



Instituto Politécnico Nacional.

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Unidad Zacatenco

*Medición de la resistencia a la erosión por  
descargas eléctricas superficiales de  
materiales poliméricos.*

Tesis

Que para obtener el título de:

**INGENIERO ELECTRICISTA.**

**Presentan:**

**Francisco Jorge Cuevas**

**Maxaell Peña López**

**Ricardo Martín Sandoval Mendoza**



México D.F. 2016

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

**TEMA DE TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA  
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL  
DEBERA (N) DESARROLLAR C. FRANCISCO JORGE CUEVAS  
C. MAXAELL PEÑA LÓPEZ  
C. RICARDO MARTÍN SANDOVAL MENDOZA

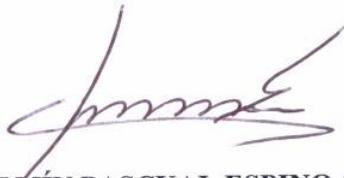
**“MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN POR DESCARGAS ELÉCTRICAS  
SUPERFICIALES DE MATERIALES POLIMÉRICOS”.**

EVALUAR LA RESISTENCIA DE DISTINTOS MATERIALES AISLANTES POLIMÉRICOS A LA EROSIÓN POR  
DESCARGAS ELÉCTRICAS SUPERFICIALES POR MEDIO DE LA PRUEBA DEL PLANO INCLINADO.

- ❖ AISLAMIENTOS POLIMÉRICOS
- ❖ EL MÉTODO DEL PLANO INCLINADO
- ❖ DISEÑO DEL ARREGLO EXPERIMENTAL Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS PRELIMINARES
- ❖ PRUEBAS EXPERIMENTALES EN HULES
- ❖ CONCLUSIONES

CIUDAD DE MÉXICO, A 16 DE MARZO DE 2016.

ASESOR



DR. FERMÍN PASCUAL ESPINO CORTÉS



M. EN C. BALDOMERO GUEVARA CORTÉS

ING. CESAR DAVID RAMÍREZ ORTIZ  
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE  
INGENIERÍA ELÉCTRICA



# Contenido

Glosario.....	viii
Resumen.....	x
Planteamiento del problema.....	xi
Objetivo General.....	xii
Objetivos específicos.....	xii
Justificación.....	xiii
1.1    Generalidades.....	15
1.1.1    Introducción teórica.....	15
1.1.2    Polímeros.....	15
1.1.3    Propiedades de los polímeros.....	16
1.1.4    Descargas parciales.....	18
1.2    Aislamiento polimérico externo para uso en exteriores.....	18
1.3    Degradación en los materiales poliméricos por descargas superficiales.....	20
1.4    Materiales poliméricos compuestos con mayor resistencia a la erosión por descargas superficiales.....	21
2.1    Introducción.....	24
2.2    El método del plano inclinado para evaluar la resistencia a la erosión en compuestos poliméricos.....	24
2.3    Montaje del arreglo para la prueba del plano inclinado.....	26
2.3.1    Muestras de material polimérico para la prueba del plano inclinado.....	26
2.3.2    Procedimiento.....	29
3.1    Introducción.....	34
3.2    Diseño del espacio de prueba.....	34
3.3    Prueba preliminar.....	40
3.4    Evaluación de los resultados de la prueba.....	45
4.1    Prueba a hule natural.....	49
4.1.1    Introducción.....	49
4.1.2    Desarrollo de la prueba al hule natural.....	50
4.1.3    Análisis de resultados.....	54
4.2    Prueba a hule silicón.....	59
4.2.1    Desarrollo de la prueba al hule silicón.....	60
4.2.2    Análisis de resultados.....	60

4.3 Análisis comparativo.....	65
Conclusiones.....	68
Anexos .....	69
Referencias .....	70

## *Tabla de ilustraciones*

Fig. 1.1.1 Monómero-Polímero .....	16
Fig. 1.2.1 Partes del aislador .....	19
Fig. 2.2.1 Muestra del daño por descarga eléctrica en un aislante.....	25
Fig. 2.3.1 Diagrama general de la prueba del "Plano inclinado" .....	26
Fig. 2.3.2 Medidas de la muestra bajo prueba .....	27
Fig. 2.3.3 Electrodo de alta tensión .....	27
Fig. 2.3.4 Electrodo de tierra .....	28
Fig. 2.3.5 Papel filtro .....	28
Fig. 2.3.6 Representación de la prueba del "Plano inclinado" .....	29
Fig. 2.3.7 Inserción del tubo entre los papeles.....	29
Fig. 3.2.1 Soporte de loseta .....	35
Fig. 3.2.2 Arreglo mostrado a 45° de inclinación.....	35
Fig. 3.2.3 Electrodo de tierra y alta tensión respectivamente.....	36
Fig. 3.2.4 Perforación de la loseta .....	36
Fig. 3.2.5 Corte del papel filtro .....	37
Fig. 3.2.6 Barra de empotramiento de las muestras .....	37
Fig. 3.2.7 Barra, resorte y resistencia .....	38
Fig. 3.2.8 Barra, electrodos y loseta .....	39
Fig. 3.3.1 Divisor de tensión.....	40
Fig. 3.3.2 Calibración de la tensión en el osciloscopio para 2.75 kV . .....	41
Fig. 3.3.3 (a) Bomba Peristáltica, (b) Cartucho con sus números de ajuste .....	42
Fig. 3.3.4 Peso del cloruro de sodio para la solución contaminante.....	43
Fig. 3.3.5 Arreglo experimental para la prueba del plano inclinado. ....	44
Fig. 3.3.6 Muestras a punto de finalizar la primera hora de prueba a 2 kV .....	45
Fig. 3.4.1 Muestras al paso del tiempo de prueba .....	46
Fig. 3.5.1 Muestras al fin de la prueba. ....	47
Fig. 4.1.1 Trayectoria carbonizada de una de las muestras .....	49
Fig. 4.1.2 Imagen termográfica del hule con una temperatura máxima de 150°C .....	51

Fig. 4.1.3 Imagen termográfica del hule con una temperatura máxima de 250°C .....	52
Fig. 4.1.4 Imagen termográfica del hule con una temperatura máxima de 300°C .....	53
Fig. 4.1.5 Imagen termográfica del hule silicón con una temperatura máxima de 400°C ..	54
Fig. 4.1.6 Imagen termográfica del hule con una temperatura máxima de 550°C .....	54
Fig. 4.1.7 Muestra al inicio de la prueba .....	55
Fig. 4.1.8 Trayectoria del contaminante.....	56
Fig. 4.1.9 Descargas de mayor energía.....	56
Fig. 4.1.10 Carbonización en dos de las muestras antes de una hora de prueba. ....	57
Fig. 4.1.11 Carbonización en las muestras al final de la prueba. ....	57
Fig. 4.1.12 Grafica de pérdida de masa. ....	58
Fig. 4.2.1 Presencia de descargas en banda seca y trayectorias carbonizadas en algunas de las muestras durante la prueba al hule silicón.....	59
Fig. 4.2.2 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 150°C .....	61
Fig. 4.2.3 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 200°C .....	62
Fig. 4.2.4 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 300°C .....	62
Fig. 4.2.5 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 400°C .....	63
Fig. 4.2.6 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 550°C .....	63
Fig. 4.2.7 Gráfica de masa erosionada.....	64
Fig. 4.2.8 Tiempo promedio a la falla de los dos materiales bajo prueba.....	66

## *Índice de tablas*

Tabla 2.3-1 Flujo del contaminante acorde a la norma ASTM D2303-13 .....	30
Tabla 3.3-1 Relación de tensiones "Divisor-Transformador" .....	41
Tabla 4.1-1 Desarrollo de la prueba al hule natural .....	50
Tabla 4.1-2 Resultados obtenidos de masa erosionada en el hule natural. ....	58
Tabla 4.2-1 Desarrollo de la prueba al hule silicón .....	60
Tabla 4.2-2 Resultados obtenidos con el hule silicón. ....	64

## Glosario

**Polímero:** Se define como macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena.

**Hidrofobicidad:** Es la propiedad que tiene la superficie de un aislante sólido para formar gotas en lugar de formar una película continua de agua cuando existen condiciones de niebla, alta humedad o lluvia ligera.

**Permitividad:** Es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.

**Tracking o trayectoria carbonizada:** Es un fenómeno eléctrico que se produce en los conductores a cualquier voltaje, con la consecuente degradación de los materiales dieléctricos.

Una vez que se produce el Tracking o trayectoria carbonizada es relativamente rápido que se pueda producir la falla en el aislamiento.

**Epoxi:** Una resina epoxi o poliepóxico es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor.

**Erosión eléctrica:** Se define como el desgaste de un material por la acción de descargas eléctricas.

**Resistencia a la erosión:** Característica de un material que se opone al desgaste o erosión eléctrica, causada por descargas eléctricas.

**Pista:** Es la trayectoria que parcialmente realiza el deterioro localizado en la superficie de un material aislante.

**Trayectoria carbonizada:** Pistas carbonizadas que resultan de la acción de descargas eléctricas, y que pueden ser internas en el aislamiento o en su superficie, muchas veces este fenómeno es producto de la contaminación superficial.

**Resistencia a la trayectoria:** Se define como la oposición que se tiene al surgimiento de trayectorias eléctricas que pueden realizar un deterioro al material aislante.

**Tensión de trayectoria inicial:** Tensión aplicada a la que se inicia la formación de trayectorias carbonizadas.

**Tiempo a la pista:** Es el momento en el que la trayectoria carbonizada avanza una distancia específica entre los electrodos y el material de prueba a una tensión determinada.

**Oclusión:** Cierre o estrechamiento que impide o dificulta el paso de un fluido por una vía o conducto de la manguera.

## Resumen

Los aisladores poliméricos han mostrado ser una excelente alternativa como aislamiento externo de alta tensión. Este tipo de aisladores, han venido remplazando a los aisladores cerámicos por presentar ventajas como son: excelente desempeño en ambientes contaminados, bajo peso, y resistencia al vandalismo. Una propiedad importante con la que deben contar estos materiales es la de resistir la presencia de descargas eléctricas superficiales. De lo contrario, como consecuencia de la exposición a descargas superficiales, estos materiales sufren una rápida pérdida de hidrofobicidad, formación de trayectorias carbonizadas y erosión.

En este trabajo de tesis se implementó el método del plano inclinado para evaluar la resistencia a la erosión por descargas eléctricas superficiales de materiales aislantes poliméricos. El arreglo fue diseñado en base a las especificaciones descritas en la norma ASTM D2303-13.

Utilizando este arreglo, se realizaron pruebas a diferentes materiales poliméricos. El procedimiento y criterios para evaluar si las muestras acreditan o no la prueba, fueron los descritos en la norma ASTM D2303-13. Se registró la cantidad de masa erosionada en cada muestra utilizando una balanza de precisión y mediante una cama infrarroja se registró la temperatura que se puede alcanzar durante el proceso de arco en banda seca.

Se muestra cómo la prueba del plano inclinado permite evaluar de manera comparativa la resistencia a la erosión por descargas superficiales de diferentes materiales utilizados en cubiertas de aisladores no-cerámicos.

## Planteamiento del problema

Una de las características más importantes de los aisladores no-cerámicos es la hidrofobicidad que presenta la superficie de su cubierta polimérica. Esta propiedad no permite la formación de películas conductoras continuas de contaminante húmedo, con lo que se evita la aparición de descargas superficiales. Sin embargo, esta propiedad puede perderse con el tiempo por lo que, bajo ciertas condiciones se puede presentar la formación de bandas secas y consecuentemente descargas eléctricas superficiales. Esta descarga eléctrica parcial paulatinamente irá dañando a la superficie del material polimérico, erosionando el material de la cubierta. Una vez que la erosión llega a la barra de fibra de vidrio que proporciona el soporte mecánico, ésta puede rápidamente fallar, provocando la caída de los conductores de fase y como consecuencia la salida de operación de la línea. Por lo tanto, es de suma importancia asegurarse de que los materiales poliméricos de las cubiertas de aisladores no-cerámicos presenten la mayor resistencia posible a la erosión por descargas superficiales.

Conociendo las causas de las degradaciones de los materiales de estudio, podemos analizar y comparar el comportamiento de éstos, acelerando su desgaste mediante pruebas de laboratorio. Una prueba ampliamente utilizada para evaluar la resistencia a la erosión por descargas superficiales es la prueba del Plano Inclinado, prueba que es implementada en este trabajo y mediante la cual se evalúan y comparan diferentes materiales.

## Objetivo General

Evaluar la resistencia de distintos materiales aislantes poliméricos a la erosión por descargas eléctricas superficiales por medio de la prueba del plano inclinado.

### Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un arreglo experimental para realizar las pruebas de plano inclinado.
- Evaluar la magnitud del daño por el arco en banda seca en los materiales en base a la pérdida de masa de las muestras.
- Comparar la resistencia a descargas eléctricas superficiales de distintos materiales poliméricos.

## Justificación.

Los aisladores no-cerámicos o poliméricos, presentan varias ventajas sobre los aisladores cerámicos o de vidrio, por lo que su instalación en sistemas eléctricos de potencia está incrementando de manera significativa en nuestro país. La característica hidrofóbica de la superficie de los materiales poliméricos utilizados en las cubiertas de aislamientos externos, es lo que reduce la posibilidad de la aparición de descargas por banda seca. Lo anterior mejora el desempeño de este tipo de aisladores en ambientes contaminados. Sin embargo, la hidrofobicidad puede perderse temporalmente e incluso de manera permanente, cuando esto ocurre, combinado con humedad del ambiente y el depósito de materiales contaminantes, pueden aparecer descargas eléctricas superficiales sobre el aislador. Actualmente existe un gran número de aisladores disponibles en el mercado, de diferentes marcas y diseños; sin embargo, se ha observado que su desempeño puede diferir significativamente entre fabricantes. Por lo anterior, resulta de gran importancia evaluar la capacidad de los materiales disponibles en el mercado a resistir la erosión por descargas superficiales. Se considera que la mejor opción es realizar pruebas de laboratorio que reproduzcan el fenómeno de la descarga en banda seca.

En este trabajo se implementa un arreglo experimental; conocido como la prueba del plano inclinado, que permite evaluar la resistencia a la erosión por descargas eléctricas superficiales de materiales poliméricos. El arreglo se implementó siguiendo lo establecido en la norma ASTM D2303-13.

# Capítulo 1

Introducción

Aislamientos Poliméricos

## 1.1 Generalidades

### 1.1.1 Introducción teórica.

La palabra polímero se utilizó por primera vez en 1866. Los primeros polímeros se fabricaban de materiales orgánicos naturales provenientes de productos animales y vegetales, el ejemplo más común es la celulosa.

