



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería Mecánica

Fecha: 13/02/2024

Autores: Isabella Quintero Peñaranda

Nombre del Proyecto de Grado: Diseño de un material polimérico conductor para la interacción con pantallas táctiles

Director: Mario Fernando Muñoz Vélez

Co-Director: Luis Eduardo Tobón Llano

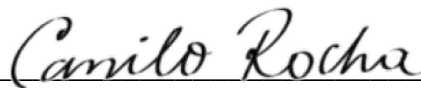
Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Firma de Director del Proyecto de Grado

Firma de Co-Director del Proyecto de Grado

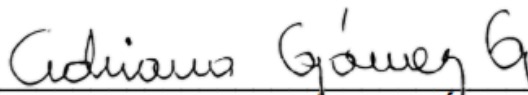
Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar el título de Ingeniero Mecánico.



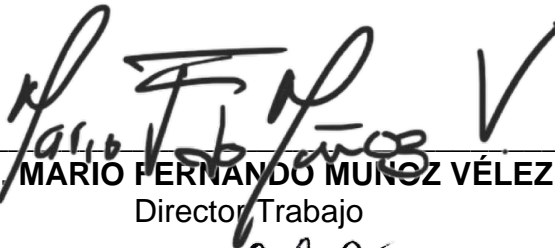
Dr. CAMILO ROCHA

Decano de la Facultad de Ingeniería



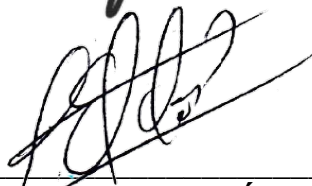
ING. ADRIANA GÓMEZ GÓMEZ

Directora de la Carrera de Ingeniería Mecánica.



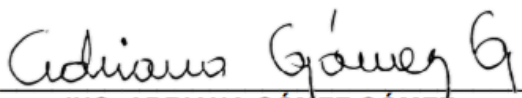
ING. MARIO FERNANDO MUNOZ VÉLEZ

Director Trabajo



ING. LUIS EDUARDO TOBÓN LLANO

Co - Director Trabajo



ING. ADRIANA GÓMEZ GÓMEZ

Jurado 1



ING. JOSÉ HERMINSUL MINA

Jurado 2



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Monografía de Trabajo de Grado

Diseño de un material polimérico conductor para la interacción con pantallas táctiles

Dirigido por Mario Fernando Muñoz, Ph. D.
Co-Director Luis Eduardo Tobón, Ph. D.

Isabella Quintero Peñaranda
isabellaquintero@javerianacali.du.co

10 de febrero de 2024

Santiago de Cali, 10 de febrero del 2024

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr Hernán Camilo Rocha Niño
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Cali

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “ Diseño de un material polimérico conductor para la interacción con pantallas táctiles”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

Isabella Quintero P
Isabella Quintero Peñaranda

Santiago de Cali, 10 de febrero del 2024

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Cali

Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “Diseño de un material polimérico conductor para la interacción con pantallas táctiles”, realizado por Isabella Quintero Peñaranda, estudiante de Ingeniería Mecánica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,



Dr. Mario Fernando Muñoz Vélez
Director Trabajo de Grado



Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Co-Director Trabajo de Grado

Dedicatoria

A mi madre, abuela y hermana, quienes con su amor y apoyo moral incondicional han sido mi mayor inspiración y guía. Gracias por ser parte de este camino académico

¡Con cariño!

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana Cali y el Semillero de Investigación en Materiales y Manufactura por el financiamiento de recursos para la ejecución del trabajo de grado.

A la carrera de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle por el acompañamiento y el apoyo con materia prima.

A la empresa CABOT por su apoyo con materia prima para el desarrollo de los compuestos.

A los Ingenieros Sofía Henao y José Mina, quienes estuvieron apoyando el proyecto como asesores.

A los laboratoristas Simón Plata, Bleider Arizala, Rubén Aponte y Christopher Valencia quienes colaboraron en los procesos realizados en los laboratorios.

A Juan José López y Deivy Camilo Muñoz.

A mis asesores Mario Muñoz y Luis Tobón, por su acompañamiento y paciencia durante este proceso de aprendizaje.

¡ Muchas gracias!

Glosario

Símbolos y Unidades

Símbolo	Definición	Unidades
σ_m	Conductividad eléctrica del material	S/m
ϵ_m	Permitividad eléctrica del material	F/m
\vec{E}	Campo eléctrico	N/C
\vec{F}_0	Fuerza eléctrica	N
q	Carga eléctrica	C
R	Resistencia eléctrica	T Ω , M Ω y K Ω
ρ	Resistividad del material	Ω m
l	Longitud	m
S	Sección transversal del material	m^2
C_p	Capacitancia en paralelo del material	F, pF, nF y μ F
ϵ_0	Permitividad del vacío	F/m
A	Área de las placas	m^2
d	Distancia entre placas	m
A_2	Área del material diseñado	m^2
d_2	Espesor del material diseñado	m
d_1	Espesor del material conocido	m
R_p	Resistencia eléctrica en paralelo	T Ω , M Ω y K Ω
A_1	Área de medición	m^2
A_{Cuadrado}	Área del material conocido	m^2
σ_{max}	Tensión máxima	Pa ; MPa
E	Módulo de elasticidad	Pa; MPa
ϵ	Deformación	Adimensional

