior, la presencia de ciertos elementos como calcio, potasio, sodio y cloro resulta preocupante ya que combinados son elementos que pueden formar partículas conductoras de carga, lo cual, de ser cierto, podría causar una baja en el desempeño del aislante.

3.1.3 Difracción de Rayos X

Debido a que se encontró la posible presencia de elementos que potencialmente pueden afectar a la resistividad del aislante, se realizaron pruebas de difracción de rayos X esperando poder identificar la o las especies químicas en las que se encuentran distribuidos dichos elementos dentro del material. Los patrones de difracción obtenidos se muestran a continuación en la figura 3.5 y 3.6.

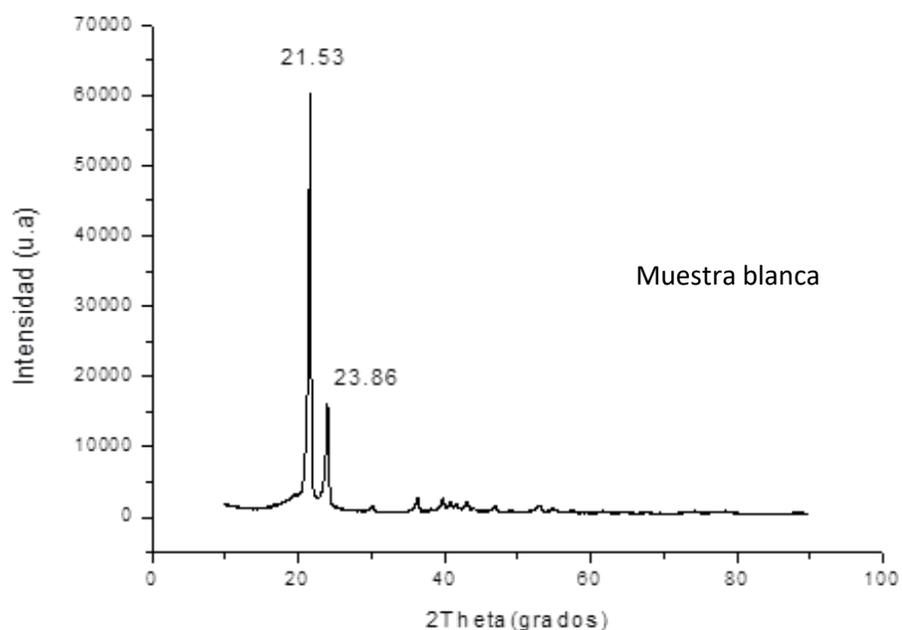


Figura 3.5. Patrón de difracción de muestra blanca.

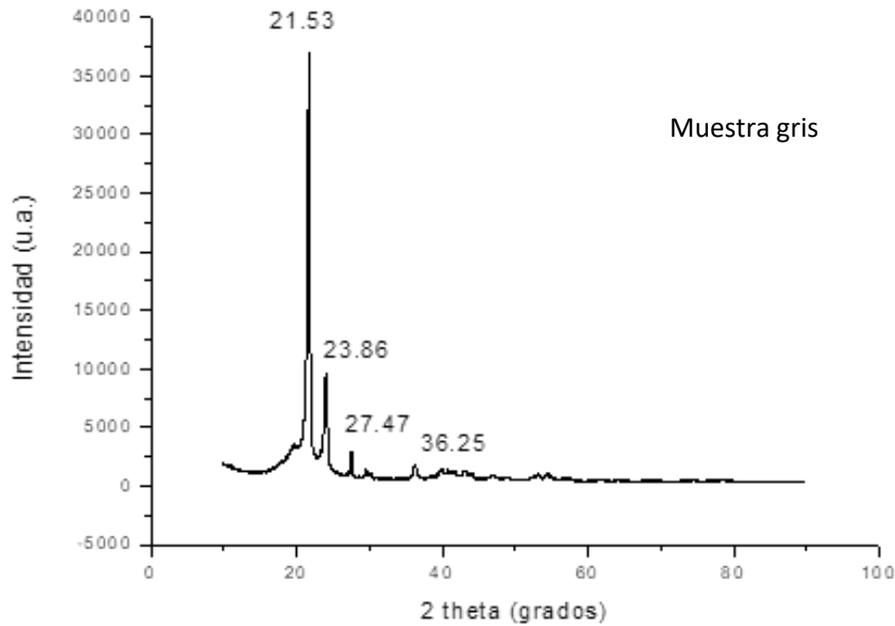


Figura 3.6. Patrón de difracción de muestra gris.

En la figura 3.7 se muestra el patrón de difracción de una muestra de polietileno, destacando la presencia de picos de alta intensidad en los valores de 2 theta de 21.5° y 23.9°, además de un tercero y cuarto de menor intensidad en 2 theta = 30° y 36.2°. Además de los picos de intensidad ya mencionados, otras características a destacar son la presencia de una meseta en 2 theta = 19.3° y de picos de baja intensidad después de 2 theta = 40°, los cuales se deben a las regiones amorfas del polietileno. [28]

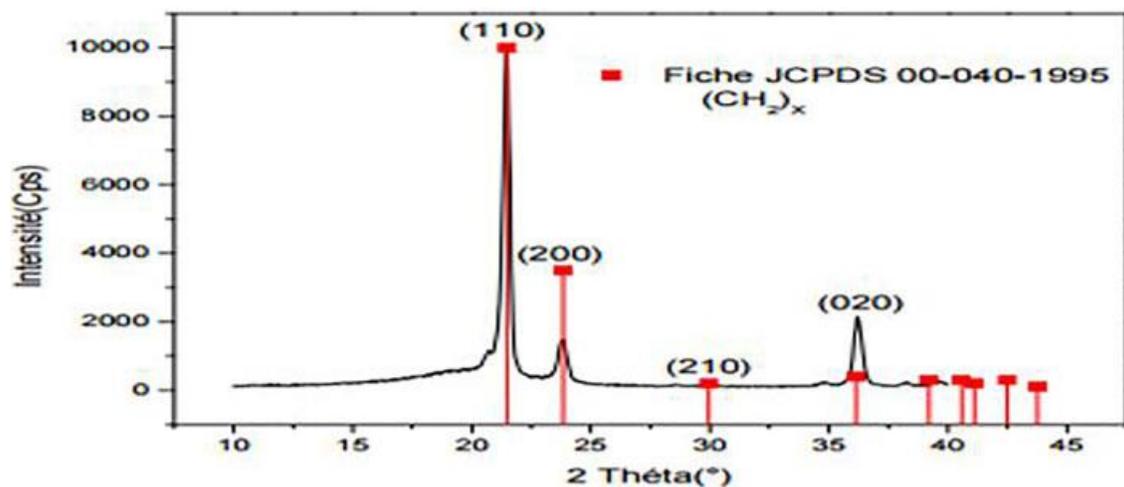


Figura 3.7. Patrón de difracción de una muestra de HDPE. [28]

Al comparar el patrón de difracción de la muestra de HDPE con los obtenidos en las pruebas, se observó que la muestra blanca efectivamente es HDPE, ya que su patrón de difracción presenta las mismas características que el patrón de referencia.

Para la muestra gris, sin embargo, se encontró un pico adicional de media intensidad situado en $2\theta = 27.47^\circ$ que no corresponde al patrón del HDPE.

En la siguiente imagen se muestra el patrón de difracción de cuarzo- α (COD ID 2106355) obtenido con el programa Mercury 2020.1 utilizando la base de datos Crystallography Open Database (COD).

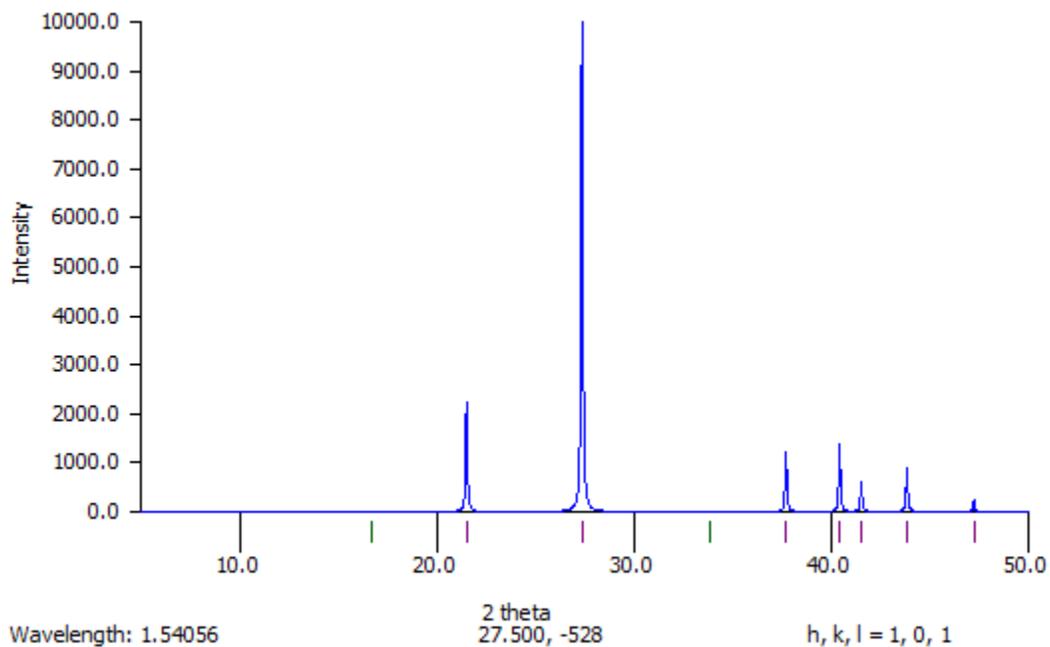


Figura 3.8. Patrón de difracción del cuarzo- α .