El desarrollo de la tecnología de los plásticos modernos empezó en la década de 1920, cuando se empezaron a extraer las materias primas necesarias para la fabricación de polímeros del carbón y de los productos del petróleo. El etileno fue el primer ejemplo de tal materia prima y se convirtió en el bloque constructivo para el polietileno. El etileno es el producto de la reacción entre el acetileno y el hidrogeno; el acetileno es el producto de la reacción entre el coque y el metano. Los polímeros comerciales, incluyendo el polipropileno, el cloruro de polivinilo (PVC), polimetilmetacrilato y algunos otros son fabricados de una manera similar; estos materiales se conocen como polímeros orgánicos sintéticos. (Schmid, 2002, págs. 177-198) [6]

La amplia aplicación de materiales poliméricos como aislamiento de alta tensión comenzó después de la introducción de resinas epoxi (polímero termoestable) en 1950. Al principio los polímeros eran utilizados en interiores. Por lo que los intentos de utilizar aisladores epóxicos en exteriores en 1960 no tuvieron éxito. Debido a esto, en 1976 la empresa Rosenthal presentó compuestos aisladores hechos de silicona. Desde ese año, la producción de nuevos aisladores aumentó lentamente, pero a partir de 1990 la investigación de estos materiales propició que su fabricación creciera significativamente. (Chrzan, 2009) [3]

### 1.1.2 Polímeros

El término polímeros se deriva de las palabras griegas *poli* (muchas) y *meros* (partes). Estas partes, que se llaman monómeros, se encuentran conectadas entre sí por enlaces covalentes, formando una sola molécula gigante. El proceso de unión de los monómeros para dar lugar a la cadena de polímero se denomina polimerización. (CAMPA, 2007) [2]

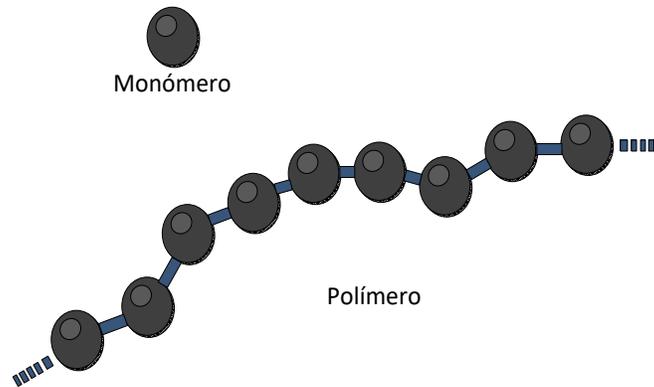


Fig. 1.1.1 Monómero-Polímero

Los polímeros se clasifican en tres grupos, los *naturales* que se obtienen directamente de la naturaleza, de recursos naturales como el algodón, la seda, etc. Los *semisintéticos* son los que se obtienen a partir de la transformación del primer grupo, es decir, de polímeros naturales, entre los que se encuentran el caucho y la nitrocelulosa y los  *sintéticos* que para su obtención debieron ser procesados por el ser humano, por lo que probablemente sean los más utilizados por la industria, como son todos los plásticos, el nylon, el policloruro de vinilo o PVC, etc. (weebly.com, s.f.).

### 1.1.3 Propiedades de los polímeros.

Las propiedades de los polímeros que se utilizan en alta tensión expuestos a la intemperie son:

- La resistencia a la erosión por desgaste eléctrico
- Resistencia a la corona y el ozono
- Resistencia a la degradación física y química por agua
- Resistencia al desgarre
- Resistividad volumétrica
- Hidrofobicidad
- Desglose de intensidad de campo eléctrico
- Resistencia al ataque químico
- La resistencia a la intemperie y los Rayos UV
- La inflamabilidad
- Resistencia al arco eléctrico
- Temperatura de transición vítrea

Las ventajas más importantes de los aisladores compuestos son: elasticidad, peso ligero, resistencia a impulsos mecánicos y la mejor posibilidad de formación. El perfil de los

aisladores poliméricos puede ser complejo y su estructura es más estrecha que la de los cerámicos. Por desgracia, los polímeros son generalmente menos resistentes a las descargas superficiales que los materiales cerámicos, por lo tanto, se implementan algunos métodos para evaluar las propiedades de los polímeros y analizar su comportamiento bajo la influencia de la tensión eléctrica, la humedad y la contaminación.

Las ventajas de los aisladores poliméricos, en comparación con los aisladores de vidrio y porcelana, son las siguientes:

*Peso ligero.* La densidad de los materiales poliméricos es mucho menor que la de los cerámicos, por lo que su peso es menor. Esto ayuda a tener menores costos de construcción y transportación.

- Resistencia al vandalismo. Ya que su estructura es elástica a diferencia de diversos materiales cerámicos que son duros y tienen baja resistencia al impacto debido a sus iones-covalentes.
- Alta resistencia mecánica en relación con su peso. Esto ayuda al diseño de nuevas torres con mayores claros.
- Manufactura de geometrías complejas. La facilidad para moldear un polímero favorece la reducción en los costos de producción.
- Mejores niveles de tensión de aguante en comparación con aisladores cerámicos y de vidrio.
- Mejor comportamiento en ambientes contaminados. Esto es gracias a su propiedad hidrofóbica.
- Su uso reduce los costos por mantenimiento en comparación con los aisladores cerámicos convencionales, especialmente cuando éstos se encuentran en ambientes con altos niveles de contaminación.
- Mejora la estética de la línea de transmisión.

- Son más económicos. Debido a que su costo de producción es menor, aunque no a todos los niveles de tensión.

#### 1.1.4 Descargas parciales.

Una descarga parcial es un fenómeno de ruptura dieléctrica que está confinado y localizado en cierta región de un medio aislante, es decir, entre dos conductores que se encuentren a una diferencia de potencial, en este caso un aislador de material polimérico.

El análisis de descargas parciales (PD) es un enfoque proactivo del diagnóstico que utilizan los medidores de descargas para evaluar la integridad del equipo aislante. Estas mediciones se pueden tomar de forma continua o intermitente y se detectan en línea o fuera de línea (con carga o sin carga). Los resultados obtenidos se utilizan como criterio para un posible mantenimiento del aislamiento o equipo.

Debido a diversas investigaciones en los materiales dieléctricos, se sabe que estos tienen un límite de resistencia a la erosión característico.

Los niveles de descargas parciales no sólo proporcionan una alerta temprana de un daño inminente del equipo o conductor, sino que también aceleran el proceso de degradación del aislamiento. Las descargas parciales se pueden clasificar en:

- Descargas internas: ocurren en oclusiones de baja rigidez dieléctrica, usualmente cavidades llenas de gas.
- Descargas superficiales: se presentan cuando la componente tangencial del campo eléctrico paralelo a una superficie dieléctrica es elevada, como en las terminales de los cables de alta tensión o superficies contaminadas.
- Descargas corona: se presentan en los gases cerca de las puntas de las superficies dieléctricas, donde la concentración del campo eléctrico es lo suficientemente alta para provocar ruptura parcial del aire circundante [1].

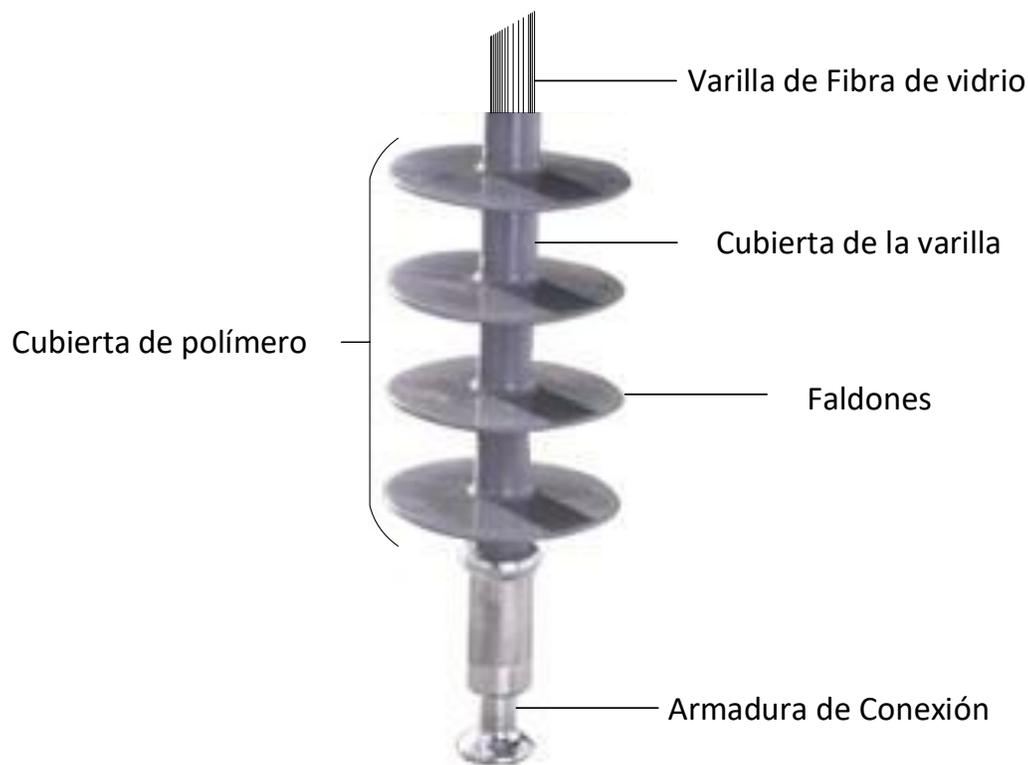
#### 1.2 Aislamiento polimérico externo para uso en exteriores.

Las constantes modificaciones de características físicas y químicas en los materiales poliméricos han hecho que la instalación de éstos sea una opción cada vez más aceptada en zonas que presentan alta suciedad, frecuente contaminación, y altas temperaturas, ya

que debido a sus propiedades hidrofóbicas suelen ser menos afectados por estas condiciones.

Dichas modificaciones en su estructura han mejorado significativamente su desempeño como recubrimientos para aislamientos externos, por lo que su uso ha aumentado significativamente no solo en aisladores sino también en boquillas o terminales de cables.

La Fig. 1.2.1 Partes del aislador muestra a detalle la estructura.



*Fig. 1.2.1 Partes del aislador*

**Varilla de fibra de vidrio:** La varilla de fibra de vidrio es el elemento que proporciona la rigidez mecánica del aislador del polímero. Nunca debe ser expuesto a la intemperie.

**Cubierta:** Es el recubrimiento moldeado sobre la barra de fibra de vidrio cuya composición es de material polimérico.

**Cubierta de la varilla:** Su función principal es mantener el agua fuera de la barra y protegerla de la radiación ultravioleta (UV).

**Faldones:** Pueden ser planos, cóncavos o en forma de cono. A veces se instalan con diámetros alternantes. La función de la cubierta es aumentar la distancia de fuga y por lo tanto el desempeño del aislador en ambientes contaminados.

**Armadura de conexión o herrajes comprimidos:** Es un elemento mecánico, que se utiliza para la transferencia de carga, que va desde la varilla de fibra de vidrio a la estructura que a su vez se conecta al conductor, por lo general son de acero galvanizado, pero a veces se utilizan de aluminio. En la cruceta al final del herraje existe un sello hermético de caucho para que no permita filtración de humedad.

Resultados de pruebas y la experiencia adquirida han mostrado que, en caso de contaminación, el hule silicón tiene un desempeño mucho mejor que el EPR (del inglés Ethylene-PropyleneRubber).

### 1.3 Degradación en los materiales poliméricos por descargas superficiales.

La aparición de una descarga superficial se deriva de un aumento del campo eléctrico en un espacio específico. Este aumento se debe muchas veces a la contaminación a la que se encuentran expuestos los aislamientos, en combinación con humedad. Con el tiempo estas descargas provocan la pérdida de la hidrofobicidad y la erosión del material de la cubierta.

El tiempo desde la aparición de las descargas hasta la perforación del material de la cubierta puede ir desde unos cuantos cientos de minutos hasta años.

Las descargas eléctricas superficiales en aisladores son provocadas principalmente por dos posibles causas:

- 1) Una distribución altamente no lineal del campo eléctrico a lo largo del aislador y que no se utilizan sistemas de alivio de campo, como pueden ser los anillos equipotenciales.

- 2) Un intenso campo eléctrico local en presencia de un contaminante húmedo.

En lo que respecta a la distribución no uniforme del campo eléctrico a lo largo del aislador, éste se determina por la geometría y la distribución capacitiva a través del mismo, mientras que, en presencia de un contaminante húmedo, el reforzamiento del campo eléctrico depende de la formación de bandas secas bajo humedad y contaminación.

#### 1.4 Materiales poliméricos compuestos con mayor resistencia a la erosión por descargas superficiales.

Aunque los materiales poliméricos son idóneos para el aislamiento de cables de energía eléctrica, su degradación es inminente en cualquier entorno en el que se hayan instalado; sin embargo, esta erosión suele ser más severa en exteriores, donde el recubrimiento polimérico está expuesto a la intemperie. Por lo tanto, con el fin de tener un polímero con características específicas que mejore sus propiedades como aislante, éstos se deben mezclar con distintos aditivos. Estos aditivos modifican y mejoran ciertas características del polímero, como la rigidez, color, resistencia a la intemperie, flamabilidad, resistencia al arco eléctrico, etc.

Debido a varias ventajas que presentan los aisladores poliméricos sobre los cerámicos, se ha generado una creciente aceptación para su uso en la industria eléctrica. Una de estas ventajas se puede ver en el caso de las boquillas, aplicación en la cual el uso de materiales cerámicos ha llegado a causar graves accidentes durante una falla. La porcelana puede estallar en pedazos, que pueden dañar a los equipos cercanos e incluso a personas que se encuentren cerca del percance. Muchos fabricantes de transformadores han adoptado el uso de boquillas poliméricas pues estas reducen de manera significativa los riesgos por explosión durante una falla. Otro ejemplo se tiene en el caso de los apartarrayos con cubiertas poliméricas, pues que su ligereza los hace más versátiles en su montaje.

Particularmente, los hules de silicón son polímeros con las siguientes propiedades: son inodoros e incoloros hechos a base de silicio, inertes y estables a altas temperaturas, útiles para múltiples aplicaciones industriales y médicas. Este material al igual que mucho de los aislamientos no cerámicos, comparte muchas de las características generales ya

mencionadas anteriormente, no obstante, se enlistarán a continuación las características propias de este material.

- Resistente a la intemperie, ozono, radiación y humedad.
- Excelentes propiedades eléctricas como aislador.

Propiedades particulares de los hules silicón:

- No segrega líquidos, así se evita su deterioro, ensuciamiento y/o corrosión sobre los materiales que estén en contacto con el mismo.
- Tiene gran resistencia a todo tipo de uso.

Aplicaciones en sistemas de potencia:

- Accesorios del cable.
- Aisladores y apartarrayos.
- Recubrimiento de hule silicón
- Apto para ser usados en todo tipo de clima.

La absorción de agua por grupos polares como ocurre en las poliamidas influye notablemente en la conductividad. El polietileno y policloruro de vinilo son los materiales aislantes más ampliamente utilizados en aislamiento de cables, debido a sus propiedades dieléctricas, buena resistencia al envejecimiento y al deterioro por agentes contaminantes combinados con agua.

# Capítulo 2

El método del plano  
inclinado

## 2.1 Introducción

La prueba de plano inclinado fue propuesta por Mathes y Gowan en 1961 y fue estandarizada como la ASTM D2303 en 1964. El método de plano inclinado es una de las pocas pruebas que demuestran la resistencia de los materiales aislantes sólidos a la erosión y a la formación de trayectorias carbonizadas causadas por descargas superficiales.