Acrónimos, Abreviaturas y Términos

AAT	Definición
CB	Negro de Humo
MWCNT's	Nanotubos de Carbono Cortos de Pared Múltiple
Gr	Grafito
CNT	Nanotubos de Carbono
CNF	Nanofibra de Celulosa
nCB	nanonegro de humo
CCB	Negro de Humo Conductor
PVC	Cloruro de Polivinilo
PDMS	Polidimetilsiloxano
PA	Poliamida
PPy	Polipirrol
PEDOT	Polietilendioxitiofeno
PVP	Polivinilpirrolidona
LSR	Caucho de Silicona Líquida
RTV	Goma de Silicona Vulcanizada a Temperatura Ambiente
LDPE	Polietileno de Baja Densidad
NR	Caucho Natural
PP	Polipropileno
ABS	Acrlonitrilo Butadieno Estireno
HDPE	Polietileno de Alta Densidad
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido
FTIR	Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier

Resumen

En la actualidad, existen en el mercado opciones protésicas que contribuyen a la recuperación funcional y estética de la mano, generando mejoras significativas en la calidad de vida de las personas. No obstante, muchas de estas alternativas protésicas se fabrican utilizando materiales aislantes, lo que presenta un desafío para que los usuarios con prótesis puedan interactuar con pantallas táctiles. Esto resulta en una separación, por parte de los usuarios, de tecnologías que se han vuelto cada vez más esenciales en la vida diaria.

El trabajo se centró en diseñar y posteriormente evaluar las propiedades mecánicas y eléctricas de compuestos de matriz poliméricas con relleno de partículas conductoras para abordar esta limitación. Se observó que la incorporación de relleno en diferentes proporciones afectó las propiedades de la mezcla. Porcentajes más altos generaron complicaciones en la dispersión, disminuyendo las propiedades mecánicas, pero mejorando las eléctricas. En contraste, porcentajes pequeños no alteraron significativamente las propiedades eléctricas, pero tendieron a aumentar la resistencia y el módulo de elasticidad.

Los resultados revelaron que la presencia y concentración de negro de humo (CB) fueron cruciales para mejorar la conductividad y permitividad eléctrica. Sin embargo, esta mejora de las propiedades eléctricas se vio acompañada por una disminución de la resistencia y el módulo de elasticidad en los materiales diseñados.

Palabras claves: polímero conductor; prótesis de miembro superior; discapacidad; dispositivo táctil.

Abstract

Currently, there are prosthetic options available in the market that contribute to the functional and aesthetic recovery of the hand, leading to significant improvements in people's quality of life. However, many of these prosthetic alternatives are manufactured using insulating materials, posing a challenge for users with prostheses to interact with touchscreens. This results in an isolation from technologies that have become increasingly essential in daily life.

The work focused on designing and subsequently evaluating the mechanical and electrical properties of polymeric matrix composites with filler of conductive particles to address this limitation. It was observed that the incorporation of filler in different proportions affected the properties of the blend. Higher percentages led to complications in dispersion, decreasing mechanical properties but enhancing electrical properties. In contrast, smaller percentages did not significantly alter electrical properties but tended to increase resistance and modulus of elasticity.

The results revealed that the presence and concentration of carbon black (CB) were crucial for improving electrical conductivity and permittivity. However, this enhancement in electrical properties was accompanied by a decrease in resistance and modulus of elasticity in the designed materials.

Keywords: conductive polymer; upper limb prosthesis; disability; tactile device.

Índice general

Introducción	11
Capítulo 1.....	12
Planteamiento del problema.....	12
Capítulo 2.....	15
Justificación.....	15
Capítulo 3.....	17
Marco teórico.....	17
3.1. Variables eléctricas	17
3.2. Pantallas táctiles	21
3.3. Polímeros	23
Capítulo 4.....	27
Estado del arte	27
4.1. Métodos de fabricación para polímeros no conductores.....	27
Capítulo 5.....	16
Objetivos	16
5.1. Objetivo general.....	16
5.2. Objetivos específicos	16
Capítulo 6.....	31
Metodología.....	31
6.1. Caracterización del material tomado como referente	31
6.2. Metodología de fabricación de material con matriz de Silicona y rellenos de MWCNT, CB y Gr.....	31
6.3. Caracterizar y evaluar el desempeño mecánico y eléctrico de los materiales seleccionados y/o diseñados.....	35
6.4. Elegir el material que más se ajuste a los requerimientos necesarios para ser usado en pantallas táctiles capacitivas proyectadas.	35
Capítulo 7.....	37
Resultados.....	37
7.1. Caracterización del material tomado como referente	37
7.2. Caracterizar y evaluar el desempeño mecánico y eléctrico de los materiales seleccionados y/o diseñados.....	41
7.3. Pruebas de uso	58
Capítulo 8.....	60
Conclusiones	60
Capítulo 9.....	61
Bibliografía.....	61

Índice de tablas

Tabla 1. Valores esperados para el correcto funcionamiento	17
Tabla 2. Conductividad de tejidos del cuerpo humano en modelos anatómicos [16]	19
Tabla 3. Datos conocidos del modelo	55
Tabla 4. Cálculos: Silicona pura	55
Tabla 5. Cálculos: Gr	55
Tabla 6. Cálculos: CB	56
Tabla 7. Cálculos: MWCNT's	56
Tabla 8. Resultados generales	56
Tabla 9. Matriz de verificación de requisitos	58