El pico de mayor intensidad en el patrón del cuarzo, que como se sabe es una variante cristalina del óxido de silicio (SiO_2), está situado en $2\theta = 27.5^\circ$, mientras que los picos de menor intensidad se sitúan en $2\theta = 21.64^\circ$, 37.79° , 40.41° y 43.94° . El pico de mayor intensidad coincide con el pico encontrado en la muestra gris, mientras que los demás picos coinciden en localización con picos observados en el patrón del polietileno. Esto parece indicar que es óxido de silicio el material que se encuentra presente como impureza en el relleno adicionado a la muestra gris. La presencia de este material puede deberse a que el negro de humo (relleno empleado en la cubierta de los cables) contiene una fracción residual de cenizas proveniente de su proceso de

fabricación. Estas cenizas están compuestas principalmente por material sin quemar (carbono) y una matriz compuesta por aluminosilicatos. Estas cenizas serían la razón por la cual en la prueba de EDS se encontraron trazas de elementos como silicio, aluminio, sodio, calcio, potasio, cloro, titanio, etc., sin embargo, no es posible conocer ni la cantidad de cenizas presente en el negro de humo, ni la proporción exacta de cada compuesto presente en ellas.

Otra posible causa de la presencia de óxido de silicio en el relleno, es el manejo ineducado del negro de humo antes de mezclarlo con el polímero. Este material generalmente se transporta a granel en grandes contenedores o en bultos, por lo que es posible que, durante su manejo, algunas partículas de arena se mezclen con el negro de humo. Aunque cabe mencionar que es menos probable que esta sea la causa de la presencia de óxido de silicio en la muestra, ya que, si fuera el caso, se encontrarían partículas de mucho mayor tamaño distribuidas completamente al azar dentro de las muestras, y los resultados de las pruebas indican que se puede encontrar este compuesto distribuido de forma cuasi-homogénea dentro de la muestra (distribuido en toda la muestra, aunque en diferentes cantidades).

3.1.4 Pruebas de Plano Inclinado

Los resultados de la prueba de plano inclinado en cuanto a tiempo y la tensión de falla y la pérdida de masa registrada en las muestras se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados de la prueba de plano inclinado en muestras planas. [13]

No. De Muestra	Muestras Blancas							
	Tiempo de falla (hh:mm)	Tensión de falla (kV)	Masa			Promedios		
			Inicial (g)	Final (g)	Diferencia (g)	Tiempo de falla (hh:mm)	Tensión de falla (kV)	Pérdida de Masa (g)
1	04:06	4	31.424	31.382	0.042	04:13	4.00	0.06
2	03:07	3.75	31.163	31.105	0.058			
3	05:35	4.25	30.961	30.888	0.073			
4	04:04	4	30.938	30.871	0.067			
No. De Muestra	Muestras Grises							
	Tiempo de falla (hh:mm)	Tensión de falla (kV)	Masa			Promedios		
			Inicial (g)	Final (g)	Diferencia (g)	Tiempo de falla (hh:mm)	Tensión de falla (kV)	Pérdida de Masa (g)
1	05:46	4.25	31.16	30.655	0.505	04:52	4.06	0.42
2	04:24	4	31.193	30.984	0.209			
3	04:39	4	31.228	30.904	0.324			
4	04:42	4	30.955	30.302	0.653			

Los resultados de esta prueba muestran que, de manera general, las muestras grises tuvieron un mejor desempeño, aunque no considerablemente. El área donde se observa la mejora más grande es en el tiempo de falla donde, en promedio, las muestras grises resistieron 40 minutos más que las muestras blancas, razón por la cual tuvieron una mayor pérdida de masa.

Aunque se observa una mejora en desempeño de las muestras con aditivos en comparación con las muestras de polietileno, las diferencias no son realmente grandes; no obstante, lo anterior no quiere decir que no haya una justificación real para el uso de aditivos, ya que su principal función en este caso, no es mejorar las propiedades eléctricas del polietileno, sino la mejora en la resistencia a la radiación UV, el incremento en sus

propiedades mecánicas y quizá la mejora en la disipación de calor [29], sin mencionar que un cable negro contrasta más con el medio ambiente en comparación de un cable blanquizo, como sería uno recubierto de polietileno.

Aun con lo dicho hasta este punto, no se puede dar por sentado que la adición de aditivos al polietileno no tiene efecto en su desempeño en campo, incluso si el aditivo presenta ciertas impurezas como en este caso, el desempeño de las muestras con aditivos fue mejor que las que no los tienen, sin embargo, si no se tiene control en la forma en cómo se añaden estos aditivos o si se es excesivamente descuidado en su manejo pueden tener efectos adversos, como se observa en las muestras de cable que se muestran más adelante.

3.2 Muestras de cable

3.2.1 Pruebas de Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)

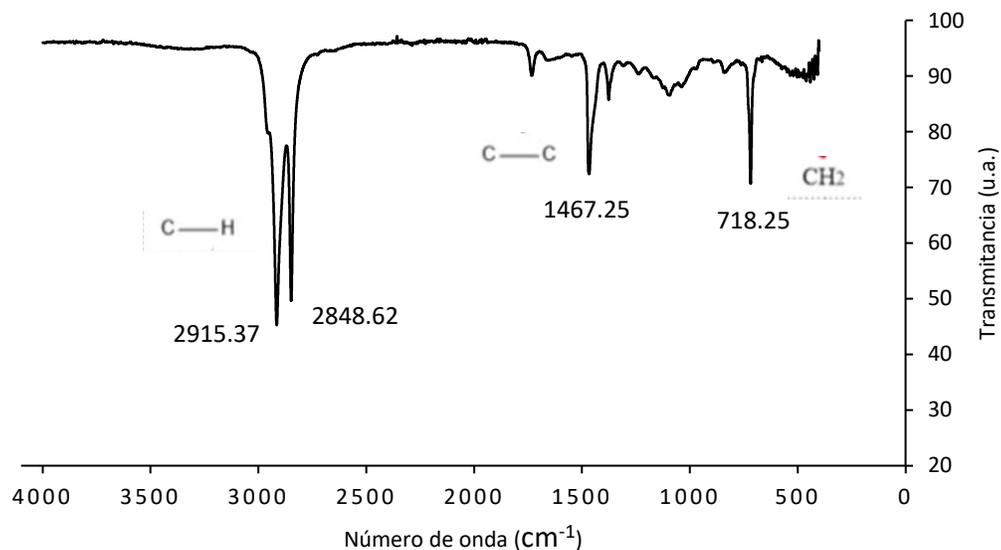


Figura 3.9. Espectro de muestra de cable, fabricante A.

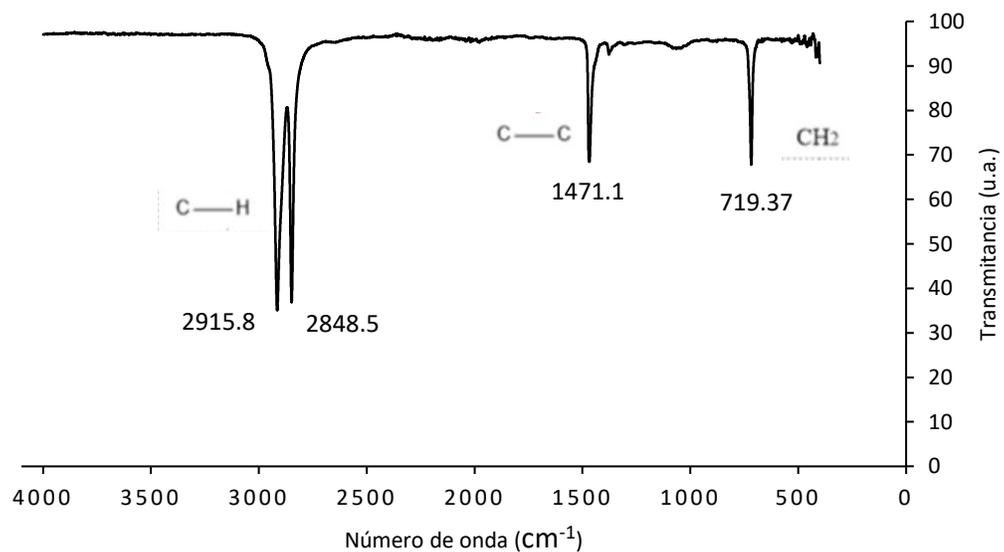


Figura 3.10. Espectro de muestra de cable, fabricante B.

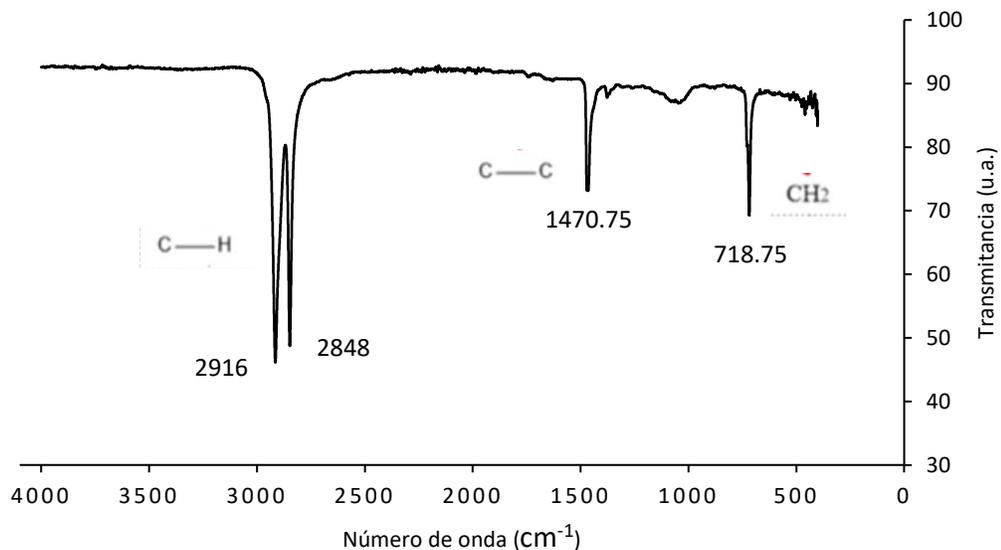


Figura 3.11. Espectro de muestra de cable, fabricante C.