La prueba del plano inclinado tiene como principal objetivo el de evaluar la resistencia a la erosión de los materiales aislantes poliméricos que se encuentran a la intemperie y son dañados por las descargas superficiales. Durante dicha prueba, mediante la generación de arco en banda seca, se erosiona el material de una manera acelerada. La magnitud de la erosión y/o el tiempo en que ésta alcanza una longitud determinada se registrada como un parámetro que permite comparar diferentes materiales o verificar que el material cumple con los requerimientos mínimos establecidos en estándares. A continuación se describe la prueba del plano inclinado.

## 2.2 El método del plano inclinado para evaluar la resistencia a la erosión en compuestos poliméricos.

La muestra se fija en un ángulo de 45 ° y el líquido contaminante fluye a través de la superficie inferior de la muestra de prueba. El método consta de dos procedimientos alternativos de prueba:

1. Se prueba con una tensión constante durante 6 horas.
2. La tensión se incrementa 250 V por cada hora transcurrida.

Se considera que la muestra pasa la prueba cuando después de 6 horas, el deterioro o carbonización entre los electrodos es menor de 25 mm. Si la erosión en una de las muestra rebasa los 25 mm durante la prueba, esta muestra se retira y no pasa la prueba. El criterio adicional es la pérdida de masa en el aislamiento polimérico que se mide después del secado del mismo.

Cuando se aplica tensión y un flujo de líquido contaminante, se forma una banda seca y las descargas eléctricas aparecen, típicamente en el electrodo inferior. Esta actividad de descarga localizada y persistente eleva la temperatura y provoca la degradación del material. El aumento de la temperatura debido a la magnitud de la corriente de la descarga en la superficie depende de las características térmicas del material y sus Fig. 2.2.1. En la Figura 2.2.1 se presenta una muestra erosionada en la zona del electrodo inferior (aterrizado).



*Fig. 2.2.1 Muestra del daño por descarga eléctrica en un aislante*

El contaminante líquido se suministra por medio de una bomba peristáltica (bomba dosificadora), la cual bombea este líquido con un flujo determinado sobre la muestra de polímero. La muestra se coloca a 45° de tal manera que las descargas eléctricas se mantengan constantes durante el transcurso de la prueba.

El grado de conductividad del líquido contaminante se considera un valor representativo de condiciones de contaminación severas.

### 2.3 Montaje del arreglo para la prueba del plano inclinado

Por el uso de alta tensión en esta prueba es esencial que todo el equipo eléctrico y conexiones sean diseñados e instalados correctamente para un desarrollo seguro de la prueba. Un diagrama esquemático de la prueba se muestra en la Fig. 2.3.1.

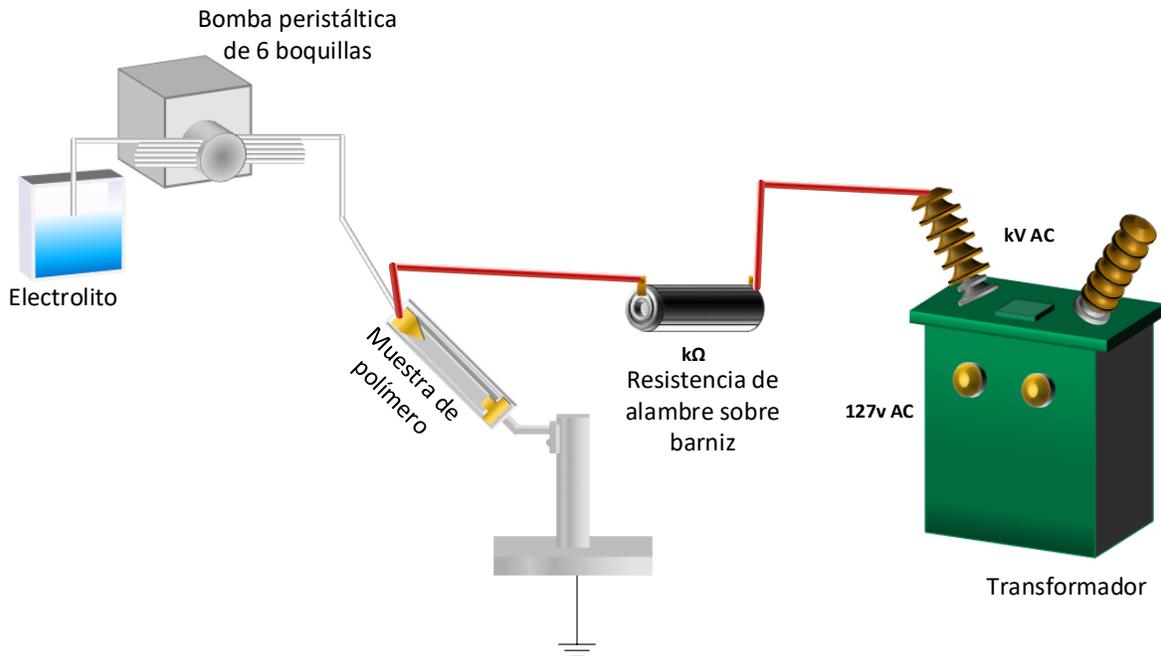


Fig. 2.3.1 Diagrama general de la prueba del "Plano inclinado"

#### 2.3.1 Muestras de material polimérico para la prueba del plano inclinado

Las muestras de polímero para la prueba deben tener una superficie plana de aproximadamente  $50 \times 120 \times 6.5$  mm. Las muestras deben tener un espesor de entre 6.35 y 12.7 mm, como se muestra en la Fig. 2.3.2. El espesor se recomienda para que la pista por desgaste eléctrico no perfora la muestra rápidamente durante la prueba.



Fig. 2.3.2 Medidas de la muestra bajo prueba

Las muestras de la prueba se montan sobre un soporte individual y se colocan sobre una placa de apoyo hecha de un material inerte no conductor. Se fijan los soportes para asegurar que el contaminante no fluya a un costado de la muestra, ya que esto puede arrojar resultados erróneos y aumentar la incertidumbre de los resultados.

La muestra bajo prueba se conecta entre dos electrodos, a través de los cuales se suministra la alta tensión. El electrodo superior se conecta a la alta tensión y el inferior a tierra, la forma y dimensiones de los electrodos se muestran en la Fig. 2.3.3 y en la Fig. 2.3.4.

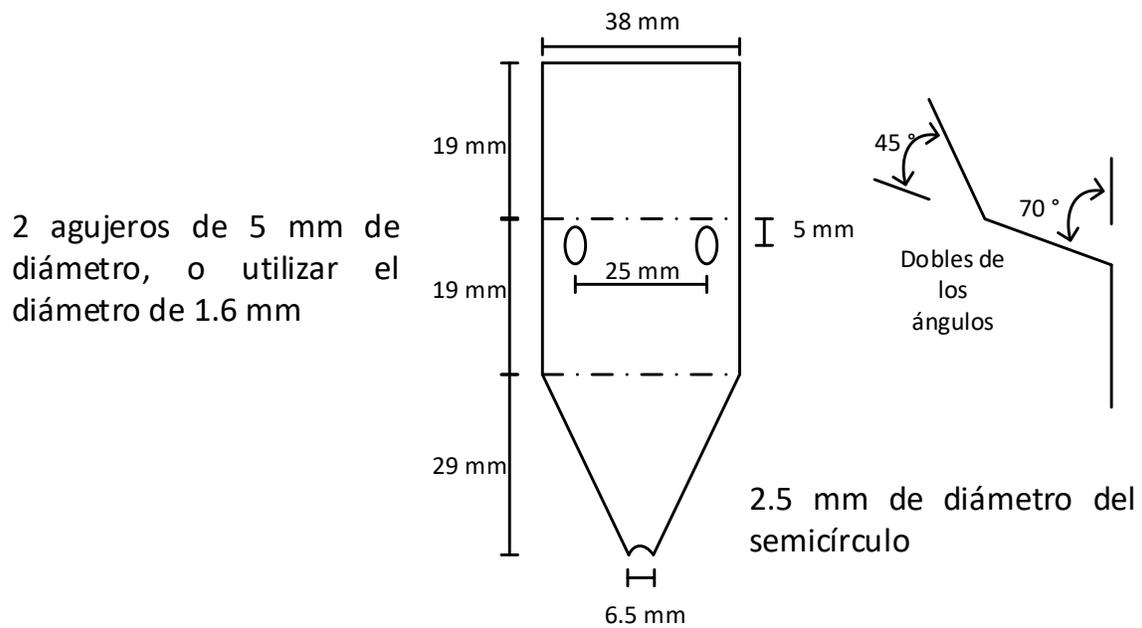


Fig. 2.3.3 Electrodo de alta tensión

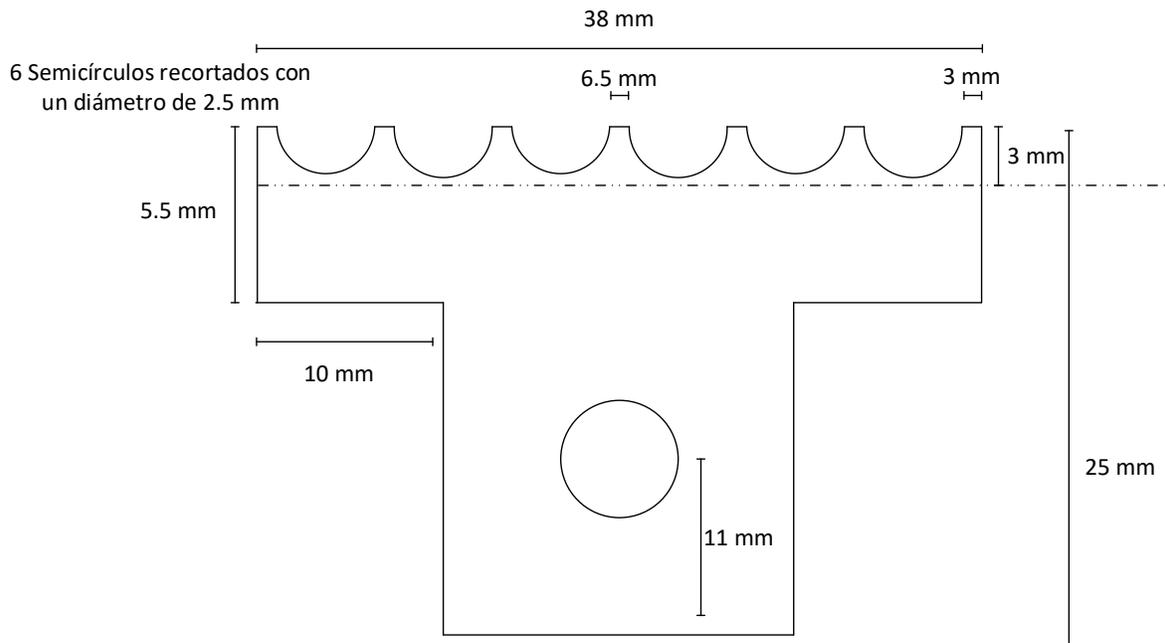


Fig. 2.3.4 Electrodo de tierra

Entre el electrodo de alta tensión y la muestra bajo prueba se colocan 8 pliegues de papel filtro, los cuales tienen como principal función evitar el paso de impurezas hacia la muestra. El diseño del pliegue es el que se muestra a continuación en la Fig. 2.3.5.

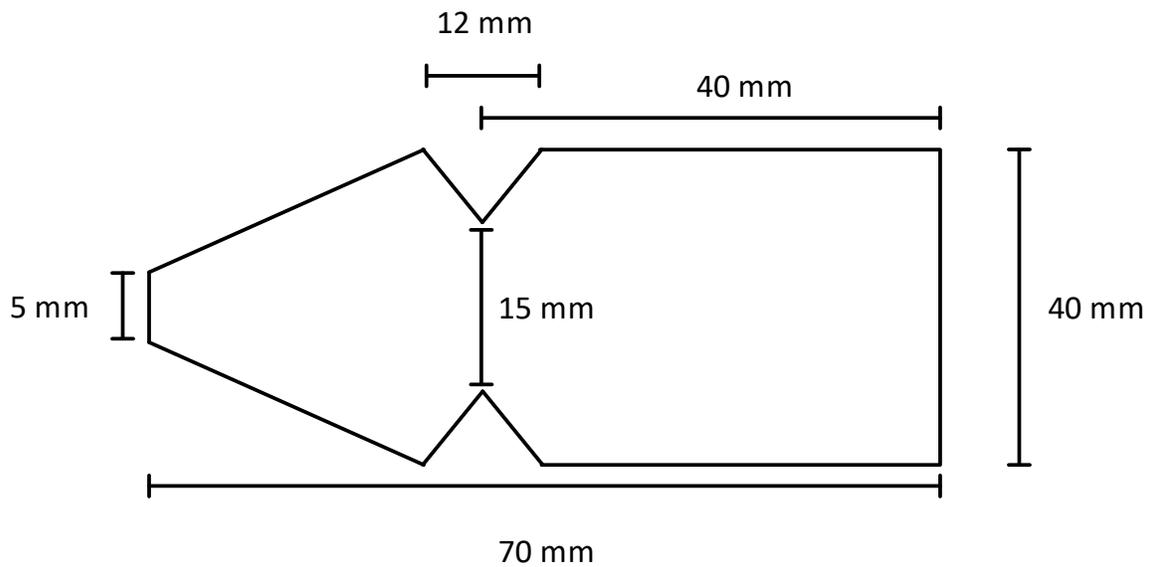


Fig. 2.3.5 Papel filtro

### 2.3.2 Procedimiento.

Se fija la muestra de polímero sobre el soporte a un ángulo de 45 ° de la horizontal como se muestra en la Fig. 2.3.6. Se coloca el tubo suministrador de contaminante entre los ocho papeles filtro como se muestra en la Fig. 2.3.7 .