Índice de figuras

Fig.1 : Cantidad de individuos (en millones) que usan un teléfono inteligente [3].	12
Fig.2 : Cantidad de individuos (en millones) que hacen uso del internet [3]	12
Fig.3 : Cantidad de personas con discapacidad según el estrato socioeconómico [6].	13
Fig.4 : Personas con discapacidad según alteración que más los afecta [6].	13
Fig.5 : Personas con discapacidad según dificultad para realizar actividades [6].	13
Fig.6 : Líneas de campo eléctrico producidas por una carga: a) carga puntual positiva b) carga puntual negativa [18]	17
Fig.7 : Concepto de permitividad dieléctrica de un material [19].	18
Fig.8 : Transición de pantallas táctiles resistivas a pantallas táctiles capacitivas proyectadas como tecnología dominante [9].	22
Fig.9: Esquema de componentes de una pantalla táctil resistiva [9].	22
Fig.10 : Funcionamiento de las pantallas táctiles capacitivas proyectadas: a) auto capacitancia b) capacitancia mutua [9].	23
Fig.11: Estructura esquemática de los polímeros: a) lineal b) ramificada c) entrecruzada [27].	24
Fig.12 : Representación gráfica : Banda de valencia(BV), Banda de conducción(BC), Anchura de la banda de valencia(AB), Energía de Grap (Eg) [28].	25
Fig.13 : Ejemplos de estructuras de polímeros conductores [28].	25
Fig.14: Esquema de composición de proporciones del material a diseñar.	32
Fig.15: Diagrama del análisis estadístico planteado para el diseño del material.	33
Fig.16: Diagrama paso a paso del proceso de obtención de los materiales.	35
Fig.17 : Análisis del espectro del material referente.	37
Fig.18 : Micrografía SEM del material referente.	38
Fig.19 : Resultados material referente: a) Resistencias en paralelo vs Frecuencia b) Capacitancia en paralelo vs Frecuencia.	39
Fig.20 : Resultados Silicona pura: a) Resistencias en paralelo vs Frecuencia b) Capacitancia en paralelo vs Frecuencia.	40
Fig.21 : Micrografías SEM de partículas conductoras: CB.	41
Fig.22 : Micrografías SEM de partículas conductoras: Gr.	42
Fig.23 : Micrografías SEM de partículas conductoras: MWCNT's.	42
Fig.24: Resistencia en paralelo VS Frecuencia.	43
Fig.25: Capacitancia en paralelo VS Frecuencia.	43
Fig.26: Curva Esfuerzo vs Deformación de materiales diseñados: a) CB b) MWCNT's c) Gr.	44- 45
Fig.27: Propiedades ensayo a tensión: a)Resistencia b)Módulo de elasticidad c)Deformación.	46-47
Fig.28: Micrografías SEM: a) Silicona pura b) Silicona + Gr 5% c) Silicona + CB 5% d) Silicona + MWCNT's 1% e) Silicona + MWCNT's + CB 2%.	48
Fig.29: Resultados Gr : a) Resistencia en paralelo VS Frecuencia b) Capacitancia en paralelo VS Frecuencia.	50
Fig.30: Resultados CB : a) Resistencia en paralelo VS Frecuencia b) Capacitancia en paralelo VS Frecuencia.	51
Fig.31: Resultados MWCNT's : a) Resistencia en paralelo VS Frecuencia b) Capacitancia en paralelo VS Frecuencia	52-53
Fig.32: Propiedades ensayos eléctricos: a) Resistencia b) Capacitancia.	54
Fig.33: Propiedades ensayos eléctricos: a) Conductividad b) Impedancia	57
Fig.34: Prueba interacción: a) Con guante aislante b) Con polímero aislante	59
Fig.35: Prueba interacción: a) Con la mano b) Con aluminio.	59

Introducción

Debido al crecimiento de la tecnología, la asequibilidad a dispositivos táctiles y el acceso a internet, manejar una pantalla táctil se ha convertido en algo indispensable de la vida cotidiana, debido a que representan tanto una ayuda para facilitar las tareas diarias, como una forma de distracción efectiva. Países como China, India y Estados Unidos son los que presentan mayor cifra de usuarios de teléfonos inteligentes del planeta, superando todos ellos la barrera de los 100 millones de usuarios [1].

Por otro lado, alrededor del 15% (1000 millones) de la población a nivel mundial, viven con algún tipo de discapacidad [2]. Dentro de esta población, se encuentran los usuarios con prótesis, las cuales son diseñadas con la idea de reemplazar o mejorar el funcionamiento de una parte del cuerpo faltante o existente, y su objetivo principal es permitir que los usuarios puedan realizar las actividades diarias más básicas tales como caminar, comer y vestirse, de manera fácil y sin necesidad de ayuda externa. Sin embargo, realizar actividades que requieren el uso de pantallas táctiles se les dificulta, dado que el material con el que se fabrican y recubren las prótesis no es compatible con el funcionamiento de las pantallas táctiles. Actualmente, para este problema, existen soluciones como el uso de lápices especiales y de posturas compensatorias por parte de los usuarios, las cuales son soluciones parciales, y no representa una verdadera autonomía ni un impacto positivo en la calidad de vida.

Con base a lo anterior, se identifica la ausencia de alternativas protésicas que permitan el manejo de pantallas táctiles. Por lo cual, con este trabajo se busca diseñar y evaluar un material que cumpla con los requerimientos de conductividad e impedancia eléctrica, flexibilidad y resistencia.