Al igual que con las muestras planas, el espectro refleja que el material con el que están hechas las cubiertas de los tres fabricantes es polietileno. Como se mencionó previamente, mediante este método no se puede afirmar con seguridad de qué tipo de polietileno se trata puesto que su composición química es la misma, sin embargo, en la figura 3.12 se muestran los espectros correspondientes a muestras conocidas de HDPE y LDPE respectivamente.

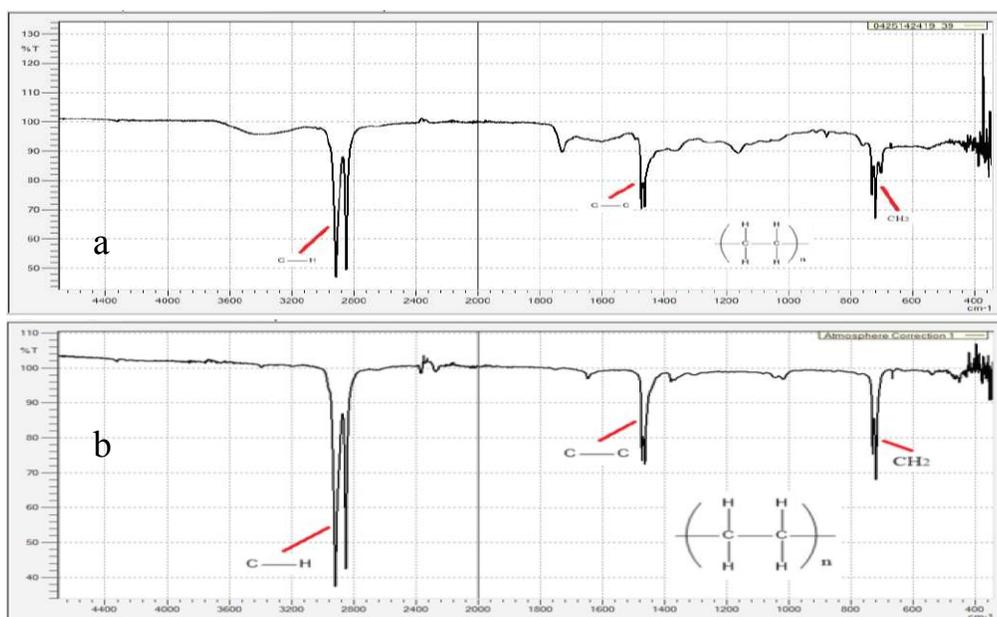


Figura 3.12. Espectro de muestras conocidas de a) HDPE y b) LDPE. [27]

Al comparar el espectro obtenido de las muestras de cada fabricante y el espectro de las muestras de HDPE y LDPE se observa que la muestra del fabricante A se asemeja más al espectro del HDPE, mientras que para el fabricante B y C se observa mayor semejanza con el espectro del LDPE.

Aunque no es posible saber con exactitud el tipo de polietileno que emplea cada fabricante mediante este método, no sería de extrañar que efectivamente emplearan LDPE, puesto que el proceso de entrecruzamiento que se lleva a cabo para este tipo de recubrimientos se puede realizar tanto en HDPE como LDPE y la diferencia más grande entre ambos radica, como ya se mencionó, principalmente en sus propiedades mecánicas.

3.2.2 Espectroscopia Raman

Esta prueba se realizó en diferentes secciones de la matriz polimérica de las muestras de cable, así como en partículas o secciones de las muestras que parecen no formar parte de la matriz; los resultados de esta prueba se muestran a continuación:

Fabricante A

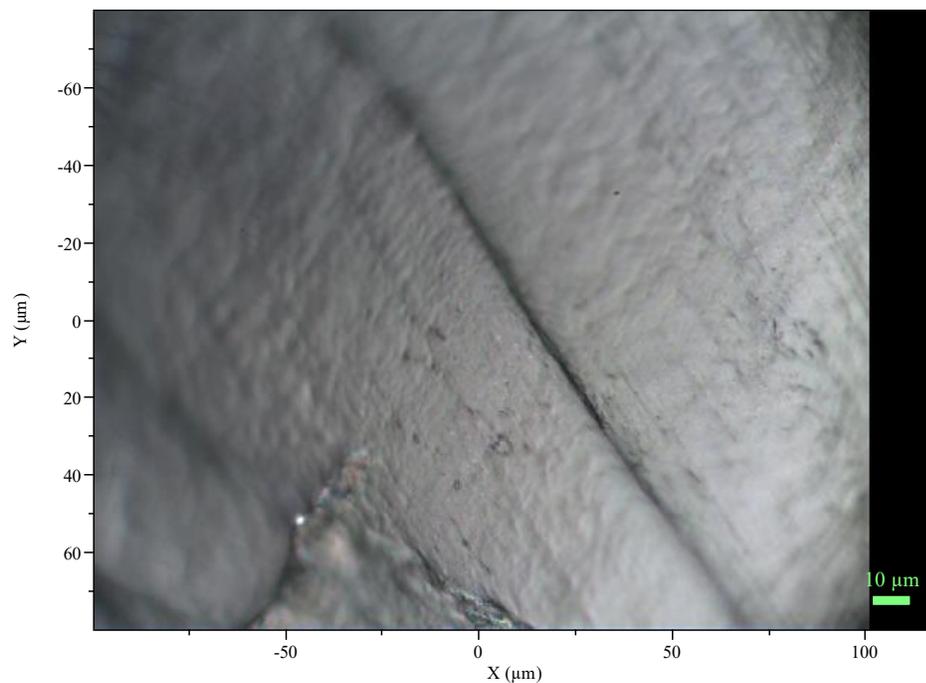


Figura 3.13. Matriz del aislante, fabricante A.

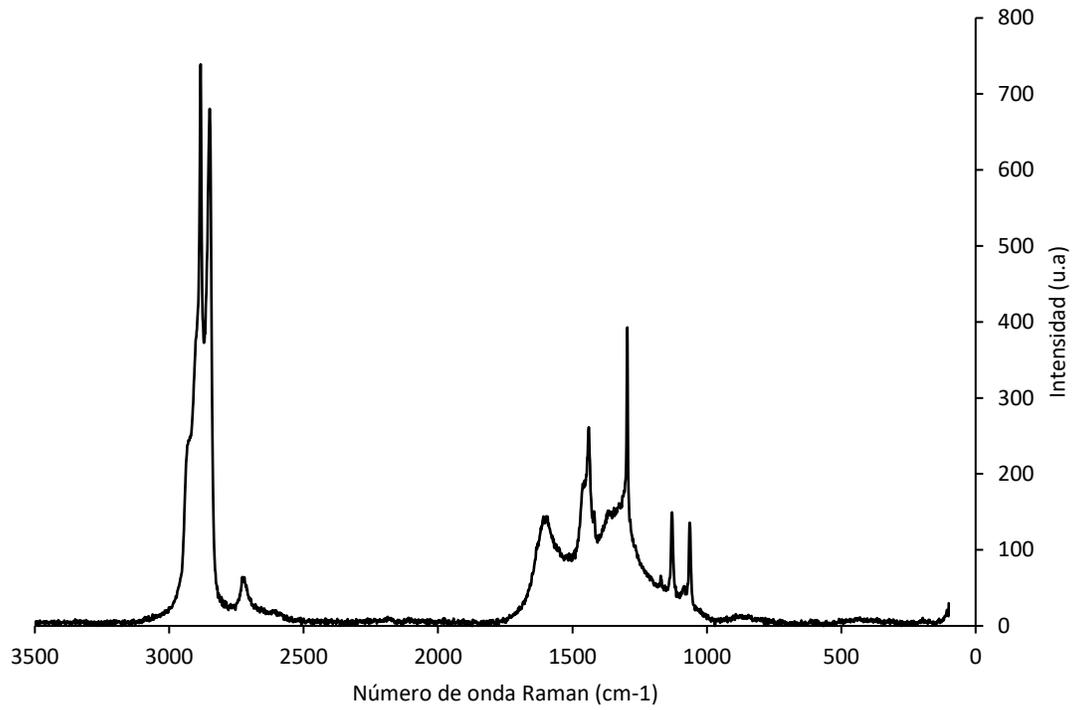


Figura 3.14. Espectro Raman de la matriz del aislante, fabricante A.