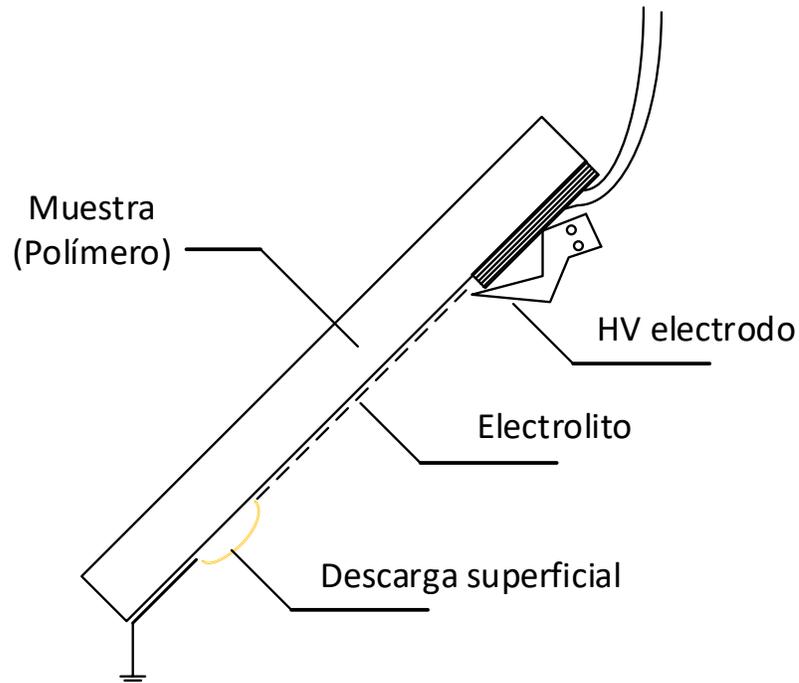


Fig. 2.3.6 Representación de la prueba del "Plano inclinado"

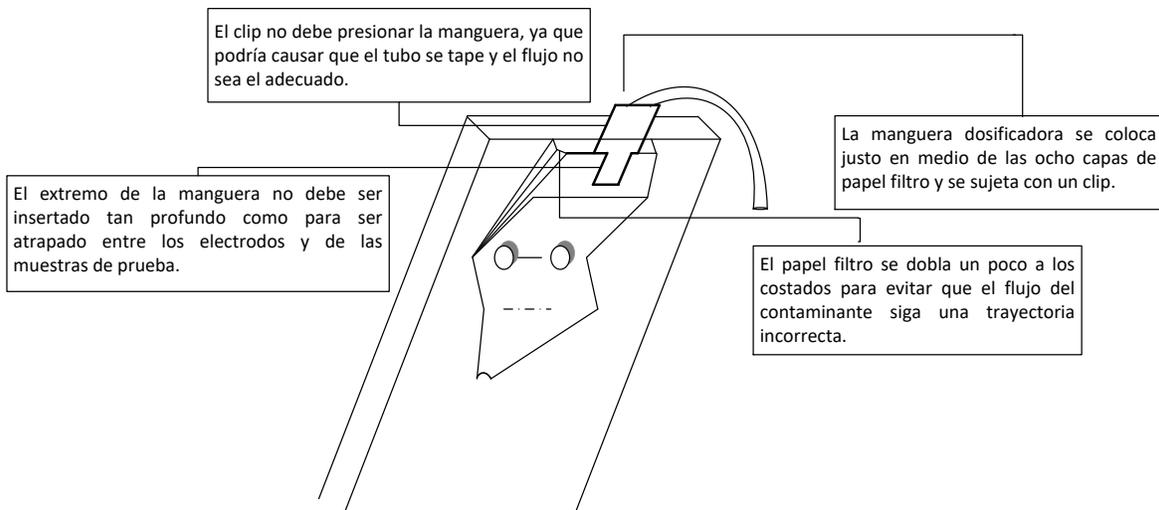


Fig. 2.3.7 Inserción del tubo entre los papeles

Al comienzo de cada una de las pruebas, se reemplaza el líquido residual del vaso de suministro por contaminante nuevo. Se cubren los contenedores del contaminante para evitar que la contaminación del lugar afecte al líquido.

La composición del líquido conductor contaminante es de 0.1% (en peso) de cloruro de sodio (grado reactivo) y de 0.02% (en peso) de agente humectante no iónico en 8 pulgadas de agua destilada. Esta solución contaminante debe tener una resistividad entre  $385 \pm 15 \Omega\text{-cm}$  cuando se mide a una temperatura de  $23 \pm 1^\circ \text{C}$ .

El ajuste de la bomba peristáltica y su calibración se describen en el anexo A1. Para calibrar el caudal con respecto a la tensión se aplica la Tabla 2.3-1

*Tabla 2.3-1 Flujo del contaminante acorde a la norma ASTM D2303-13*

Tasa de aplicación de 0.1% de NaCl-0.02% agente hidratante, (mL/min)	Rango de tensión, (kV)	Resistencia en serie, ( $\Omega$ )
0.075	1.0 a 1.75	1 000
0.15	2.0 a 2.75	10 000
0.30	3.0 a 3.75	50 000
0.60	4.0 a 4.75	50 000
0.90	5.0 a 6.0	50 000

NOTA 1-Las tasas de aplicación de contaminantes que se muestran en esta tabla son adecuadas sólo para los contaminantes que tienen una resistividad de  $385 \pm 15 \Omega \cdot \text{cm}$  y una temperatura de  $23 \pm 1^\circ \text{C}$ . En muestras porosas verificar el flujo de contaminantes y, si es necesario, aumentar su flujo para mantener la descarga de manera eficaz. En resistividades más bajas de contaminantes también requerirán una mayor tasa y para resistividades superiores, una menor tasa de aplicación de contaminante; esto se determina experimentalmente. Al tener altas descargas, la tasa de contaminante se reducirá en gran medida debido a que la corriente fluirá en la superficie sin interrupciones. Es decir, en una tasa que contiene muy baja solución, se reduce la distancia y en las tensiones más elevadas

se elimina electrostáticamente, de modo que sólo produce un centelleo en intervalos de ráfagas dispersas.

Nota 2- Esta condición de flujo estable, será observada durante 5 minutos en el porcentaje de bombeo normal de la prueba indicado en Tabla 2.3-1 y no en un porcentaje acelerado de calibración manual[4].

La tensión que se aplica, es variable con base en el flujo del líquido contaminante que se bombea al polímero bajo prueba al igual que la resistencia que se utiliza en serie con el electrodo que conecta al polímero.

Para cada prueba se reemplaza el líquido usado por nuevo en los tubos, dejando fluir una cantidad constante (Nota 2) en la cara de la muestra de ensayo entre los electrodos.

Antes de energizar e iniciar la prueba se suministra líquido contaminante a través de las mangueras en el papel filtro, permitiendo que éste se moje completamente. El contaminante debe fluir desde el orificio de la parte inferior del electrodo de alta tensión y no desbordarse por los lados o por la parte superior del papel. Se ajustan las muestras de modo que el contaminante fluya hacia abajo lo más cerca posible de la línea central de la muestra. Se evitan corrientes de aire sobre el equipo, que puedan provocar incertidumbre en los resultados.

Una forma de aplicar tensión entre los electrodos y formar la banda seca es aumentando la tensión en pasos de 250 V y mantener la tensión por 1 hora (a menos que se produzca la falla del aislamiento). Posteriormente, se aumentan otros 250 V para la siguiente etapa.

Una tensión de prueba inicial se determina de manera que la falla de la banda seca no se produzca antes del tercer incremento de tensión (entre 2 y 3 horas), así como el ajuste de la velocidad en la aplicación del líquido contaminante a fin de mantener las descargas eléctricas constantes en las diferentes etapas de suministro de tensión. (Al comienzo de cada una de las pruebas, se reemplaza el líquido residual del vaso de suministro por contaminante nuevo. Se cubren los contenedores del contaminante para evitar que la contaminación del lugar afecte al líquido.

La composición del líquido conductor contaminante es de 0.1% (en peso) de cloruro de sodio (grado reactivo) y de 0.02% (en peso) de agente humectante no iónico en 8 pulgadas de agua destilada. Esta solución contaminante debe tener una resistividad entre  $385 \pm 15$   $\Omega$ -cm cuando se mide a una temperatura de  $23 \pm 1$  ° C.

El ajuste de la bomba peristáltica y su calibración se describen en el anexo A1. Para calibrar el caudal con respecto a la tensión se aplica la **Tabla 2.3-1**

Tabla 2.3-1 [4]

La prueba finalizará al observar el inicio de una banda seca que progresivamente erosiona el material polimérico; se verifica que la erosión no rebase los 25 mm o que las descargas no perforen el material, de lo contrario se detiene la prueba y se finaliza para la muestra en cuestión [4].

El tiempo transcurrido en la etapa en que inicia la banda seca es proporcional al valor de la tensión en la que se origina la erosión del material, por lo tanto, su registro es importante para la observación y comparación.

# Capítulo 3

Diseño del arreglo  
experimental y realización  
de pruebas preliminares

### 3.1 Introducción

En este capítulo se describe la construcción del arreglo para la prueba del plano inclinado y se presentan los resultados de una prueba preliminar realizada con el arreglo ya construido. En la prueba preliminar, cinco muestras de polímero fueron evaluadas de manera simultánea como lo establece la norma.

### 3.2 Diseño del espacio de prueba.

El espacio donde se realiza la prueba es dentro de una jaula de Faraday que cuenta con las medidas de seguridad para el personal y el equipo, y que cuenta con un sistema de tierras adecuado.

Dentro de esta jaula se tienen las muestras de polímero que serán sometidas hasta una tensión máxima de 6 kV, por un tiempo máximo de 6 horas en caso de que estas no fallen antes.

Antes de energizar las muestras, es importante verificar que el electrolito contaminante fluya adecuadamente a través de la superficie del polímero y que tenga contacto con el electrodo conectado a tierra.

Se debe de generar una película continua del contaminante en la superficie de la muestra del polímero, y que al terminar su trayecto sea drenado en un recipiente, donde no interfiera como un factor externo que humedezca a las muestras sometidas a la prueba.

Como se muestra en la Fig. 3.2.1 Soporte de losetase cortó una loseta de cerámica cuya función es sostener la muestra de polímero, la cual se fija junto con los electrodos por medio de tornillos metálicos.



*Fig. 3.2.1 Soporte de loseta*

La parte inferior de la loseta de cerámica se atornilla a una solera que tendrá dos dobleces uno con un ángulo a  $45^\circ$  y otro invertido a  $90^\circ$  respecto a la horizontal y ésta a su vez se sujeta a una barra de aluminio como la que se muestra en la Fig. 3.2.2.



*Fig. 3.2.2 Arreglo mostrado a  $45^\circ$  de inclinación*

La Fig. 3.2.3 muestra el par de electrodos utilizados, tanto del lado de tierra como del de alta tensión, hechos con las medidas señaladas en la norma . Primero se marcan sobre la

lámina de acero inoxidable y posteriormente se cortan y perfora haciendo coincidir las perforaciones con las del soporte cerámico.



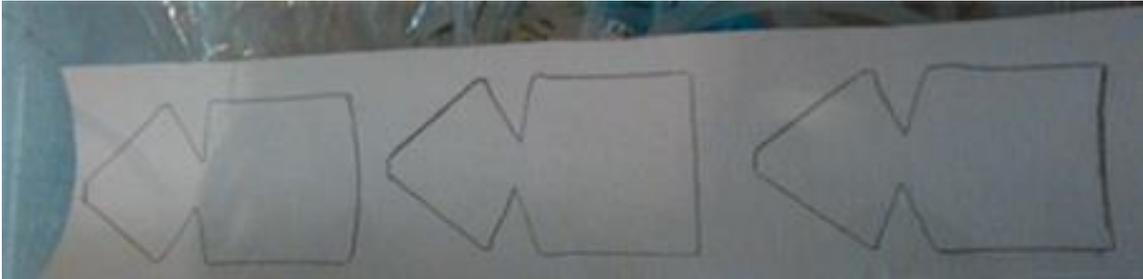
*Fig. 3.2.3 Electrodo de tierra y alta tensión respectivamente*

El soporte de loseta es perforado como se muestra en la Fig. 3.2.4.



*Fig. 3.2.4 Perforación de la loseta*

Para dimensionar los ocho filtros que se utilizan en cada prueba tanto las pruebas preliminares como las experimentales, se creó un patrón del diseño basado en las medidas normalizadas, para poder trazarlos en el papel filtro, y después recortarlos, como a continuación se muestra en la Fig. 3.2.5.



*Fig. 3.2.5 Corte del papel filtro*

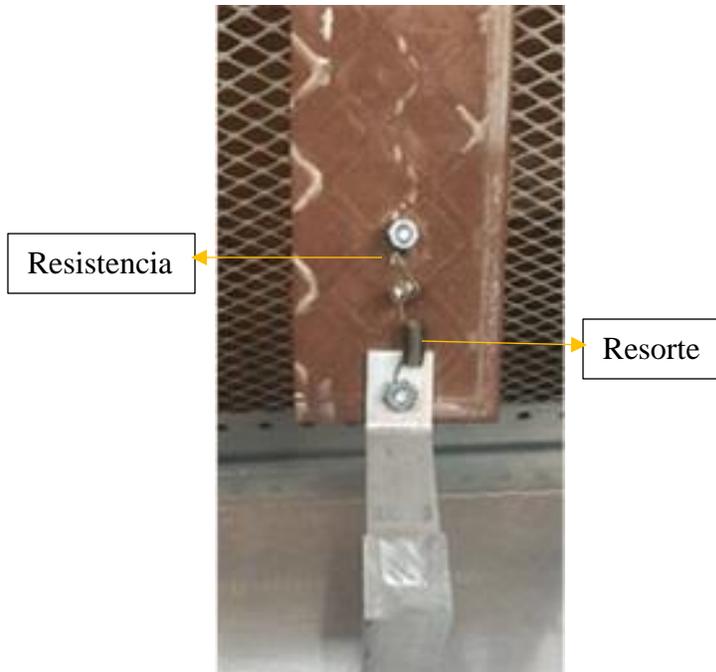
Para colocar las barras de aluminio de cada una de las cinco muestras bajo prueba, se empotró el ángulo de aluminio a la lámina de acero inoxidable igualando simétricamente los orificios de las barras y conectándolos a tierra, como se muestra en la Fig. 3.2.6.



*Fig. 3.2.6 Barra de empotramiento de las muestras*

Un elemento de gran importancia en el arreglo es una resistencia cerámica de medio watt que se utiliza para conectar, a través de un resorte tensado, el electrodo de tierra a la tierra física del sistema. Esta resistencia sirve de protección contra sobre corrientes que pudieran presentarse durante una falla completa de la muestra. Ante una corriente elevada la resistencia se carboniza y por la tensión mecánica del resorte se desprende, interrumpiendo el flujo de corriente a tierra.

En la Fig. 3.2.7. Se puede apreciar la resistencia y el resorte en la parte posterior del soporte de loseta, conectados al electrodo de tierra; el resorte en la parte inferior de la loseta se fija a la solera y ésta se sujeta a la barra, como se muestra en la misma figura.



*Fig. 3.2.7 Barra, resorte y resistencia*

En la Fig. 3.2.8 se muestran los electrodos, el soporte cerámico, la solera y la barra de aluminio ya ensamblados en una sola pieza. Dicha pieza, se fija a la barra de aluminio y el ángulo que irán sujetos a la base metálica (nodo conectado a tierra física).



*Fig. 3.2.8 Barra, electrodos y loseta*

### 3.3 Prueba preliminar

Es importante que durante la prueba del plano inclinado, se asegure que la tensión de salida del transformador y el flujo del líquido contaminante que sale de la bomba peristáltica se mantengan constantes, de lo contrario esto puede afectar considerablemente los resultados.

Para variar la tensión de salida del transformador se emplea un reóstato en el lado primario. La medición en el lado de alta tensión se realiza a través de un divisor resistivo, el cual se muestra en la Fig. 3.3.1. La constante de atenuación de este divisor resistivo se determinó tomando como patrón de referencia a una punta atenuadora de alta tensión para osciloscopio. La punta atenuadora y el osciloscopio utilizados se muestran en la Fig. 3.3.2

Tabla 3.3-1 se muestra la tensión registrada en el lado de baja tensión del divisor para los pasos de tensión que se utilizarán en la prueba.