Frente a esto, se estableció una metodología para la fabricación de polímeros conductores, los cuales fueron posteriormente sometidos a un proceso de caracterización y evaluación con el objetivo de determinar cuál de ellos cumplía de manera óptima con los requisitos de uso establecidos. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis de la composición fisicoquímica y eléctrica de un material comercial de referencia, utilizando espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y un analizador de impedancia, respectivamente. Posteriormente, se procedió con el diseño de mezclas y la fabricación de los materiales, empleando una matriz polimérica con relleno de partículas conductoras en porcentajes de 1%, 3%, y 5% en peso. La influencia de la incorporación de estos rellenos de partículas conductoras en el polímero se evaluó, abordando sus propiedades eléctricas y mecánicas mediante el uso de un analizador de impedancia, ensayos de tensión y SEM, respectivamente. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de uso para aquellos materiales que cumplieran con al menos dos de los criterios de selección predefinidos. Estas pruebas se diseñaron para evaluar la interacción de los materiales en situaciones prácticas, asegurando así su funcionalidad y eficacia en escenarios de uso real.

Planteamiento del problema

Durante los últimos años se ha evidenciado una tendencia creciente tanto en la utilización de teléfonos inteligentes (ver Figura 1) como en la cantidad de usuarios que hacen uso del internet (ver Figura 2). Actualmente, se estima que el 62,5% (4950 millones) de la población a nivel mundial son usuarios de internet, el 67,1% (5310 millones) posee un teléfono móvil y el 58,4% (4620 millones) son usuarios activos en redes sociales; además, el tiempo promedio que estos usuarios pasan en internet en todos los dispositivos es de casi siete horas diarias, alrededor de 4 horas y 28 minutos en el celular, y de 2 horas y 27 minutos en redes sociales [3].

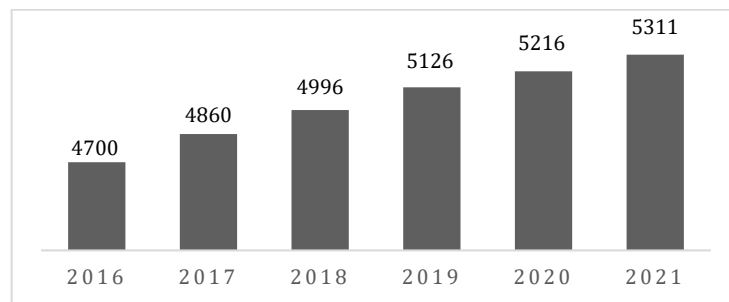


Fig. 1: Cantidad de individuos (en millones) que usan un teléfono inteligente [3].

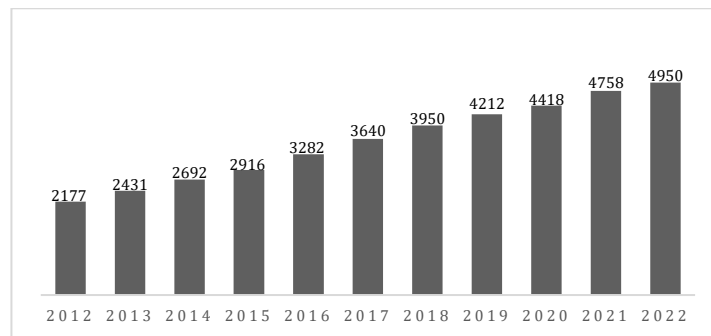


Fig. 2: Cantidad de individuos (en millones) que hacen uso del internet [3].

Por otro lado, en América Latina y el Caribe, el 12% de la población tienen al menos una discapacidad, estamos hablando de aproximadamente 66 millones de personas [4]. En Colombia, según datos con corte de diciembre del 2020 de los Boletines Poblacionales de Personas con Discapacidad, el 2,6% de la población colombiana tiene una discapacidad [5], lo cual se traduce en cerca de 1,3 millones de personas.

Esta cifra representa una minoría bastante grande, que se ve en condiciones sociales de desigualdad, debido principalmente a la falta de recursos y herramientas que equilibren su diario vivir con el de las demás personas. Según datos con corte al 30 de junio del 2019 de la Sala situacional de las Personas con Discapacidad, el 80% de las personas con discapacidad refieren pertenecer a estratos 1 y 2 (ver Figura 3); el 34% refieren que la alteración que más los afecta es el movimiento del cuerpo, manos, brazos y piernas (ver Figura 4); y el 19% reportó tener dificultad para realizar actividades que tengan que ver con llevar, mover y utilizar objetos con las manos (ver Figura 5) [6].

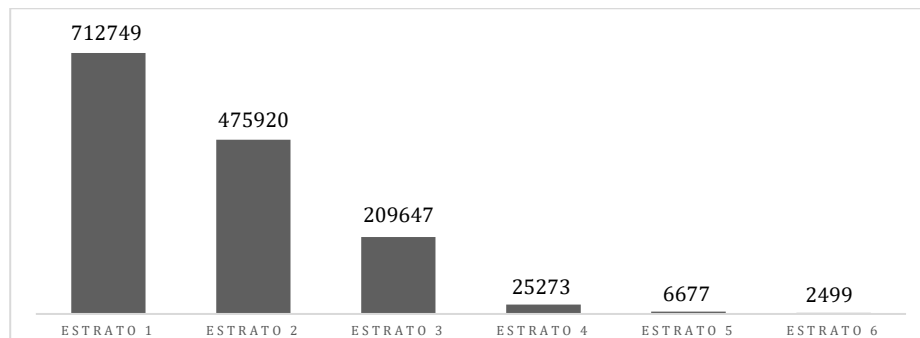


Fig. 3: Cantidad de personas con discapacidad según el estrato socioeconómico [6].