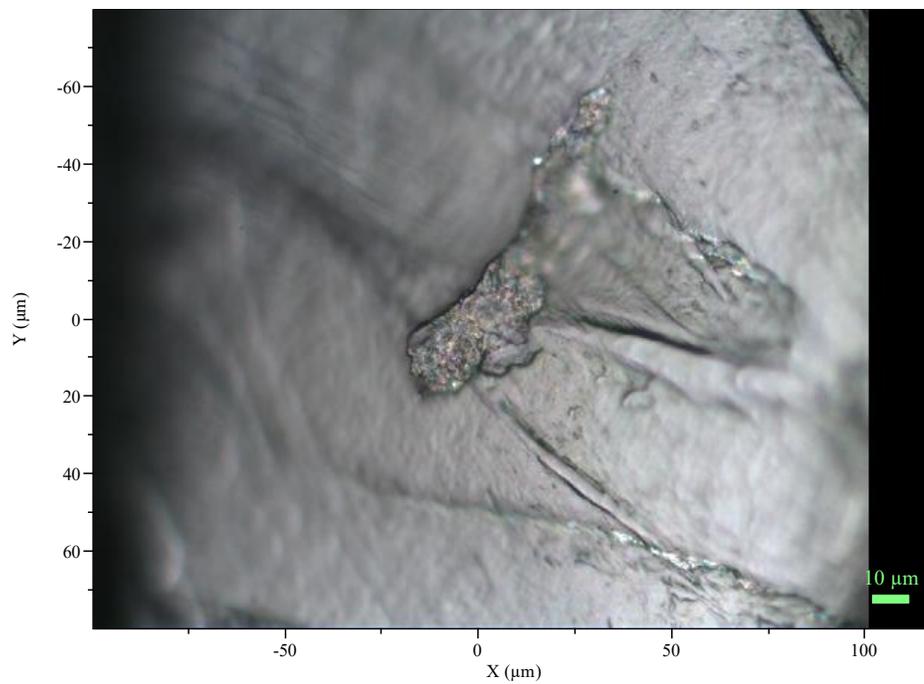


Figura 3.15. Aglomerado encontrado dentro del aislante, fabricante A.

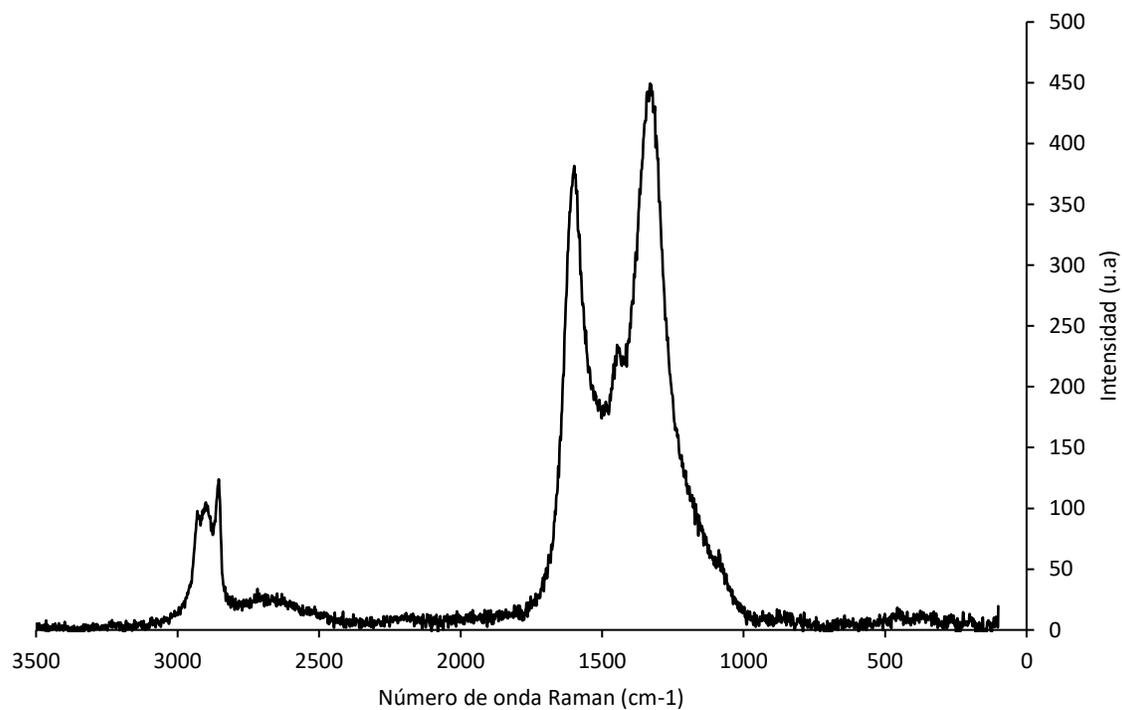


Figura 3.16. Espectro Raman del aglomerado encontrado en el aislante, fabricante A.

Fabricante B

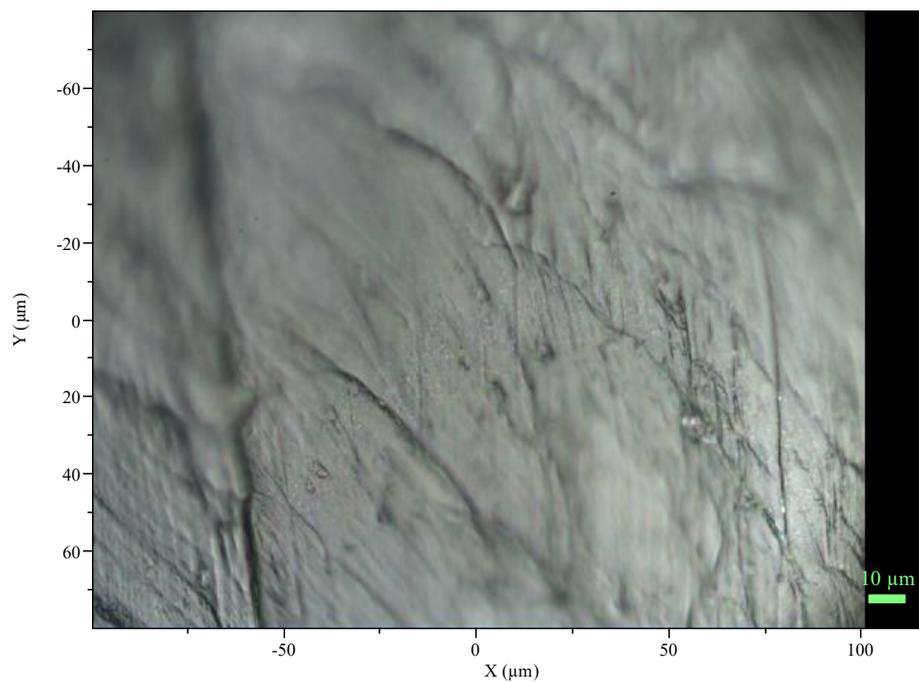


Figura 3.17. Matriz del aislante, fabricante B.

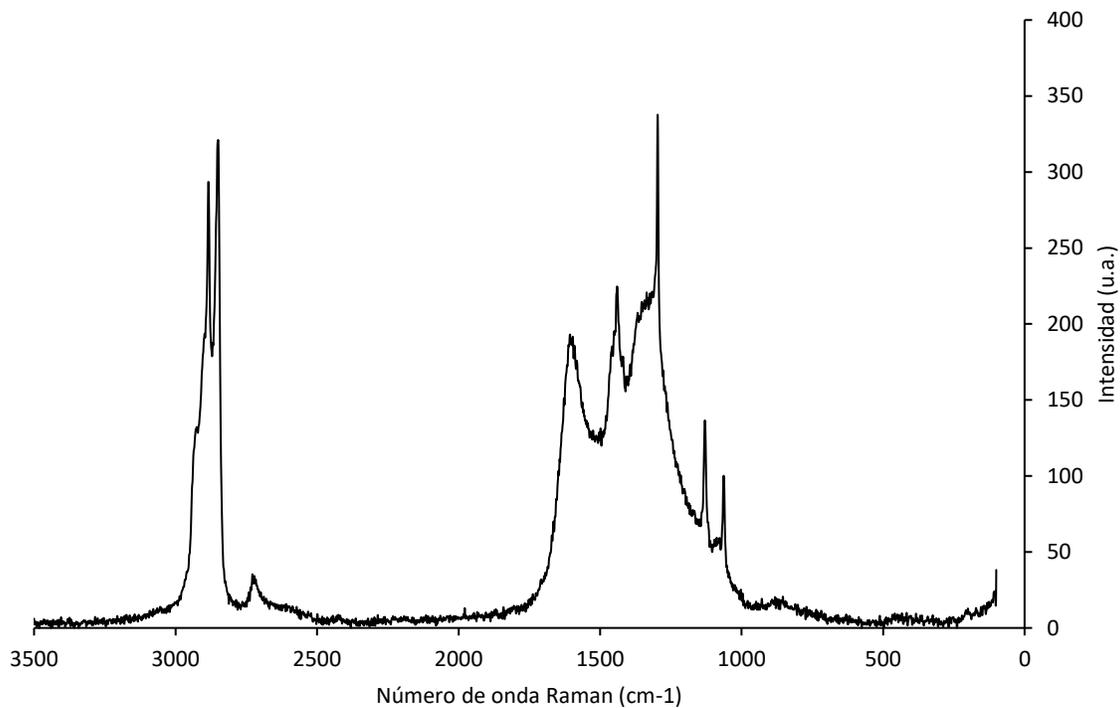


Figura 3.18. Espectro Raman de la matriz del aislante, fabricante B.