*Fig. 3.3.1 Divisor de tensión*



4.50	4.5
4.75	4.8
5.00	5.1
5.25	5.4
5.50	5.7
5.75	6
6.00	6.3

La bomba peristáltica que se utilizó es una bomba Peristáltica, Marca: Masterflex L/s, con un cabezal tipo cartucho multicanal L/s, la cual se muestra en la Fig. 3.3.3 (a). Los cartuchos, ver Fig. 3.3(b) requieren ajustarse de oclusión para asegurar el flujo correcto de acuerdo al control de la bomba, estos ajustes se indican en el anexo A1.3. Si el ajuste no es el adecuado, el tubo tiende a fragmentarse internamente, y el cabezal comienza a tener fuertes vibraciones. El ajuste en los cartuchos se muestra en la Fig. 3.3.3(b).



(a)

(b)

Fig. 3.3.3 (a) Bomba Peristáltica, (b) Cartucho con sus números de ajuste

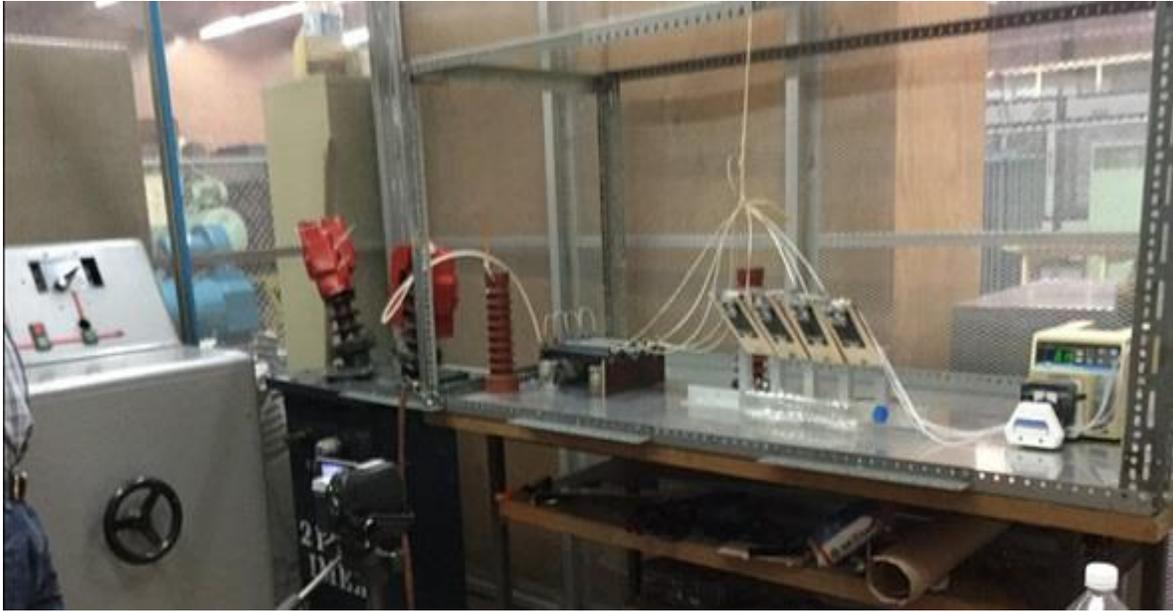
Una solución salina es el electrolito contaminante empleado en esta prueba, por lo que es de gran importancia mezclar las cantidades adecuadas de agua destilada y el cloruro de sodio. La solución es al 0.1 %, es decir, que por cada litro de agua destilada se agrega un gramo de sal, en la Fig. 3.3.4 se muestra la balanza de precisión utilizada para pesar el cloruro de sodio.



*Fig. 3.3.4 Peso del cloruro de sodio para la solución contaminante.*

Una vez instaladas las muestras en el soporte, su superficie debe limpiarse con agua destilada para eliminar cualquier tipo de impurezas que pudiesen estar depositadas en la sección entre electrodos. El arreglo completo se muestra en la Fig. 3.3.5

La tensión inicial debe elegirse de acuerdo al tipo de material. Para materiales de alta resistencia a la erosión es posible iniciar con tensión de 3 kV para que sea posible alcanzar grado de erosión que permita comparar el material con respecto a algún otro material de referencia. En este caso, no se tenía conocimiento del grado de resistencia a la erosión del material por lo que se inició con una tensión de 2 kV con incrementos de 250 V cada hora. Después de un tiempo aparecieron las bandas secas, que posteriormente generaron trayectorias carbonizadas, llegando a la erosión del polímero bajo prueba (hule natural color ámbar).



*Fig. 3.3.5 Arreglo experimental para la prueba del plano inclinado.*

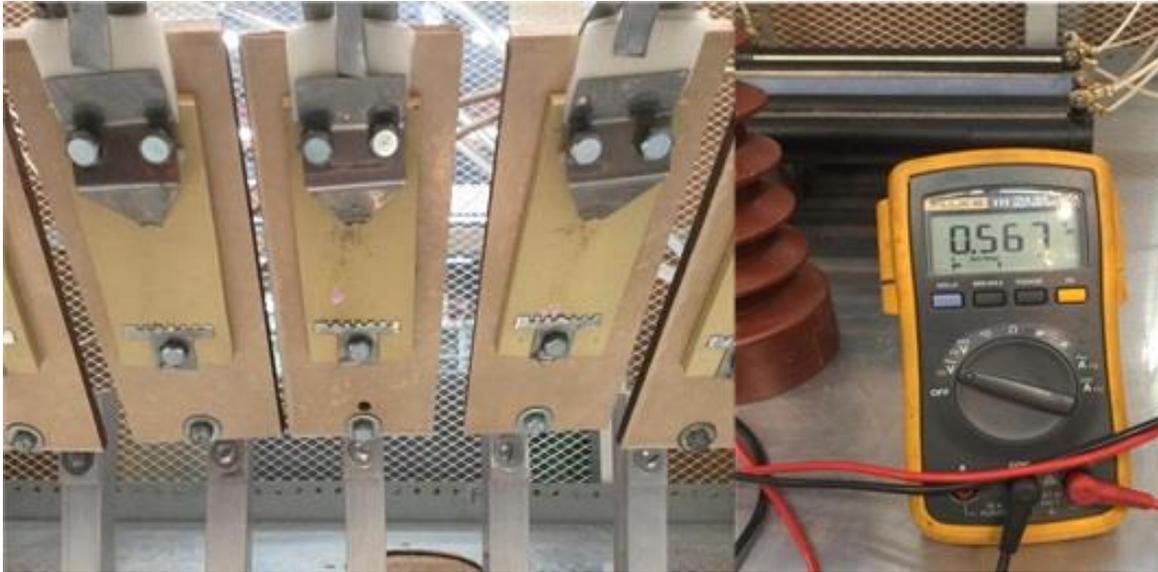
Las tensiones se fueron elevando gradualmente, a partir de 2 kV, con incrementos de 250 V, y modificando el flujo de contaminante y cambiando la resistencias limitadoras de acuerdo a la Al comienzo de cada una de las pruebas, se reemplaza el líquido residual del vaso de suministro por contaminante nuevo. Se cubren los contenedores del contaminante para evitar que la contaminación del lugar afecte al líquido.

La composición del líquido conductor contaminante es de 0.1% (en peso) de cloruro de sodio (grado reactivo) y de 0.02% (en peso) de agente humectante no iónico en 8 pulgadas de agua destilada. Esta solución contaminante debe tener una resistividad entre  $385 \pm 15 \Omega\text{-cm}$  cuando se mide a una temperatura de  $23 \pm 1^\circ \text{C}$ .

El ajuste de la bomba peristáltica y su calibración se describen en el anexo A1. Para calibrar el caudal con respecto a la tensión se aplica la Tabla 2.3-1

Tabla 2.3-1 , todo esto siguiendo el procedimiento indicado en la norma (International, 2013) [4].

En la primera hora, con una tensión de 2 kV, las cinco muestras prestaron pequeñas zonas de carbonización. Como se muestra en la Fig. 3.3.6



*Fig. 3.3.6 Muestras a punto de finalizar la primera hora de prueba a 2 kV*

Conforme la prueba fue transcurriendo la tensión se fue incrementando hasta una tensión máxima aplicada de 3.25 kV, con una duración de 6 horas. El material fue presentando descargas superficiales con mayor frecuencia, carbonizando el polímero en el lado del electrodo de tierra.

#### 3.4 Evaluación de los resultados de la prueba.

El grado de erosión en las muestras fue muy notorio, pero a pesar de que estuvieron sometidos a descargas durante 6 horas, alcanzado un nivel de tensión de 3.25 kV, pasaron la prueba sin rebasar los 25 mm o ser perforadas. En las imágenes de la Fig. 3.4.1 se muestran el daño paulatino de en las muestras.



*Fig. 3.4.1 Muestras al paso del tiempo de prueba*

Al término de la prueba se desmontaron las muestras del equipo para poder medir su masa erosionada.

Se obtuvieron las siguientes observaciones:

- La formación de las bandas secas fue adecuada durante toda la prueba.
- La formación de trayectorias carbonizadas se registró, pero éstas no alcanzaron los 25 mm.
- Las descargas superficiales iniciaron desde la primera hora de la prueba.
- La erosión registrada no alcanzó a perforar las muestras.

Cada uno de los puntos observados forma parte del proceso de degradación del polímero bajo la prueba del plano inclinado pero es evidente que la tensión de inicio debe de ser mayor para este material. Se alcanzó el fin de la prueba obteniendo muestras ligeramente erosionadas y con poca longitud de la trayectoria carbonizada como se muestra en la Fig.

3.4.2. Para las pruebas siguientes se decidió incrementar el valor de la tensión de inicio a 3.5 kV.



*Fig. 3.4.2 Muestras al fin de la prueba.*

# Capítulo 4

Pruebas experimentales en  
hules

## 4.1 Prueba a hule natural

### 4.1.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados comparativos de la prueba de plano inclinado a dos materiales distintos. Los materiales probados fueron hule natural y hule silicón. Las especificaciones que se utilizaron fueron las definidas en la norma ASTM D2303-13.

Para el inicio de la prueba la tensión fue de 3.5 kV. Se mantuvo la continuidad del flujo de contaminante y la tensión como se establece en la norma. Las trayectorias carbonizadas alcanzaron los 25 mm como se puede ver en la Fig. 4.1.1. Todas las muestras presentaron falla, y en este caso, el procedimiento duró un tiempo menor a las seis horas. En la siguiente sección se describe el desarrollo de la prueba a detalle.



*Fig. 4.1.1 Trayectoria carbonizada de una de las muestras*

#### 4.1.2 Desarrollo de la prueba al hule natural.

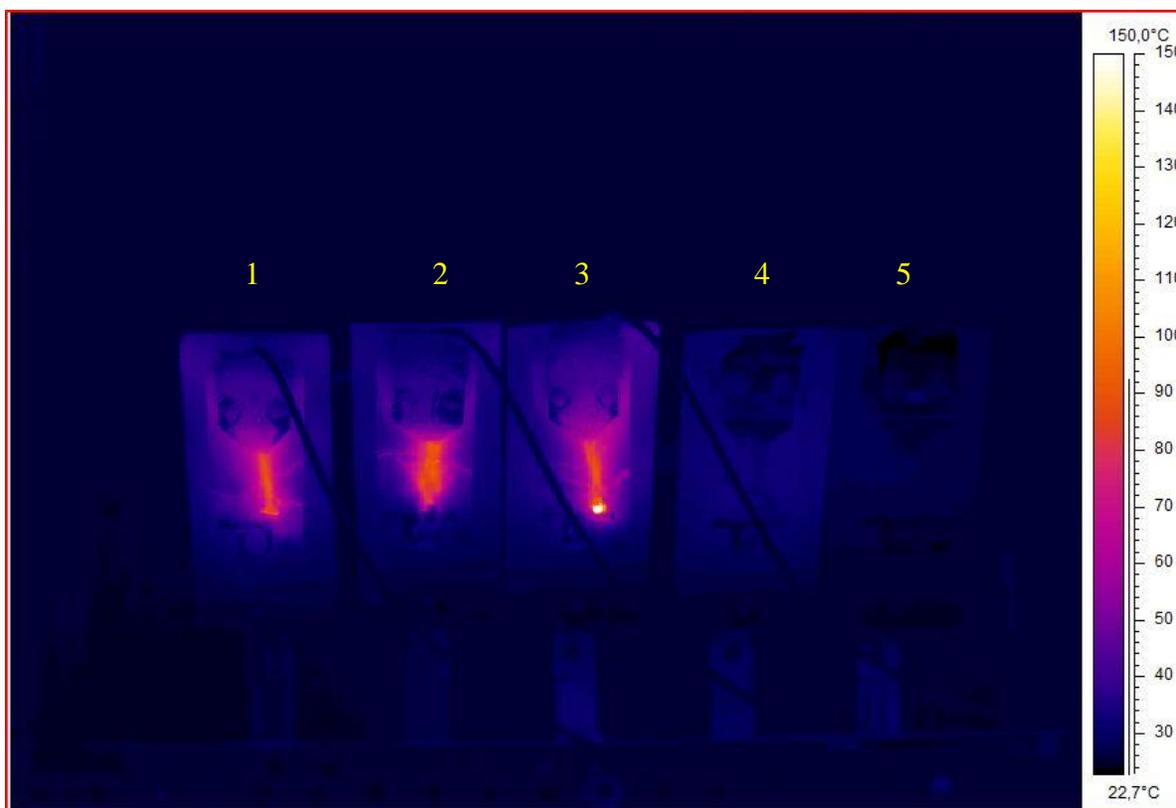
Antes de dar inicio a la prueba, se verificaron las conexiones y ajustes correctos de los equipos a utilizar, también se comprobó el funcionamiento correcto del equipo interruptor de emergencia. La Tabla 4.2-1 describe el desarrollo de la prueba.

*Tabla 4.1-1 Desarrollo de la prueba al hule natural*

Tiempo transcurrido en la prueba.			Descripción del acontecimiento.
Horas	Minutos	Segundos	
00	: 00	: 00	Inicia la prueba. Tensión: 3.5 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
00	: 15	: 54	Falla la muestra 5. Tensión: 3.5 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
00	: 34	: 26	Falla la muestra 2. Tensión: 3.5 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
00	: 55	: 45	Falla la muestra 3. Tensión: 3.5 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
00	: 50	: 29	Falla la muestra 4 (de izquierda a derecha) respectivamente. Tensión: 3.5 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
01	: 00	: 00	Aumenta la tensión. Tensión: 3.75kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
01	: 53	: 39	Falla la muestra 1. Tensión: 3.75 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
02	: 00	: 00	Aumenta la tensión. Tensión: 4 kV. Aumentando también el flujo constante a 0.6 mL/min
02	: 01	: 35	Falla la muestra 5. Tensión: 4 kV. Contaminante con flujo constante de 0.6 mL/min

A continuación, se muestran las imágenes termográficas obtenidas durante la prueba al hule natural. En ellas se muestra como la temperatura de las descargas fue elevándose desde el inicio de la prueba.

En la Fig. 4.1.2 se aprecia cómo las primeras tres muestras, un instante poco después del inicio de la prueba, registran un incremento en su temperatura, en las primeras dos muestras se registra solo el calor por efecto joule a lo largo del canal de flujo de contaminante, pero en la tercera se registra la presencia de una descarga eléctrica superficial en banda seca, que es el punto donde se alcanza la máxima temperatura, la imagen fue adquirida a una temperatura máxima de 150°C.