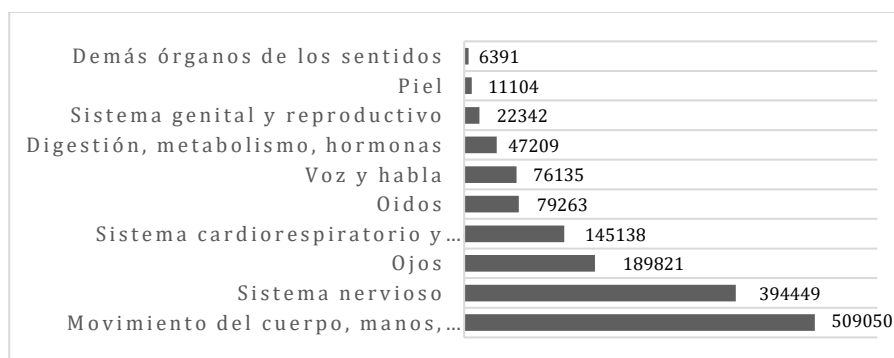


Fig. 4: Personas con discapacidad según alteración que más los afecta [6].

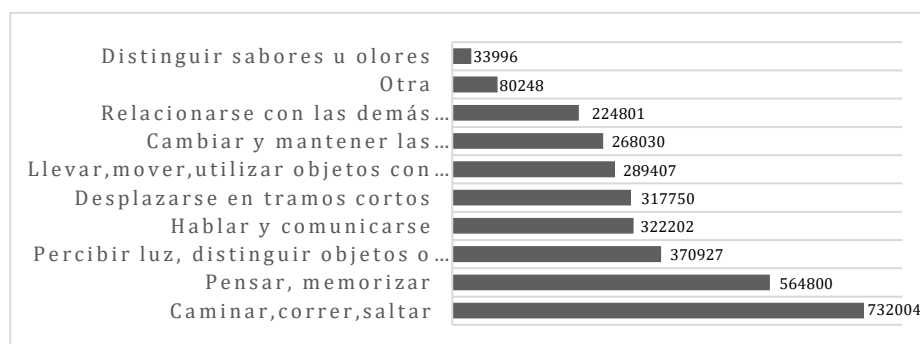


Fig. 5: Personas con discapacidad según dificultad para realizar actividades [6].

Además, los materiales comúnmente empleados en la fabricación y recubrimiento de prótesis son en su mayoría polímeros, como silicona, látex flexible y PVC rígido [7]. La silicona se destaca como un avance importante en la selección de materiales para interfaces protésicas debido a sus propiedades dinámicas, resistencia, durabilidad y biocompatibilidad. Generalmente, se utiliza silicona en la confección de casquillos o revestimientos de prótesis. En cuanto a la estructura del encaje de las prótesis, se recurre frecuentemente a termoplásticos como resina de poliéster o acrílico, mientras que las medias que recubren la prótesis se confeccionan con nailon o acrílicos. Así mismo, se emplea espuma de poliuretano para cubrir secciones estructurales rígidas y crear recubrimientos de espuma cosmética suave [8]. Dada esta información, resulta evidente que los materiales convencionales utilizados en la fabricación y recubrimiento de prótesis presentan un desafío para la interacción con pantallas táctiles, ya que los polímeros son intrínsecamente aislantes, es decir, no conducen electricidad. Este problema surge porque el funcionamiento de las pantallas táctiles capacitivas (ampliamente utilizadas en dispositivos modernos) se basa en la detección de cambios en el campo eléctrico provocados por el contacto con un objeto conductor [9], como un dedo humano [10].

En consecuencia, a los usuarios con prótesis de miembro superior se les imposibilita o dificulta usar las pantallas táctiles. Con base a lo anterior, surge la pregunta en la cual se basará el trabajo, ¿Es posible diseñar un material con propiedades similares a las de los materiales usados en lápices comerciales, que permita la interacción con pantallas táctiles capacitivas?

Justificación

Se estima que en Colombia, cerca de 40 mil personas necesitan una prótesis y, dentro de ese grupo de personas, 11 476 usuarios requieren una prótesis de tren superior, según información del Cubo de Discapacidad del Sistema Integral de Información de la Protección Social [11]. De acuerdo con la información recopilada en las bases de datos de la Aseguradora de Riesgos Laborales SURA, se documentó un total de 12 043 casos de pacientes con amputaciones parciales de mano debido a causas traumáticas en Colombia, abarcando el período desde septiembre de 1995 hasta septiembre de 2022 [12].

Por otro lado, el Congreso de Colombia determina las disposiciones para garantizar el pleno ejercicio de los derechos de las personas con discapacidad por medio de la Ley 1618 [13], al igual de establecer los mecanismos de integración social en la Ley 361 [14], y el régimen para el ejercicio de la capacidad legal en la Ley 1996 [15]; estas leyes otorgan a la persona con discapacidad, la facultad para acceder a procesos integrales con el fin de lograr mantener la independencia en todas sus capacidades, además busca la participación plena en todos los aspectos de la vida y establece las regulaciones para la provisión y el acceso oportuno de tecnologías, recursos y procesos de habilitación y rehabilitación.