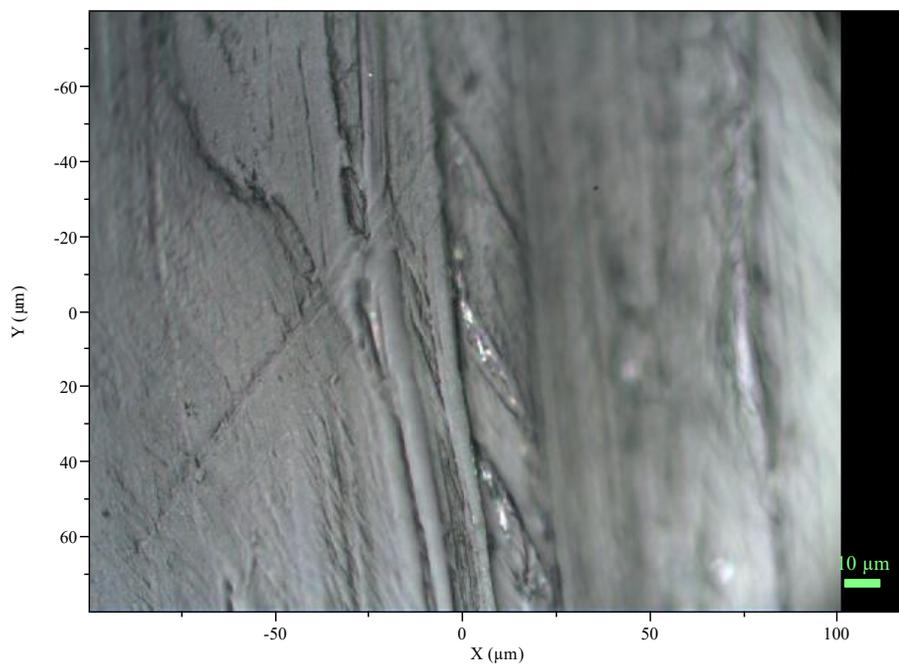


Figura 3.19. Irregularidad encontrada en la matriz, fabricante B.

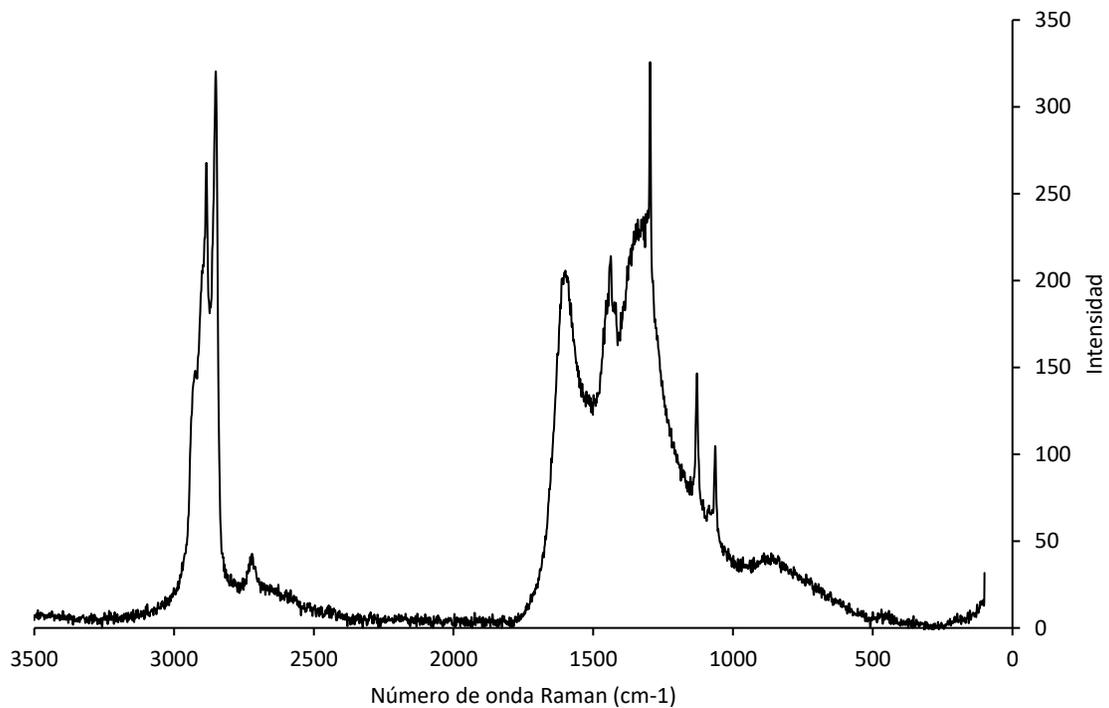


Figura 3.20. Espectro Raman de la irregularidad encontrada en la matriz, fabricante B.

Fabricante C

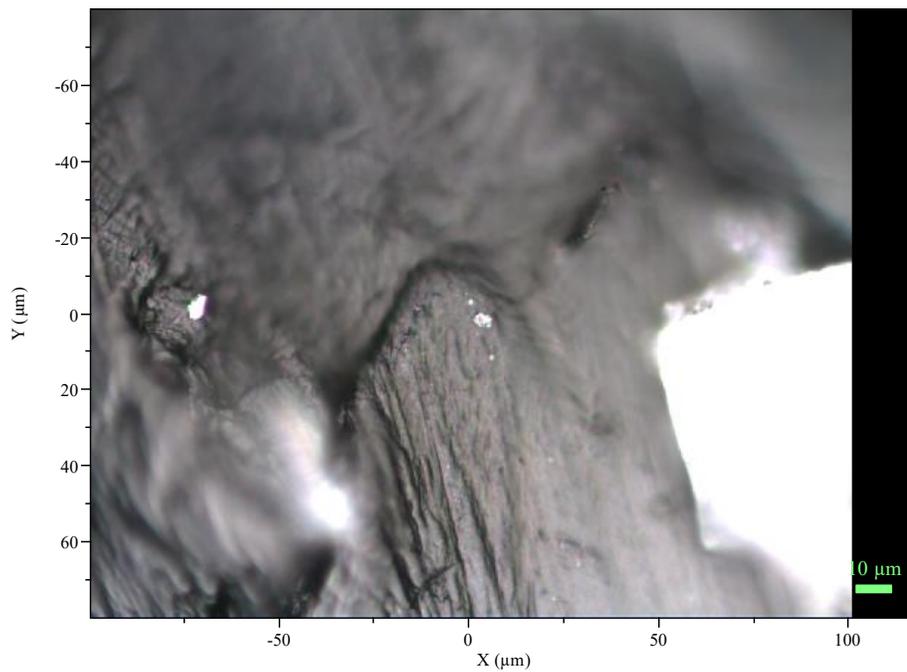


Figura 3.21. Matriz del aislante, fabricante C.

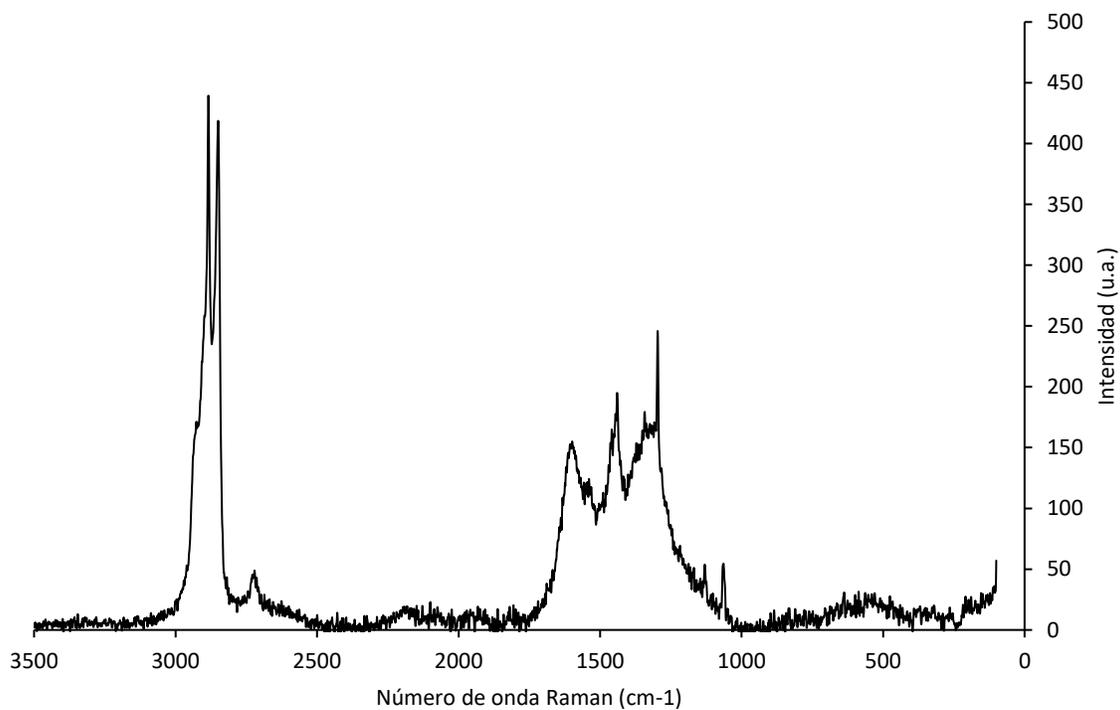


Figura 3.22. Espectro Raman de la matriz del aislante, fabricante C.