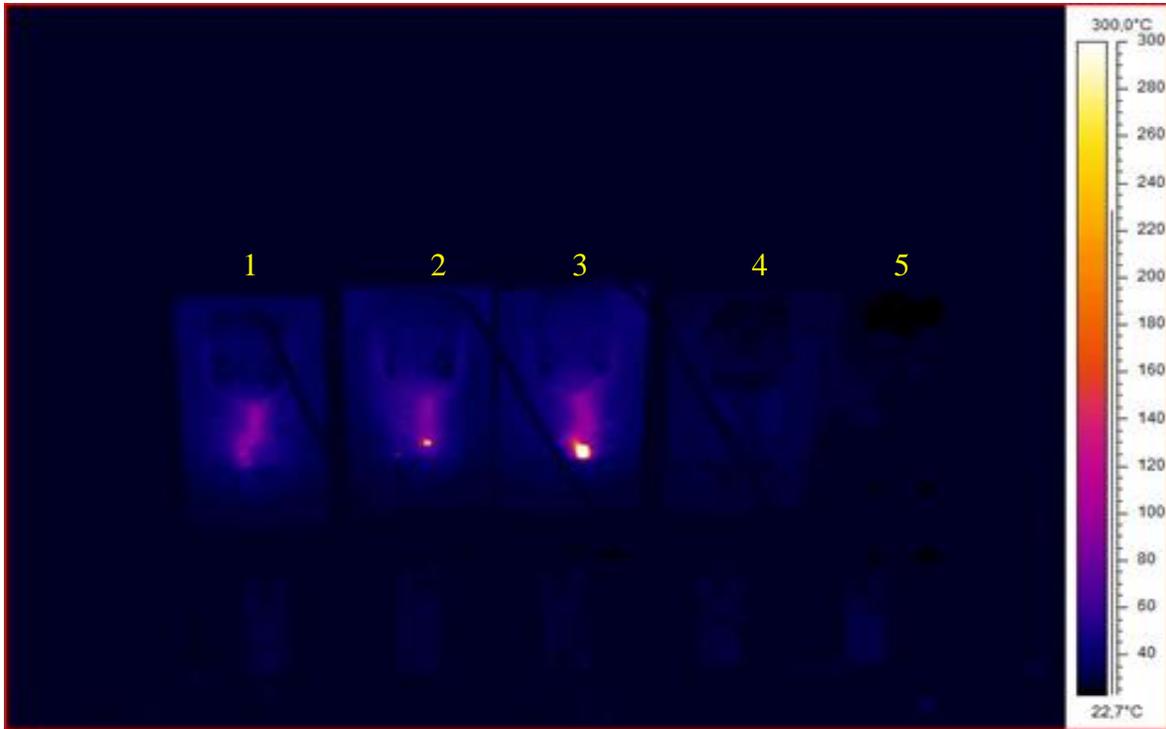
*Fig. 4.1.2 Imagen termográfica del hule con una temperatura máxima de 150°C*

La imagen infrarroja de la Fig. 4.1.3 muestra una temperatura máxima en 250°C. En ella se nota que en el instante de la toma, las tres muestras presentan arco en banda seca, y aunque las muestras 4 y 5 no registran una temperatura, éstas presentaban un flujo normal de contaminante.



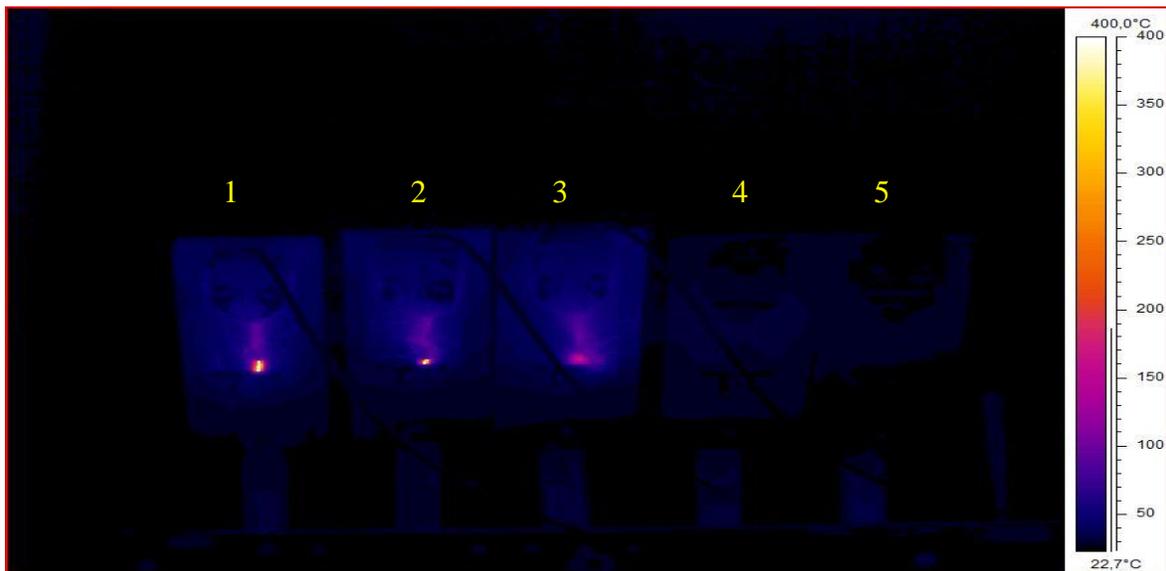
*Fig. 4.1.3 Imagen termográfica del hule con una temperatura máxima de 250°C*

Conforme el tiempo transcurrió, la temperatura fue incrementando, como lo muestra la imagen termográfica en la Fig. 4.1.4 donde se registra una temperatura máxima de 300 °C en la muestra número 3.

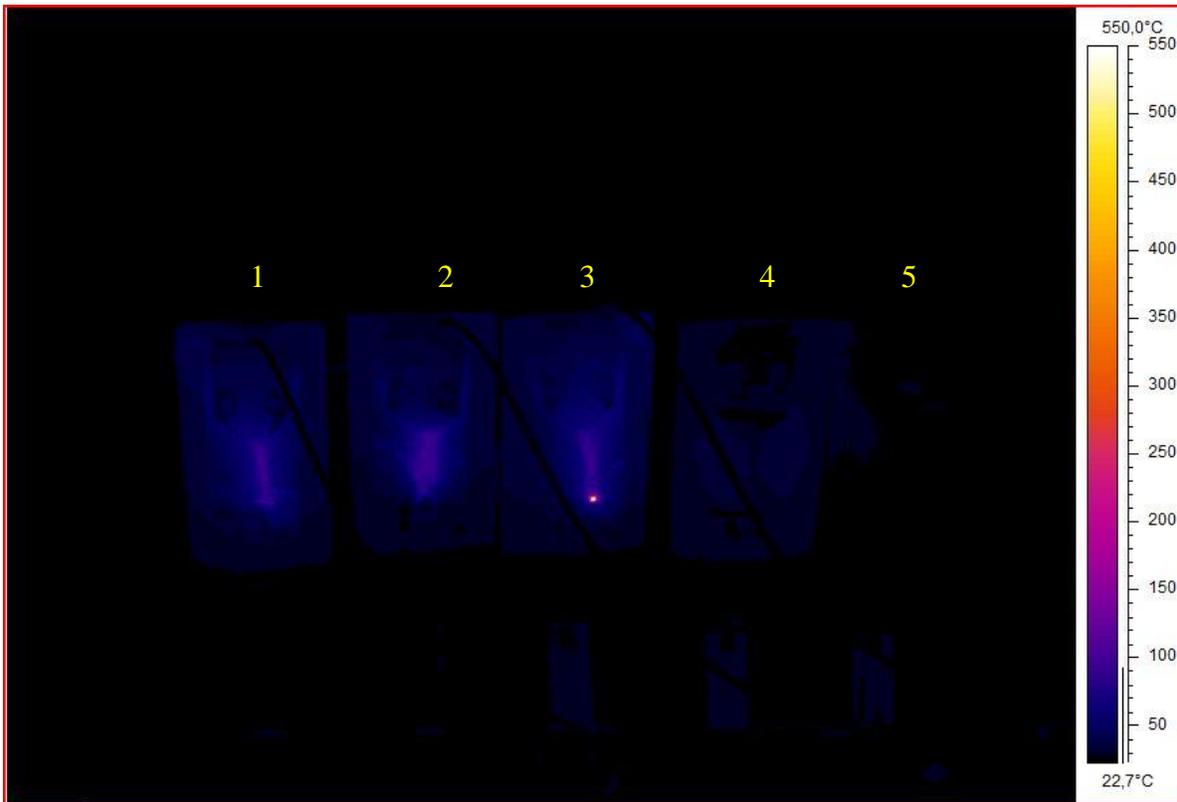


*Fig. 4.1.4 Imagen termográfica del hule con una temperatura máxima de 300°C*

En la Fig. 4.1.5 la temperatura máxima en la escala de 400°C, y en la Fig. 4.1.6 se muestra el valor de temperatura más alto registrado durante la prueba, que fue de 550 °C. Típicamente la temperatura a la que estos polímeros se comienzan a degradar es de entre 200 y 250 °C.



*Fig. 4.1.5 Imagen termográfica del hule silicón con una temperatura máxima de 400°C*



*Fig. 4.1.6 Imagen termográfica del hule con una temperatura máxima de 550°C*

#### 4.1.3 Análisis de resultados

Al concluir esta prueba se observó el grado de erosión que fue notorio, hasta llegar a la carbonización del material, rebasando la distancia a la que se considera como falla. En las siguientes imágenes se muestran imágenes ópticas de cómo se fueron generando los daños hasta llegar a la carbonización con una longitud de 25 mm. En la Fig. 4.1.7 se observa una muestra al inicio de la prueba.



*Fig. 4.1.7 Muestra al inicio de la prueba*

La Fig. 4.1.8 muestra las primeras trayectorias provocadas por el flujo de líquido contaminante y descargas superficiales de baja energía. Alrededor de una hora de iniciado el proceso se comenzaron a apreciar las primeras descargas superficiales de muy alta temperatura.



*Fig. 4.1.8 Trayectoria del contaminante*

Las descargas parciales sobre la superficie de las muestras son más intensas conforme transcurre el tiempo de prueba comenzando con la degradación del material como se puede ver en la Fig. 4.1.9.



*Fig. 4.1.9 Descargas de mayor energía*

El flameo en las muestras 2 y 5 avanzó más de 25 mm como se aprecia en la Fig. 4.1.10, siendo estas las primeras en fallar. Después de dos horas todas las muestras fallaron por longitud de la erosión. En la Fig. 4.1.11 se pueden observar, una vez concluida la prueba, la carbonización que provocaron las descargas superficiales en las muestras.



*Fig. 4.1.10 Carbonización en dos de las muestras antes de una hora de prueba.*



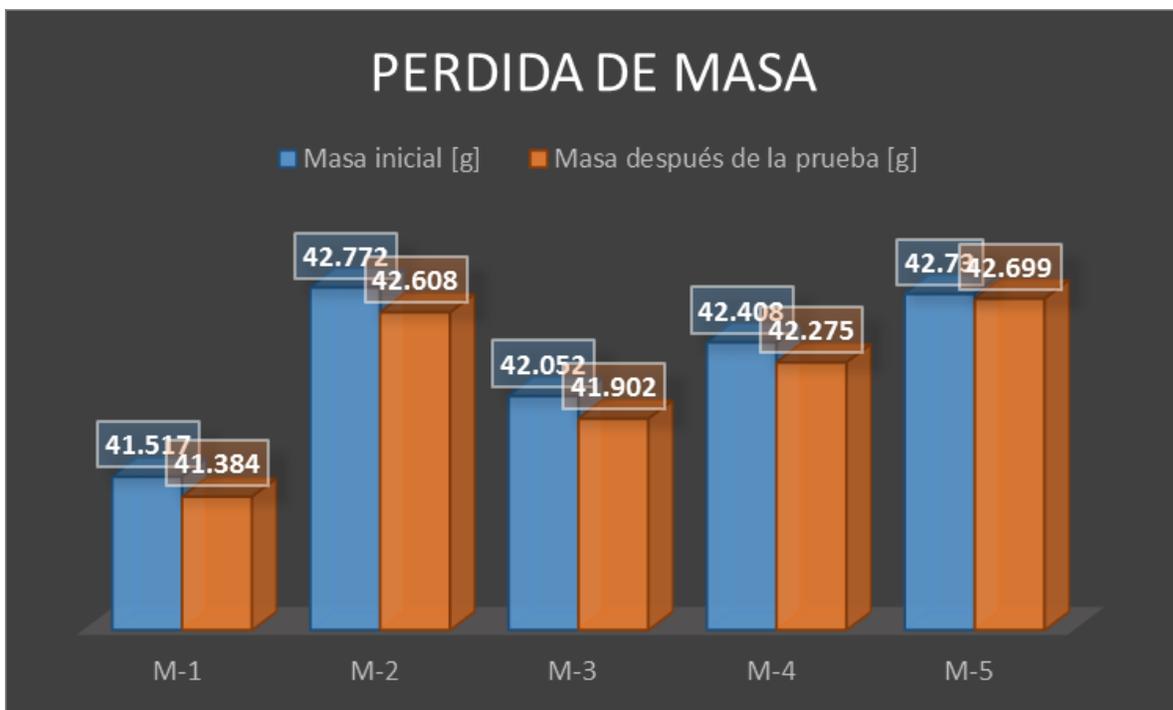
*Fig. 4.1.11 Carbonización en las muestras al final de la prueba.*

Al inicio y al término de la prueba, utilizando una balanza analítica, se pesaron las muestras para conocer la masa que se perdió durante el proceso de erosión, toda la

materia carbonizada fue removida de cada muestra . Los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 4.1-2 y en la Fig. 4.1.12.

*Tabla 4.1-2 Resultados obtenidos de masa erosionada en el hule natural.*

Muestra	Masa inicial [g]	Masa después de la prueba [g]	Masa erosionada [g]
M-1	41.517	41.384	0.133
M-2	42.772	42.608	0.164
M-3	42.052	41.902	0.15
M-4	42.408	42.275	0.133
M-5	42.730	42.699	0.031



*Fig. 4.1.12 Grafica de pérdida de masa.*

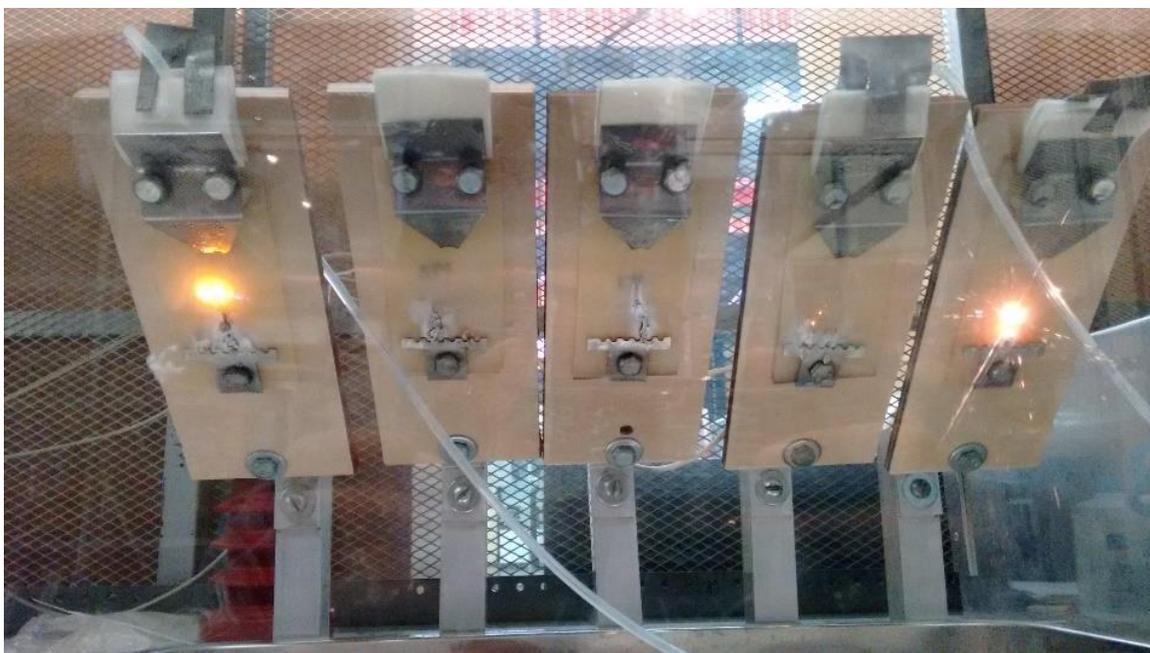
La prueba del plano inclinado básicamente sirve para evaluar de manera comparativa diferentes materiales en cuanto a su resistencia a la erosión por arco en banda seca. Para

este propósito se sometió al mismo procedimiento a otro material, y los resultados se presentan en la siguiente sección.