Con el desarrollo propuesto en este proyecto se pretende que usuarios con prótesis del miembro superior puedan, de manera funcional, manejar pantallas táctiles, logrando adquirir mayor autonomía para realizar actividades que impliquen el uso de estas pantallas, facilitando su incorporación en el sector laboral.

A continuación, se presentan los objetivos planteados para este proyecto.

3.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un material que permita el uso de pantallas táctiles capacitivas

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades eléctricas y fisicoquímicas de un material comercial referente.
- Diseñar un material con las características requeridas para ser usado en las pantallas táctiles, basadas en las propiedades del material referente.
- Determinar las propiedades mecánicas y eléctricas de los materiales diseñados.
- Seleccionar el material en función de las propiedades eléctricas, mecánicas y pruebas de uso

Marco teórico

El material a diseñar debe poseer propiedades específicas para garantizar su efectiva interacción con pantallas táctiles, entre ellas se encuentra la flexibilidad y la resistencia mecánica, junto a la conductividad y permitividad eléctrica del material. Estas propiedades combinadas son indispensables para lograr un producto final que cumpla con los estándares de funcionalidad y rendimiento requeridos para una experiencia táctil óptima. En la Tabla 1 se puede observar los valores de propiedades que se esperan obtener.

Tabla 1. Valores esperados para el correcto funcionamiento.

Propiedad	Valor esperado
Conductividad eléctrica	Entre 0,1 y 0,27 S/m [16, 17]
Deformación	Menos del 40% de disminución con respecto a la silicona pura
Resistencia mecánica	Que se mantenga estable o no disminuya con respecto a la silicona pura
Resistencia eléctrica	Del orden de los $K\Omega$
Permitividad dieléctrica	Entre 27,5 y 44,9 [17]

A continuación, se describen los conceptos a tener en cuenta para diseñar y evaluar un material polimérico conductor que permita la interacción con pantallas táctiles.

4.1 Variables eléctricas

4.1.1 Campo eléctrico

El campo eléctrico se define como el campo de fuerza creado por la atracción y repulsión de cargas eléctricas; en otras palabras, un cuerpo cargado genera un campo en el espacio que lo rodea y un segundo cuerpo responde a ese campo (ver Figura 6) [18].

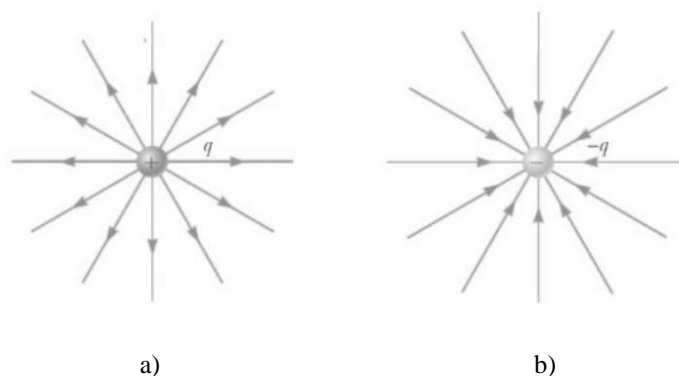


Fig. 6: Líneas de campo eléctrico producidas por una carga: a) carga puntual positiva b) carga puntual negativa [18].

Matemáticamente, el campo eléctrico producido por una carga (q) en la ubicación de una pequeña carga de prueba se expresa como la fuerza eléctrica (\vec{F}) ejercida por la carga (q) sobre q_0 dividida entre la carga de prueba, en la Ecuación 1 se observa la fórmula matemática del campo eléctrico [18].

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1)$$

Donde:

\vec{E} = campo eléctrico

\vec{F} = fuerza eléctrica

q = carga

4.1.2 Permitividad dieléctrica

La permitividad dieléctrica se puede definir como la medida en la que un campo eléctrico afecta y, a su vez, es afectado por un medio o material dieléctrico. Este concepto está relacionado con la susceptibilidad eléctrica, la cual es la medida de la facilidad que tiene un dieléctrico de polarizarse en respuesta a la presencia de un campo eléctrico (ver Figura 7), su unidad de medida en el Sistema Internacional (SI) es Faradio por metro (F/m) [19].

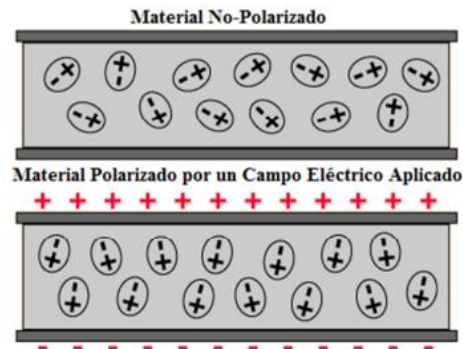


Fig. 7: Concepto de permitividad dieléctrica de un material [19].

4.1.3 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad, de un medio o espacio físico, de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de él; por lo tanto, se puede entender como el opuesto a la resistencia que presenta un material. También es definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo, que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar por él; su unidad de medida en el Sistema Internacional (SI) es Siemens por metro (S/m) [20].