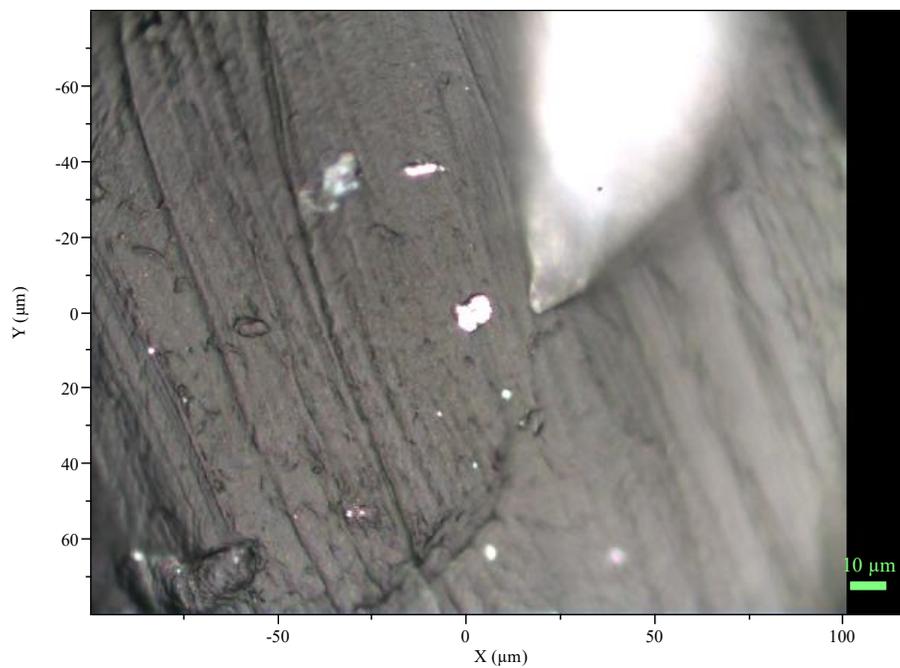


Figura 3.23. Partícula incrustada en la matriz del aislante, fabricante C.

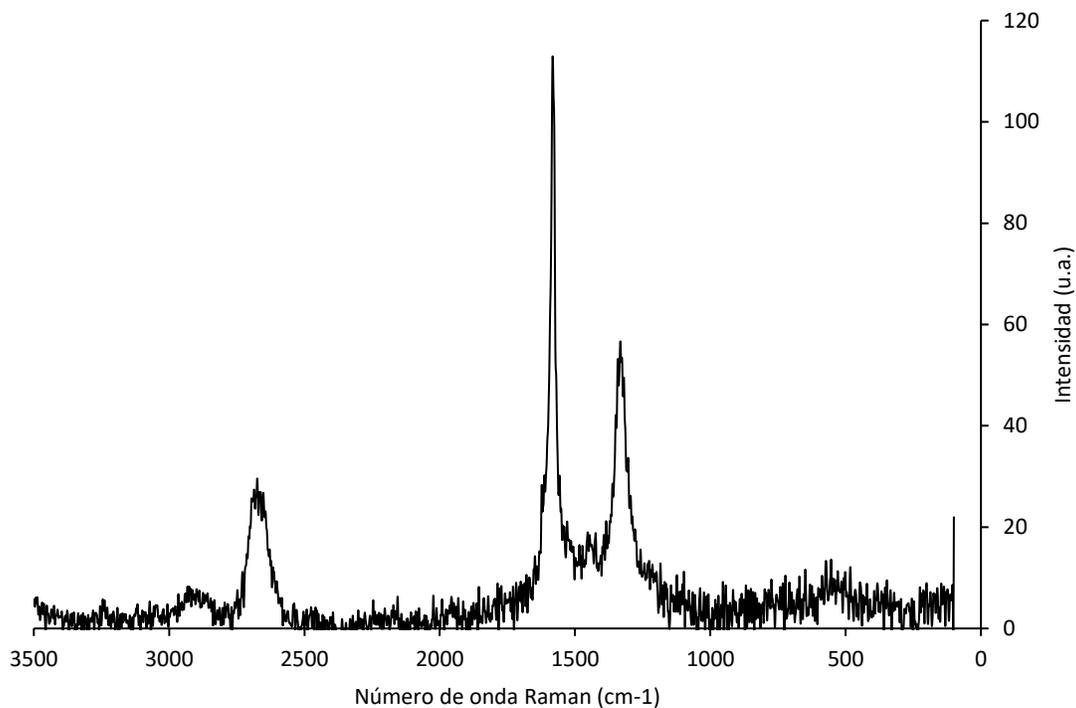


Figura 3.24. Espectro Raman de la partícula incrustada en la matriz, fabricante C.

Antes de analizar el resultado de las pruebas realizadas a cada muestra es necesario analizar el espectro de muestras de polietileno. Para ello, en la figura 3.25, se observa el espectro Raman de muestras conocidas tanto de HDPE como de LDPE.

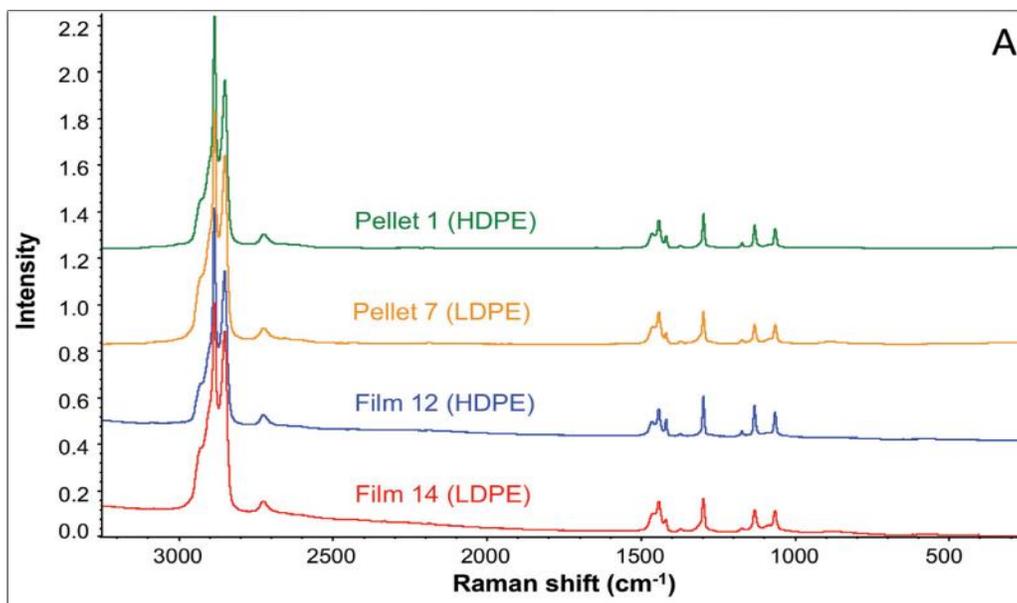


Figura 3.25. Espectro Raman de muestras conocidas de HDPE y LDPE. [30]

Ibrahim M. et al [30] compararon el espectro Raman del HDPE y LDPE encontrando que la intensidad del pico en 1416 cm^{-1} correspondiente al movimiento del enlace CH₂ es mayor en el HDPE que en el LDPE, aunque en el caso del pico en 2848 cm^{-1} correspondiente a la región C-H tiende a ser mayor en el LDPE que en el HDPE, como se observa en la figura 3.26. Esta última observación parece ser otro indicativo de que el fabricante B posiblemente emplea LDPE en la fabricación de sus cables, puesto que solo en sus muestras de aislante se observa que dicho pico tiene mayor intensidad, comparado con el pico en 2882 cm^{-1} , ambos pertenecientes a la región C-H.

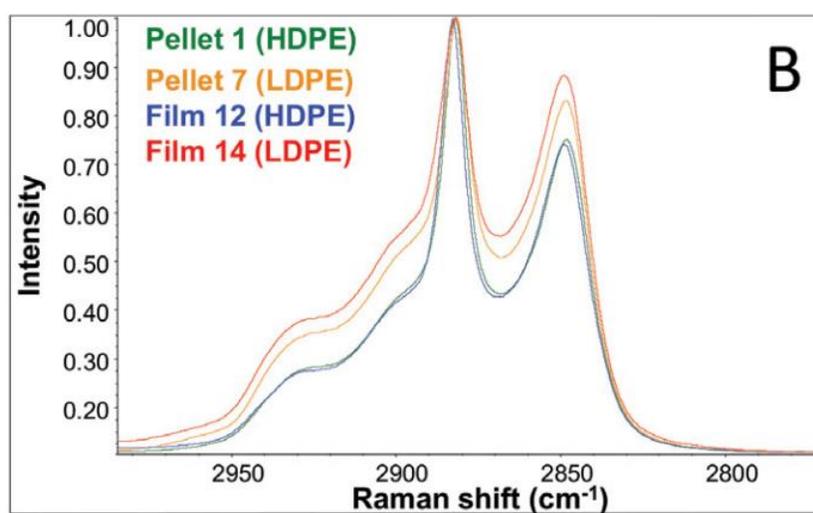


Figura 3.26. Espectro Raman de la región C-H de las muestras de polietileno. [30]

Sin importar si las muestras pertenecen a HDPE o LDPE, los picos representativos en el espectro Raman del polietileno se encuentran en 2882 cm^{-1} , 2848 cm^{-1} , 1440 cm^{-1} , 1416 cm^{-1} y 1300 cm^{-1} . Si se observa el espectro resultante de todas las muestras (en la matriz) se vuelve evidente que además de los picos del polietileno, se encuentra un pico adicional situado entre 1580 cm^{-1} y 1590 cm^{-1} , además de que, comparado con el espectro de polietileno, el pico situado en 1300 cm^{-1} tiene mayor intensidad y es más angosto.

Los cambios que se observan entre el espectro Raman del polietileno y el espectro de las muestras de los tres fabricantes se deben al relleno que tiene el aislante, que se sabe es negro de humo. Negro de humo es el nombre común que se le da al carbono producto de la combustión de incompleta de hidrocarburos; se le da ese nombre ya que este material se

obtiene al atrapar el humo producido durante la quema de hidrocarburos, obteniendo así un polvo fino, que puede o no pasar por tratamientos de purificación, dependiendo del uso que se le dé. El negro de humo es un aditivo muy común en la industria de los elastómeros y polímeros y es también usado como pigmento.