#### 4.2 Prueba a hule silicón.

Esta prueba es similar a la anterior pero el material es hule silicón, al final los resultados se comparan con los obtenidos con el hule natural. También en este caso se utilizaron las especificaciones de la norma.

A diferencia del material anterior, éste es transparente, en la Fig. 4.2.1. se presentan las muestras bajo prueba durante el proceso de arco en banda seca.



*Fig. 4.2.1 Presencia de descargas en banda seca y trayectorias carbonizadas en algunas de las muestras durante la prueba al hule silicón.*

#### 4.2.1 Desarrollo de la prueba al hule silicón.

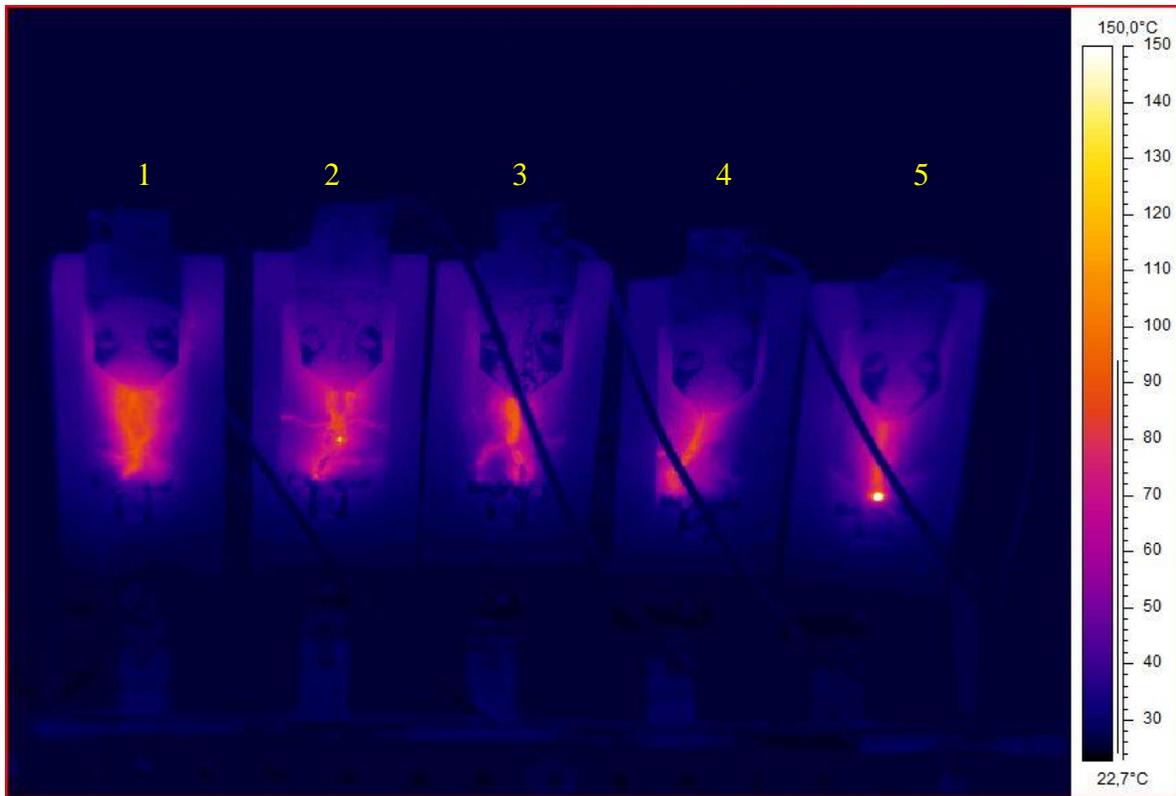
Descripción del desarrollo de la prueba al hule silicón.

*Tabla 4.2-1 Desarrollo de la prueba al hule silicón*

Tiempo transcurrido en la prueba.			Descripción del acontecimiento.
Horas	Minutos	Segundos	
00	: 00	: 00	Inicio de la prueba. Tensión: 3.5kV. Contaminante con flujo constante de 0.3mL/min
00	: 20	: 50	Falla la muestra 5 por rebasar la erosión 2.5 cm . Tensión: 3.5kV. Contaminante con flujo constante de 0.3mL/min
00	: 38	: 53	Falla la muestra 4 por rebasar la erosión 2.5 cm. Tensión: 3.5 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
00	: 50	: 29	Falla la muestra 3 por rebasar la erosión 2.5 cm. Tensión: 3.5 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
00	: 51	: 48	Falla la muestra 2 por rebasar la erosión 2.5 cm. Tensión: 3.5 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min
00	: 57	: 48	Falla la muestra 1 por rebasar la erosión 2.5 cm. Tensión: 3.5 kV. Contaminante con flujo constante de 0.3 mL/min

#### 4.2.2 Análisis de resultados.

A continuación, se presentan las imágenes termográficas realizadas durante la prueba al hule silicón. Al igual que para las pruebas anteriores la temperatura fue elevándose a medida que transcurría la prueba. En la Fig. 4.2.2 se muestra cómo todas las muestras han alcanzado una temperatura que oscila entre los 100 y 110 °C, observando que en la quinta (de izquierda a derecha respectivamente) se tiene un punto a la temperatura máxima de 150 °C.



*Fig. 4.2.2 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 150°C*

Como se muestra en la Fig. 4.2.3 unos minutos después la temperatura en una de las muestras alcanza un valor igual a la temperatura máxima de 200 °C.

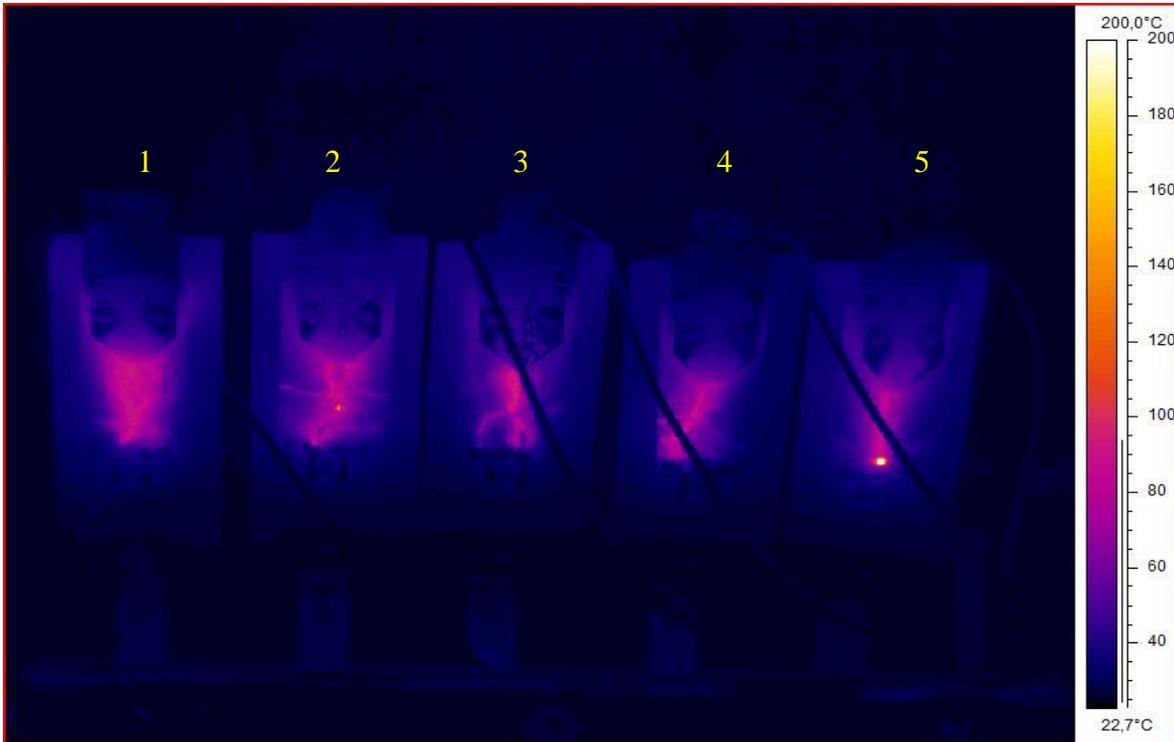


Fig. 4.2.3 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 200°C

En la Fig. 4.2.4, la temperatura en las muestras 3 y 1 alcanzan los 300°C.

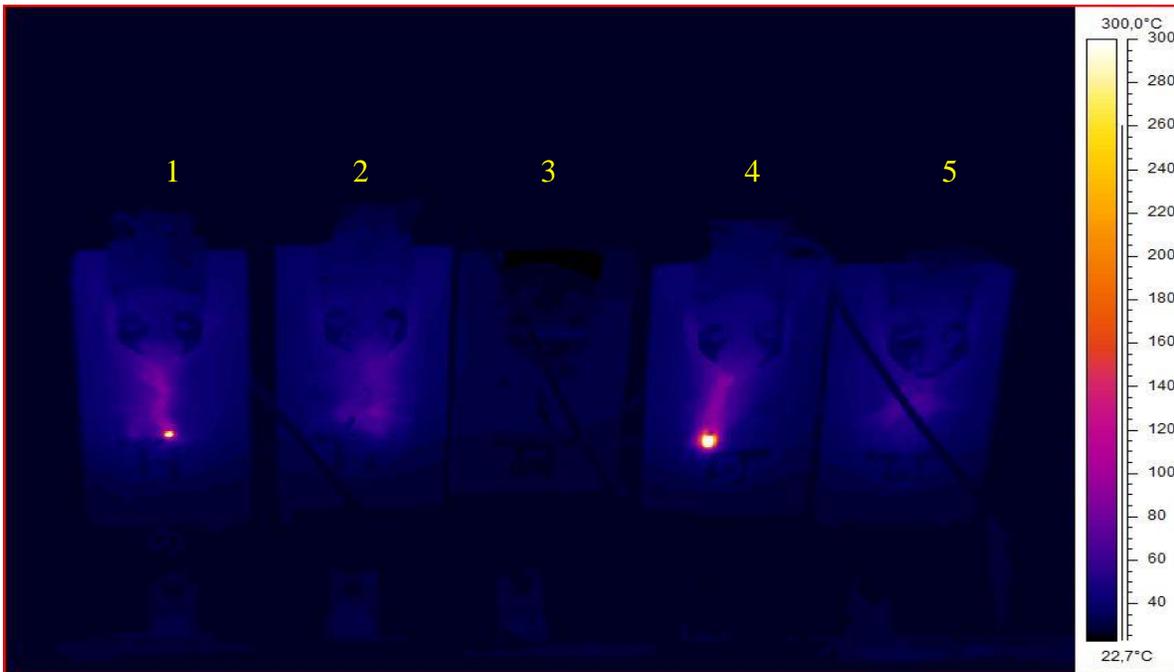


Fig. 4.2.4 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 300°C

En la Fig. 4.2.5 se tienen puntos incandescentes de aproximadamente 400 °C que se presentan en las muestras 2 y 5.

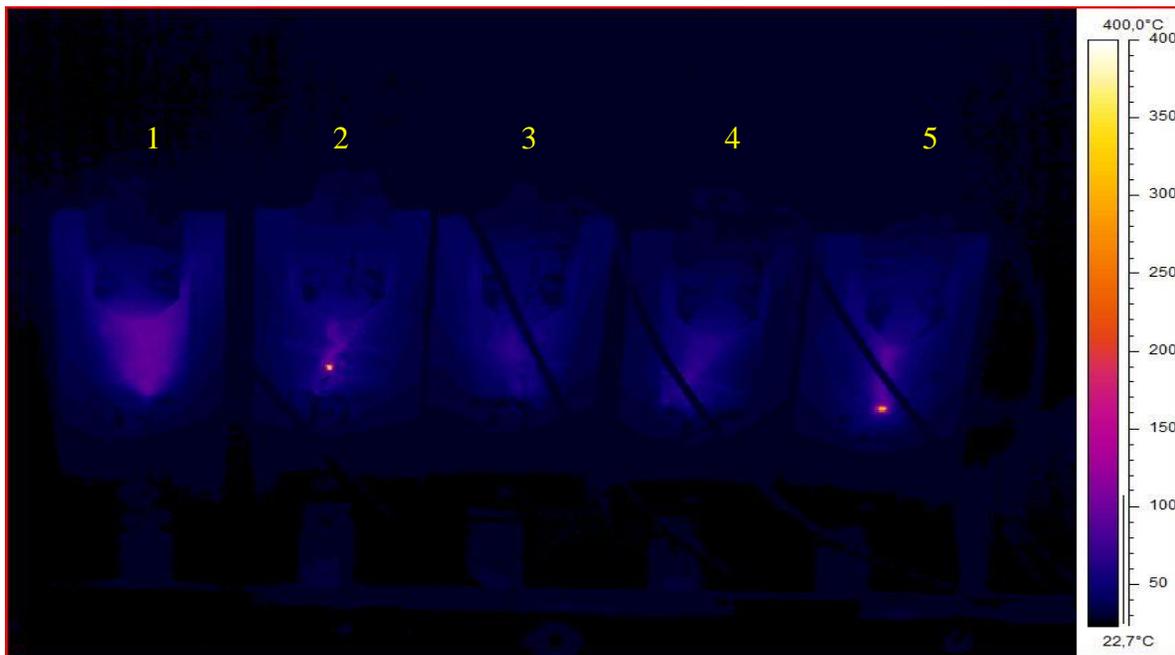


Fig. 4.2.5 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 400°C

En las muestras 3, 4 y 5 la temperatura alcanza a los 550 °C.