Matemáticamente, la conductividad eléctrica se expresa como lo inverso a la resistividad, en la Ecuación 2 se observa la fórmula matemática del campo eléctrico [21].

$$\sigma_m = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Donde:

σ_m = conductividad eléctrica del material

ρ = resistividad del material

4.1.3.1 Conductividad en el cuerpo humano

El cuerpo humano presenta una conductividad variable, es decir que en cada tejido del cuerpo existe un valor promedio de conductividad [22]. Encontrar un valor exacto para la conductividad en la piel no es fácil, debido a que la conductividad también se ve afectada por factores tales como el peso, la temperatura, la humedad, entre otras variables. En la Tabla 2 se observan los valores promedios medidos de conductividad eléctrica en tejidos del cuerpo humano, estos fueron resultados de un estudio que cuantificó el campo eléctrico in situ promediado por volumen en tejidos nerviosos de modelos anatómicos masculinos y femeninos japoneses, en la exposición a campos eléctricos y magnéticos de muy baja frecuencia [16].

Tabla 2. Conductividad de tejidos del cuerpo humano en modelos anatómicos [16].

Tejidos	S/m	Tejidos	S/m	Tejidos	S/m
Cerebelo	0,10	Páncreas	0,35	Vejiga	0,20
C.S.F	2,00	Próstata	0,40	Intestino grueso	0,10
Córnea	0,40	Intestino delgado	0,50	Duodeno	0,50
Humor acuoso	1,50	Bazo	0,10	Esófago	0,50
Materia gris	0,10	Estómago	0,50	Bilis	1,40
Hipotálamo	0,08	Contenido estomacal	0,35	Vesícula biliar	0,20
Lente ojo	0,25	Tendón	0,30	Corazón	0,10
Cuerpo pineal	0,08	Testículo	0,35	Riñón	0,10
Pituitaria	0,08	Glándula tiroides	0,50	Hígado	0,07

Tejidos	S/m	Tejidos	S/m	Tejidos	S/m
Tejidos	S/m	Tejidos	S/m	Tejidos	S/m
Glándula salival	0,35	Tráquea	0,35	Pulmón	0,14
Tálamo	0,08	Orina	0,70	Contenido del intestino grueso	0,35
Lengua	0,30	Sangre	0,70	Materia blanca	0,06
Suprarrenales	0,35	Contenido del intestino delgado	0,35	Piel	0,10
Ligamentos	0,30	Cartílago	0,18	Hueso cortical	0,02
Diafragma	0,35	Grasa	0,04	Médula espinal	0,06
Vesícula seminal	0,35	Músculo	0,35	Diente	0,02
Cuerpo cavernoso	0,35	Nervio (médula espinal)	0,03	-	-

4.1.4 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica de un material se refiere a su capacidad intrínseca para oponerse al flujo de corriente eléctrica (representa qué tan difícil es para la electricidad pasar a través de un material). Cuanto mayor sea la resistencia, más difícil será que la corriente eléctrica se desplace a través del material. Este concepto se relaciona con la longitud del material (cuanto más largo, más resistencia) y con el área de su sección transversal (cuanto más pequeña, más resistencia).

En la Ecuación 3 se observa la fórmula matemática de la resistividad [21].

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3)$$

Donde:

R = resistencia eléctrica del material

ρ = resistividad del material

l = longitud del material

S = sección transversal del material

4.1.5 Capacitancia en paralelo

La capacitancia se describe como la relación entre la carga eléctrica almacenada en unas placas y la diferencia de potencial aplicada entre ellas. Un modelo elemental de capacitor es conocido como el de placas paralelas, compuesto por dos placas metálicas de área A , separadas por una distancia d . Entre las placas existe un material dieléctrico uniforme con una constante dieléctrica ϵ . Al aplicar un voltaje (ΔV) entre las placas, se genera un exceso o déficit de carga eléctrica.

En la Ecuación 4 se observa la fórmula matemática de la capacitancia [23].

$$C_p = \epsilon_0 \epsilon * \frac{A}{d} \quad (4)$$

Donde:

C_p = capacitancia del material

ϵ_0 = permitividad del vacío

ϵ = permitividad del material

A = área de las placas

d = distancia entre placas

4.2 Pantallas táctiles

Una pantalla táctil se refiere a un módulo que se compone de un sensor y un controlador táctil, es decir que consiste en un sistema que detecta el contacto y la posición cuando hay un toque con la superficie. Los dispositivos interactivos que cuentan con una pantalla táctil se han vuelto cada vez más importantes, tanto en aplicaciones comerciales como en el consumo, las tecnologías táctiles analógicas resistivas y capacitivas proyectadas dominan el panorama. Históricamente, la resistiva siempre fue la tecnología más grande tanto en ingresos como en unidades, pero las pantallas capacitivas proyectadas superaron a la resistiva en ingresos en 2010 y en unidades en 2011, como se puede observar en la Figura 8 [9].

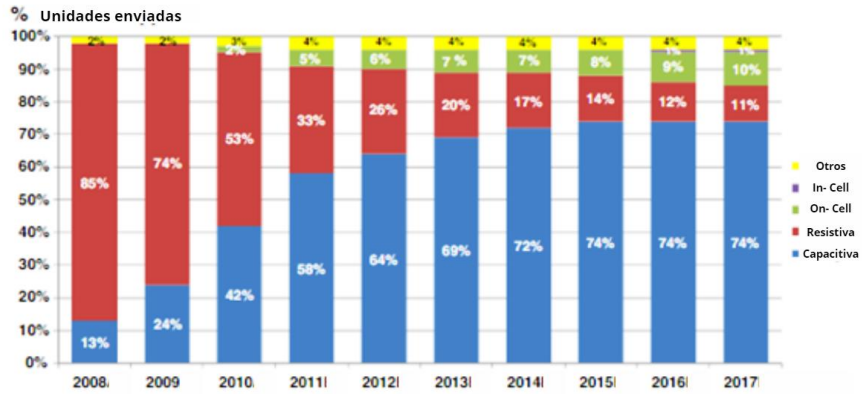


Fig.8 : Transición de pantallas táctiles resistivas a pantallas táctiles capacitivas proyectadas como tecnología dominante [9].