Como se mencionó en el párrafo anterior, el negro de humo está compuesto principalmente por carbono y una fracción residual de cenizas compuesta principalmente por óxidos de varios elementos como silicio, hierro, calcio, aluminio, sodio, entre otros y algunos compuestos orgánicos. La estructura del carbono en este material es principalmente amorfa, pero como se verá más adelante, es posible encontrar dentro del material especies con mayor orden estructural.

En la figura 3.27 se observa el espectro Raman de una muestra de nanotubos de carbono de pared múltiple o MWCNTs como se les conoce comúnmente por sus siglas en inglés. Dicha muestra se agregó como aditivo a una matriz polimérica de Polidimetilsiloxano o PDMS.

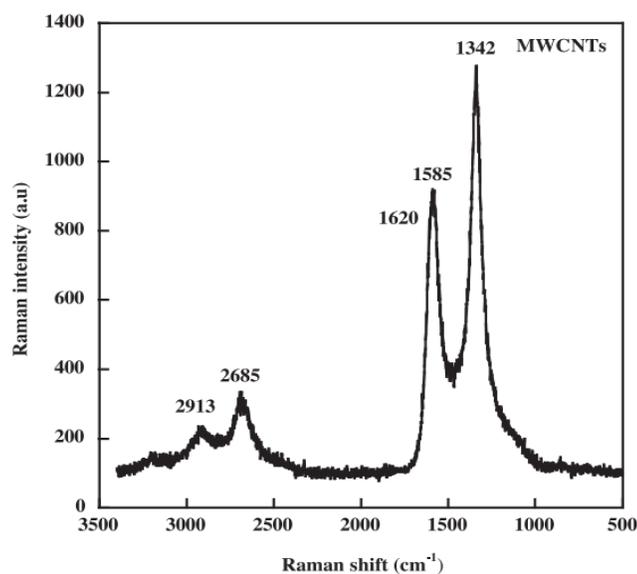


Figura 3.27. Espectro Raman de nanotubos de carbono (MWCNTs) en una matriz de PDMS. [31]

El espectro resultante del análisis del aglomerado encontrado en el aislante del fabricante A presentado en la figura 3.16, es similar al que se muestra en la figura 3.27. Con esto se hace notar que el aglomerado encontrado está formado por carbono, y que

dentro de él es posible que existan especies de carbono con orden estructural, por supuesto teniendo en cuenta que no se puede afirmar que se trate específicamente de nanotubos de carbono.

De manera similar, en la figura 3.28 se muestra el espectro Raman de otro material de carbono agregado a la matriz de PDMS, grafeno de varias capas o MLG por sus siglas en inglés.

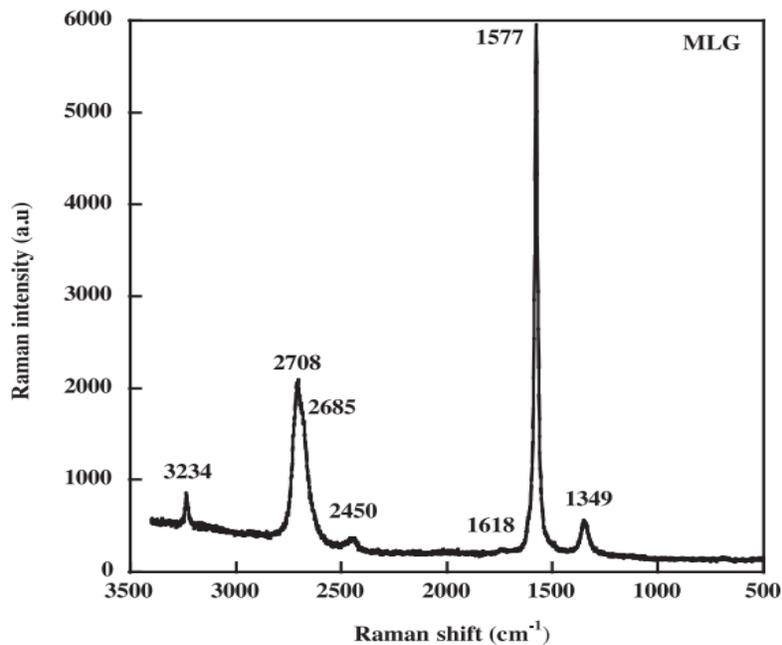


Figura 3.28. Espectro Raman de grafeno de varias capas (MLG) en una matriz de PDMS. [31]

El espectro de este material, al igual que el de la partícula tiene picos de intensidad cerca de 1350 cm^{-1} , 1580 cm^{-1} y 2700 cm^{-1} . El MLG es un material con un mayor grado de orden estructural comparado con los Nanotubos presentados anteriormente, por lo que dentro de la partícula incrustada en la matriz del material del fabricante C es muy posible que se encuentren especies de carbono de alto orden estructural.

El carbono es un material conductor; el negro de humo que se emplea como relleno también lo es, sin embargo, en la cantidad en la que se emplea para fabricar la cubierta de los cables, que es de alrededor de 2% a 5% en peso [32], no afecta significativamente a la

resistividad del polietileno aunque si se aumenta la cantidad de negro de humo se obtiene un material semiconductor, como es el caso de la pantalla semiconductora que se encuentra en los mismos cables; esta pantalla tiene un contenido de negro de humo que va desde 35% hasta 40% en peso [29,33].

Teniendo eso en cuenta, la presencia de aglomerados y partículas como los que se encontraron en el material proveniente de los fabricantes A y C habla de una dispersión heterogénea del relleno empleado. En estos aglomerados la cantidad de carbono es mucho mayor comparada con la matriz, por lo que la conductividad eléctrica en esos puntos también será mayor, además de que se tienen especies de carbono de mayor orden estructural, lo cual incrementa su conductividad aún más. Por lo tanto, estos sitios al estar dentro del aislante, serán más propensos a generar descargas parciales lo que provocará un deterioro mayor a lo largo de todo el aislante.

3.2.3 Pruebas de plano inclinado

A continuación, en la tabla 3.4, se muestran los resultados de tiempo y tensión de falla y pérdida de masa de las muestras de cable de cada fabricante.

Tabla 3.4. Resultados de la prueba de plano inclinado en las muestras de cable [13].

RESULTADOS EN MUESTRAS DE CABLE											
No. de muestra	Fabricante A										
	Tiempo De Falla [hh:mm]	Tensión De Falla [kV]	Masa			Promedios					
			Inicial [g]	Final [g]	Pérdida [g]	Tiempo De Falla [hh:mm]	Tensión De Falla [kV]	Pérdida De Masa [g]			
1	01:03	2.75	200.241	200.051	0.19						
2	00:28	2.5	202.57	202.495	0.075						
3	00:23	2.5	207.353	207.299	0.054	00:43	2.60	0.1072			
4	00:44	2.5	195.031	194.95	0.081						
5	01:01	2.75	202.406	202.27	0.136						
No. de muestra	Fabricante B										
	Tiempo De Falla [hh:mm]	Tensión De Falla [kV]	Masa						Promedios		
			Inicial [g]	Final [g]	Pérdida [g]	Tiempo De Falla [hh:mm]	Tensión De Falla [kV]	Pérdida De Masa [g]			
1	01:18	2.75	148.713	148.027	0.686						
2	01:02	2.75	148.467	147.756	0.711						
3	00:29	2.5	150.626	150.581	0.045	00:51	2.65	0.5705			
4	01:10	2.75	148.752	147.912	0.84						
5	00:18	2.5	150.211	150.236	-0.025*						
No. de muestra	Fabricante C										
	Tiempo De Falla [hh:mm]	Tensión De Falla [kV]	Masa						Promedios		
			Inicial [g]	Final [g]	Pérdida [g]	Tiempo De Falla [hh:mm]	Tensión De Falla [kV]	Pérdida De Masa [g]			
1	00:12	2.5	149.375	149.127	0.248						
2	00:11	2.5	154.438	154.264	0.174						
3	00:05	2.5	148.101	147.91	0.191	00:09	2.50	0.20			
4	00:04	2.5	154.868	154.656	0.212						
5	00:17	2.5	156.594	156.429	0.165						

* el valor número cinco de la pérdida de masa para el fabricante B no fue considerado para el promedio puesto que ocurrió un error en la medición.

Al analizar los datos arrojados por esta prueba, lo más evidente es que el grupo de muestras del fabricante C duró en promedio tan solo 9 minutos, un tiempo significativamente menor comparado con los grupos de muestras de los otros fabricantes. Seguido del grupo C, el grupo A duró en promedio 43 minutos y por último el grupo B que duró 51 minutos. Cabe resaltar que solo algunas muestras del grupo A y B lograron superar la hora prueba. Este comportamiento concuerda con lo visto en la espectrometría Raman, el fabricante C siendo el de peor desempeño y el de mayor concentración de partículas y aglomerados en el aislante, el grupo A, en donde se encontraron aglomerados resistió menos que el grupo B, que fue el único donde no se encontraron aglomerados o partículas.

En cuanto a la tensión de falla, siendo que la mayoría de las muestras no lograron pasar la hora de prueba, fallaron a 2.5 kV, que fue la tensión inicial; las muestras que lograron superar una hora fallaron a 2.75 kV.

La pérdida de masa por su parte, no parece tener una relación obvia con la cantidad de aglomerados encontrados, puesto que el grupo que presentó la menor pérdida de masa fue el grupo del fabricante A, a pesar de no estar libre de defectos. El grupo B presentó la mayor pérdida de masa, aunque debe de tomarse en cuenta que fue el grupo de mayor duración en la prueba, mientras que el grupo C tuvo una pérdida considerable de masa sabiendo el poco tiempo que las muestras resistieron la prueba. Dado que no se encuentra un patrón claro entre el tiempo de falla y la cantidad de masa perdida, es posible que esta característica esté más relacionada a la formulación química específica de cada fabricante que a los defectos que puedan presentar los cables.