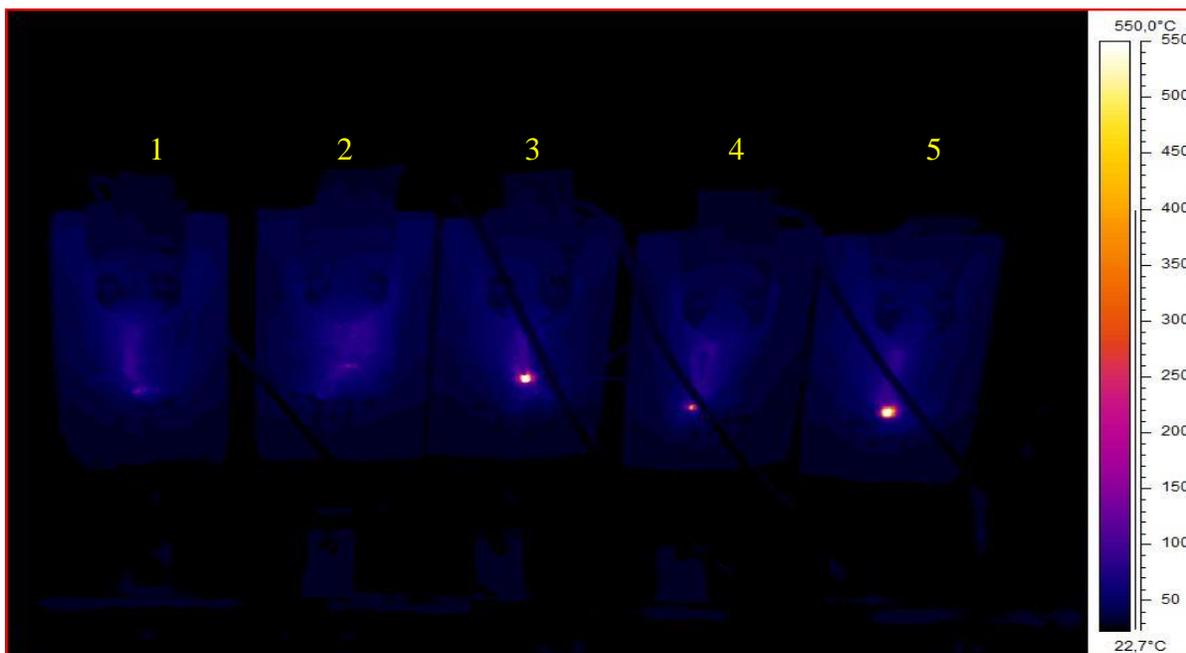


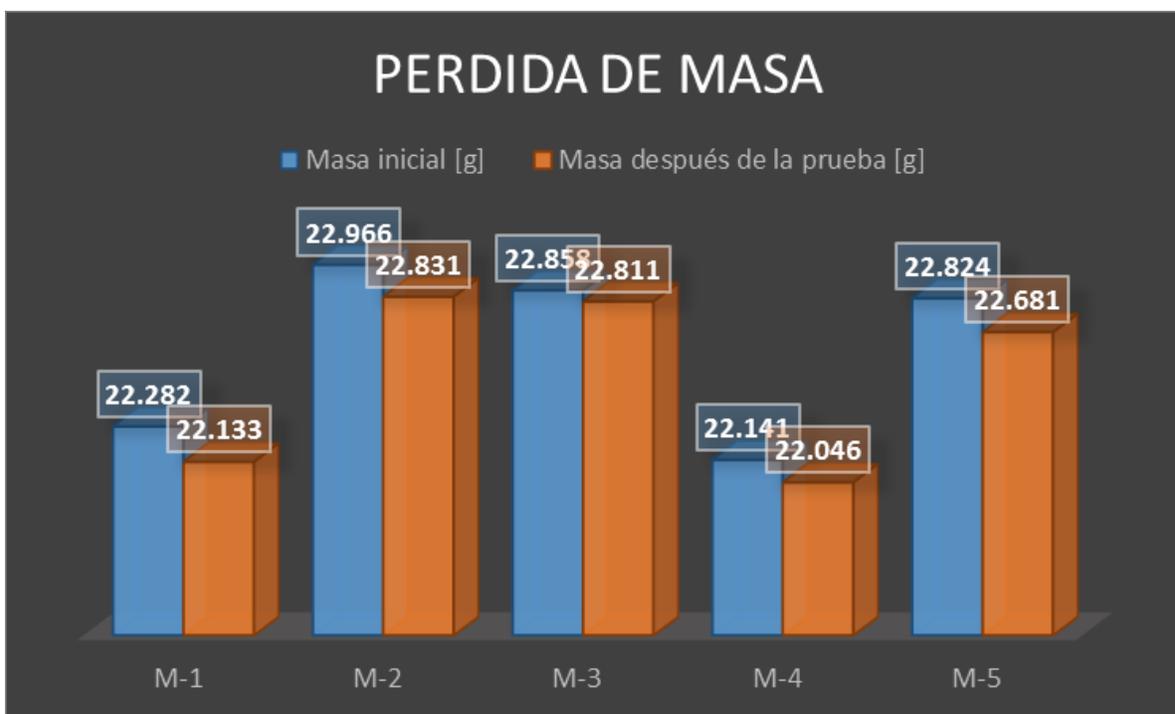
Fig. 4.2.6 Imagen termográfica del hule silicón vista a una temperatura máxima de 550°C

En la tabla 4.2.2-1 y en la Fig. 4.2.7 se presentan los valores de masa pérdida debido a la erosión en este material, de la misma manera que para el hule natura, se registró la masa al inicio y al final de la prueba.

*Tabla 4.2-2 Resultados obtenidos con el hule silicón.*

Muestra	Masa inicial [g]	Masa después de la prueba [g]	Masa erosionada [g]
M-1	22.282	22.133	0.149
M-2	22.966	22.831	0.135
M-3	22.858	22.811	0.047
M-4	22.141	22.046	0.095
M-5	22.824	22.681	0.143

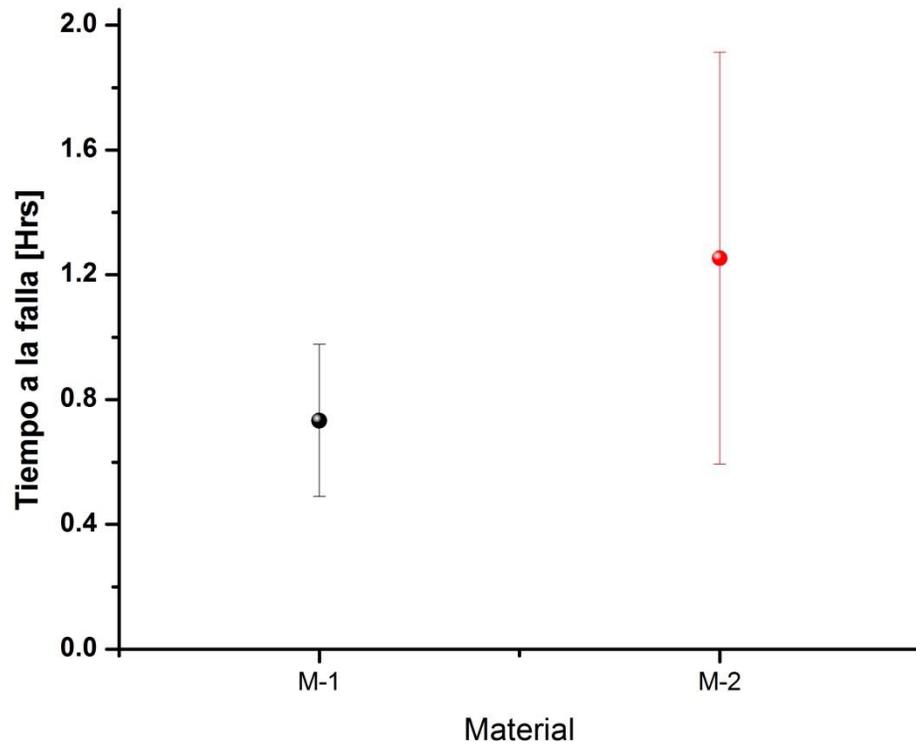
En esta gráfica se aprecia de mejor forma los gramos perdidos al finalizar la segunda prueba experimental.



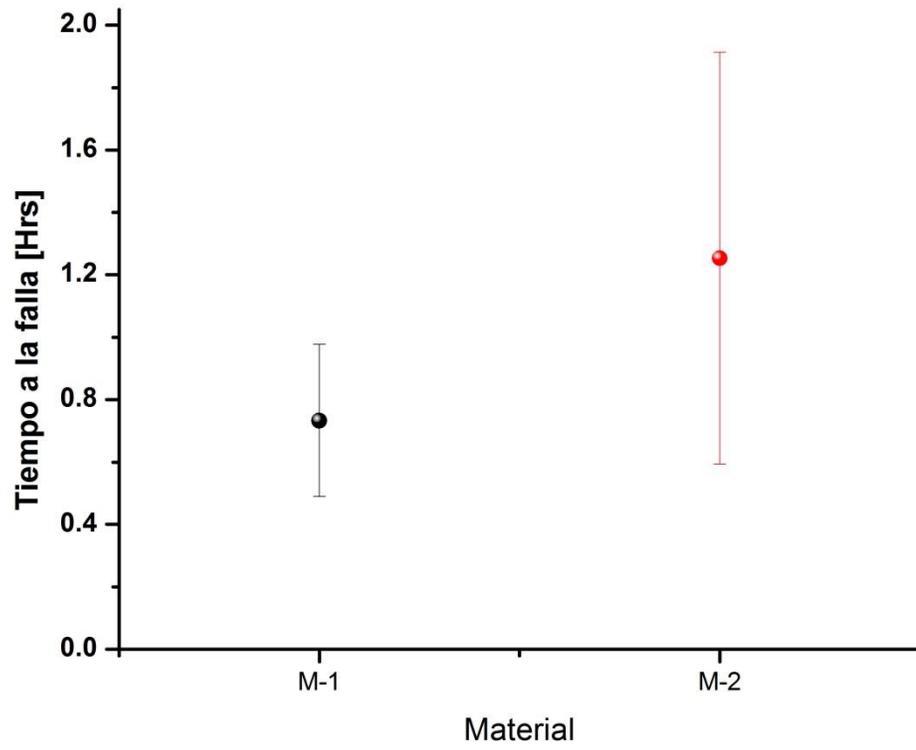
*Fig. 4.2.7 Gráfica de masa erosionada.*

### 4.3 Análisis comparativo.

En la Fig. 4.3. se presentan los resultados de comparar los valores de masa erosionada en la Fig. 4.2.9 el tiempo a la falla para dos de los materiales probados. Es posible observar en la Fig. 4.3. que, en cuanto al tiempo promedio a la falla, que el material M-2 soporta por más tiempo la presencia de descargas por arco en banda seca que el material M-1. Sin embargo, en el caso del a masa erosionada promedio, el material que menos masa perdió durante la prueba es el material M-1. Lo anterior puede considerarse un resultado esperado, ya que por estar más tiempo expuesto al arqueo las muestras del material M-2 perdieron más masa, pero la propagación de la trayectoria carbonizada fue más lenta. En este caso es difícil definir que un material sea mejor que el otro aunque si consideramos el tiempo a la falla mayor como indicativo de un mejor desempeño, el material M-2 podría considerarse un poco superior en cuanto a la resistencia a la erosión por descarga de arco en banda seca que el material M-1.



*Fig. 4.3.1 Tiempo promedio a la falla de los dos materiales bajo prueba.*



**(b)**

*Fig. 4.3.9 Masa erosionada promedio de los materiales bajo prueba.*

## Conclusiones

Los materiales poliméricos que se utilizan en cubiertas de aislamiento externo han demostrado ventajas en comparación con las versiones de porcelana y vidrio. En el caso específico de aisladores de hule silicón, el carácter hidrofóbico de su superficie le proporciona un mejor desempeño en ambientes contaminados. Además, este polímero permite tener aisladores con bajo peso y de fácil manejo, algo que cada vez es más valorado por los contratistas y empresas de suministradoras de energía. Una propiedad importante con la que deben contar estos materiales es la de resistir la presencia de descargas eléctricas superficiales por arqueo en banda seca.

En este trabajo de tesis se implementó el método del plano inclinado para evaluar la resistencia a la erosión por descargas eléctricas superficiales por arco en banda seca de materiales aislantes poliméricos. El arreglo fue diseñado en base a las especificaciones descritas en la norma ASTM D2303-13. Se realizaron pruebas a diferentes materiales poliméricos. El procedimiento y criterios para evaluar si las muestras acreditan o no la prueba, fueron los descritos en la norma ASTM D2303-13. Se registró la cantidad de masa erosionada en cada muestra utilizando una balanza de precisión y mediante una cama infrarroja se registró la temperatura que se puede alcanzar durante el proceso de arco en banda seca.

Se muestra cómo la prueba del plano inclinado permite evaluar de manera comparativa la resistencia a la erosión por descargas superficiales de diferentes materiales utilizados en cubiertas de aisladores no-cerámicos.

# “Anexos”

## A 1.1 Espesor Recomendado

Para los estudios de erosión se utiliza una tensión constante. Este valor (2 kV) está por debajo del valor de causar tracking progresivo. La muestra de ensayo debe ser de al menos 6.5 mm (0.25 in.) y preferiblemente 13 mm (0.50 in.) de espesor. La erosión puede medirse como una función del tiempo de aplicación de tensión o después de un tiempo especificado como 24 h. La erosión se produce como una grieta o como una trayectoria carbonizada generalmente formada en el polímero, sobre el electrodo conectado a tierra.

## A1.2 Recomendación para el suministro del flujo.

Este método de prueba requiere una fuente de líquido contaminante suministrado muy lentamente a una velocidad constante, y que dependiendo de la necesidad, pueda cambiarse la velocidad del flujo. Alternativamente, las bombas peristálticas se han utilizado con éxito ya que cuentan con una regulación de flujo con fácil ajuste.

## A1.3 Ajustes de oclusión recomendados:

<b>Tubo</b>	<b>Escala de cartucho grande</b>	<b>Escala de cartucho pequeño</b>
Conjunto de tubos Microbore	No disponible	No. 1 – No. 2
Precisión MASTERFLEX® L/S®	No. 3 – No. 4	No. 3 – No. 4

## Referencias

- [1] Aguirre, L. F., Correa, A., Velez, J. C., & Aponte, G. (2003). *Montaje de la prueba de descargas parciales como técnica para el diagnóstico del aislamiento en cables eléctricos*. Cali: Bibliotecadigital.univalle.edu.com. Energía y computación, volumen XI, edición 20. .
- [2] CAMPA, J. G. (2007). Polímeros avanzados. *Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI*, 31-40.
- [3] Chrzan, K. L. (2009). Inclined Plane Test, Influence Of Transformer Power. *The 16th International Symposium on High Voltage Engineering*, págs. 1-6.
- [4] International, A. (1 de Abril de 2013). ASTM D2303-13. Standard Test Methods for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials. Pensilvania, West Conshohocken, Estados Unidos.
- [5] Picanyol, C., & Galera, A. B. (19 de enero de 2015). *IMPIC Asesores, S.L.*  
Obtenido de IMPIC: <http://www.impic.es/servicios-impic/servicios-ultrasonido/electricas>
- [6] Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. México (traducción): Pearsón Educación.