Análisis de Resultados

- ❖ Se observó en la prueba de EDS que el relleno empleado en las muestras planas grises contiene rellenos compuestos principalmente por óxidos de silicio, aluminio, calcio, potasio, entre otros elementos. Originalmente se pensaba que estos rellenos podían afectar el desempeño del aislante, sin embargo, en la prueba de plano inclinado el desempeño de las muestras blancas y grises fue muy similar, demostrando que no tienen un papel importante en el desempeño en campo del aislante.
- ❖ Dado que, para las muestras de cable de los tres fabricantes, el patrón obtenido de la prueba de FTIR y de Raman es muy similar, se puede decir que su proceso de fabricación es también similar. No se encontró evidencia de que algún fabricante utilice diferentes rellenos o más aditivos en sus cubiertas.
- ❖ Se encontró que dentro de la cubierta de los cables de los fabricantes A y C existen partículas y aglomerados que contienen grafito, el cual es altamente conductor. La afectación de este tipo de defectos en el desempeño de los cables se hizo notoria en la prueba de plano inclinado, donde el grupo de muestras del fabricante C tuvo el peor desempeño siendo también el grupo donde se encontró mayor concentración de estos defectos. La homogeneidad en la distribución del relleno que se agrega a los cables es una cuestión que debe tomarse en cuenta, no solo para la cubierta, sino también para la pantalla semiconductor, puesto que su proceso de fabricación es el mismo.
- ❖ En la literatura se puede encontrar que las partículas de negro de humo tienden a aglomerarse, fenómeno que se puede mitigar controlando la velocidad con la que gira el tornillo sin fin del extrusor. Esto habla de que los procesos de manufactura, principalmente del fabricante C en este caso, deben corregirse y mejorarse para aumentar sustancialmente la calidad de sus productos.

Conclusiones

- ❖ Las fallas observadas en los cables de media tensión analizados en este trabajo, muy probablemente se deben a la presencia de partículas de grafito en el polietileno del aislante.
- ❖ En las pruebas de plano inclinado, las muestras provenientes del fabricante C presentaron el peor desempeño. En estas muestras se encontró la mayor concentración de partículas de grafito comparadas con las muestras de los otros fabricantes.
- ❖ No se encontró evidencia de que algún fabricante utilice diferentes rellenos o más aditivos en sus cubiertas, lo que deja ver que las diferencias en el desempeño de los cables podrían estar más bien relacionadas con la calidad en la fabricación.

Bibliografía

- [1] Contreras, J.D. (2013). *“Estudio de Problemas de Compatibilidad Dieléctrica en Cables Semi-Aislados para Redes de Distribución”*. Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.
- [2] Espino, F., Ramírez, I., Gómez, P., & Alarcón, V. (2014). *“Performance of a Spacer Cable System Under Polluted Conditions”*. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 30, Num. 6, pp. 13-19.
- [3] Ramírez, I., Espino, F. (2012). *“Electric-Field Analysis of Spacer Cable Systems for Compact Overhead Distribution Lines”*. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 27, Num. 4, pp 2312-2317.
- [4] Roca, I. (2005). *“Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)”* Tesis de Licenciatura de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- [5] Gabriel, L.H. (2011). *“Chapter 1: History and Physical Chemistry of HDPE”*, https://plasticpipe.org/pdf/chapter-1_history_physical_chemistry_hdpe.pdf; Consultado el 02/02/2020.
- [6] Peacock A.J. (2000). *“Handbook of polyethylene structure, properties and applications”*, Editorial Marcel Dekker, Nueva York. ISBN: 0-8247-9546-6.
- [7] *“Unidad Molecular del Polietileno”*. Imagen obtenida de: <https://pslc.ws/spanish/vinyl.htm>. Consultado 17/02/2020.
- [8] Furukawa, et al (2006). *“Molecular Structure, Crystallinity and Morphology of Polyethylene/Polypropylene Blends Studied by Raman Mapping, Scanning Electron Microscopy, Wide Angle X-Ray Diffraction, and Differential Scanning Calorimetry”*, Polymer Journal, Vol. 38, No. 11, pp. 1127–1136.
- [9] Patterson, R., Kandelbauer, A., Müller, U., & Lammer, H. (2014). *“Crosslinked Thermoplastics”*. Handbook of Thermoset Plastics, pp. 697–737.

[10] Carosena, M., Carlomagno, G., Giorleo, G. (2006). “*Encyclopedia of Chemical Processing: Cross-linked Polyethylene*”, Volumen I Editado por Sunggyu Lee. Editorial Taylor & Francis, Nueva York, pp 577-588.

[11] Tamboli, S., Mhaske, S., Kale, D. (2004). “**Crosslinked Polyethylene**” Indian Journal of Chemical Technology, Vol. 11, pp. 853-864.

[12] Góngora, J. (2014). “*La industria del plástico en México y el mundo*” Comercio Exterior, Vol. 64, Núm. 5, pp. 6-9. Obtenido de : http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/761/3/la_industria_del_plastico.pdf
Consultado el 17/02/2020.

[13] Santos, J.C. (2019). “*Medición de la Resistencia a la Erosión por Descargas Superficiales en Cubiertas para Cable Semiaislado*” Proyecto de Ingeniería del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

[14] “*Capítulo II. El cable de energía de media tensión (5-35 [kV])*”. Obtenido de: <https://www.amee.com.mx/clasificaciones/CABLES%20DE%20ENERGIA%20XLP.pdf>. Consultado 11/02/2020.

[15] *Catálogo de productos de Elsewedy Cables*. Obtenido de: <http://www.elsewedyelectric.com/Catalogs/Power%20Cables.pdf>. Consultado 11/02/2020.

[16] “*Cables semiaislados para líneas aéreas de 15 a 38 kV*” (2017). Comisión Federal de Electricidad, Especificación E0000-29. Ciudad de México, México.

[17] Steinbrich, K. “*Influence of semiconducting layers on the attenuation behavior of single-core power cables.*” (2005). IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152 Num. 2, pp.271-276.

[18] *Catálogo de productos de Universal Cable*. Obtenido de: <http://www.ucable.com.my/images/products/UC%20XLPE%20Catalogue.pdf>. Consultado 18/02/2020.

-
- [19] “*Crosshead Extrusion Process (Wire & Cable Coating)*” (2017) PTFE Machinery. Artículo obtenido de: <https://ptfe-machinery.com/crosshead-extrusion-process-wire-cable-coating/>. Consultado 20/02/2020.
- [20] “*Covered conductors for overhead lines and the related accessories for rated voltages above 1kV a.c. and not exceeding 36 kV a.c.*” (2006). British Standard, United Kingdom: BSI.
- [21] “*Material isolante eletrico - Avaliacao da resistencia ao trilhamento e erosao sob condicoes ambientais severas*” (2014). Associacao Brasileira de Normas Tecnicas, Rio de Janeiro: ABNT.
- [22] “*Dielectric Strength*”. ScienceDirect Topics. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/dielectric-strength>. Consultado 12/03/2020.
- [23] “*Crosslinked Polyethylene - XLPE*” (2001). AZO Materials. Artículo obtenido de: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=855>. Consultado 13/03/2020.
- [24] Katsuta, G., Toya, A., Kanaoka, M., Katakai, S., Maruyama, Y., & Muto, H. (1994). “*Effect of defects and moisture on insulation characteristics of XLPE insulated cable*”. *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 114, Num. 4, pp. 93–107.
- [25] Pérez, R. (2005). “*Procesado y Optimización de Espectros Raman mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la identificación de Materiales Pictóricos*”. Tesis de Doctorado de la Universitat Politècnica de Catalunya, Cataluña, España.
- [26] Ferraro, J., Nakamoto, K., & Brown, C. (2003). “*Introductory Raman Spectroscopy*”. 2da Edición Academic Press, Elsevier, California, Estados Unidos de América. ISBN: 978-0-12-254105-6.
- [27] Velandia-Cabra, J. R. (2017). “*Identificación de polímeros por espectroscopia infrarroja*”. *Revista Ontare*, Vol.5, pp. 115-140.
- [28] Benabid, F.Z., et al. (2019). “*Impact of co-mixing technique and surface modification of ZnO nanoparticles using stearic acid on their dispersion into HDPE to*

produce HDPE/ZnO nanocomposites". Journal of Polymers and Polymers Composites, Vol. 27, Num. 7, pp. 389-399.

[29] Li, W., Zhang, C., Zha, J., & Dang, Z. (2018). "*Dispersion of Carbon Blacks and Their Influence on the Properties of Semiconductive Materials used for High-voltage Power Cables*". 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE).

[30] Ibrahim, M., He, H., (2017). "*Classification of Polyethylene by Raman Spectroscopy*". Thermo Fisher Scientific. Artículo obtenido de: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Application-Notes/AN52301-classification-polyethylene-Raman-spectroscopy-app-note.pdf>. Consultado 19/05/2020.

[31] Bokobza, L., Bruneel, J., Couzi, M. (2014). "*Raman spectroscopy as a tool for the analysis of carbon-based materials (highly oriented pyrolytic graphite, multilayer graphene and multiwall carbon nanotubes) and of some of their elastomeric composites*". Journal of Vibrational Spectroscopy, Vol. 74, pp. 57-63.

[32] Lee, C., Borke, J. (2004). "*Factors Affecting the Performance of Carbon Black Master Batches in Wire and Cable Applications*". 2004 Annual Technique Conference (ANTEC), Chicago, IL.

[33] Worzyk, T. (2009). "*Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects*". 2da Edición, Editorial Springer Science & Business Media, Berlin.