4.2.1 Pantallas táctiles resistivas

Una pantalla táctil resistiva analógica se puede entender como un mecanismo de interruptor mecánico que se utiliza para localizar un toque. La fabricación de una pantalla táctil resistiva típica consiste en un sustrato de vidrio y una película flexible, que están recubiertos por un lado con un conductor transparente (ver Figura 9). Con los dos lados revestidos, uno frente al otro, las dos superficies conductoras quedan separadas por puntos espaciadores aislantes transparentes muy pequeños. Cuando se le aplica un voltaje a través de una o ambas hojas y se presiona con un dedo la película flexible, las dos superficies conductoras hacen contacto eléctrico, la resistencia del conductor transparente crea un diferencial de voltaje en el punto de contacto, y esta relación de los voltajes se usa para calcular la posición de contacto [9].

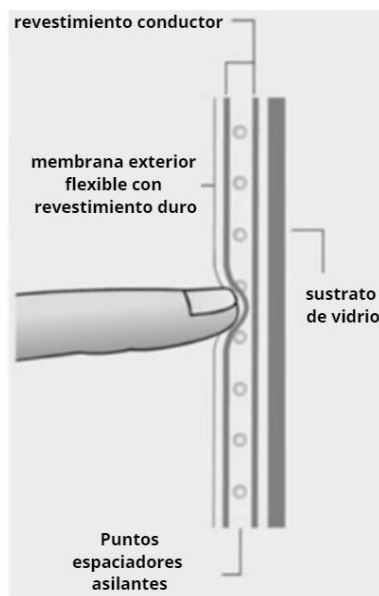


Fig. 9: Esquema de componentes de una pantalla táctil resistiva [9].

4.2.2 Pantallas táctiles capacitivas proyectadas

Actualmente existen dos tipos de pantallas capacitivas proyectadas, de autocapacitancia y de capacitancia mutua. La de auto capacitancia se basa en medir la capacitancia de un único electrodo con respecto a tierra, es decir, cuando un dedo está cerca del electrodo, la capacitancia del cuerpo humano va a aumentar la auto capacitancia del electrodo con respecto a tierra (ver Figura 10: inciso a). Mientras que las pantallas táctiles de capacitancia mutua se basan en medir la capacitancia entre un par de electrodos, es decir que cuando un dedo está cerca del par de electrodos, la capacitancia del cuerpo humano a tierra va a robar parte de la carga que se encuentra entre los dos electrodos (ver Figura 10: inciso b), por ende reduce la capacitancia entre estos electrodos [9].

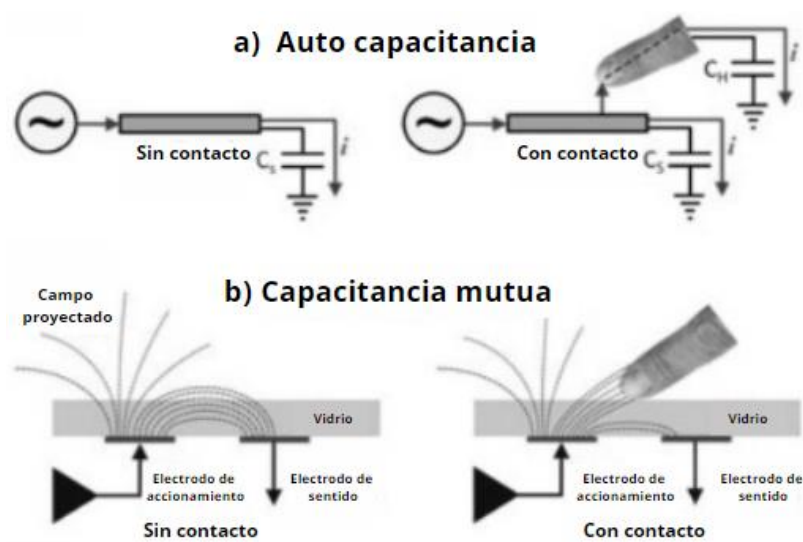


Fig.10 : Funcionamiento de las pantallas táctiles capacitivas proyectadas: a) auto capacitancia b) capacitancia mutua [9].

4.3 Polímeros

Los polímeros son sistemas macromoleculares formados por cadenas de unidades más simples llamadas monómeros [25]. Estos materiales pueden presentar diferentes estructuras: lineal, ramificada y entrecruzada. Los lineales consisten en largas cadenas de monómeros enlazados, lo cual brinda cierto grado de rigidez (ver Figura 12: inciso a); por otro lado, los ramificados poseen cadenas secundarias enlazadas a la cadena principal, este efecto es ocasionado por la presencia de impurezas o de varios grupos funcionales reactivos en los monómeros (ver Figura 12: inciso b); finalmente, los entrecruzados son aquellos en el cual dos o más cadenas se encuentran unidas por cadenas secundarias, formando un sistema de red (ver Figura 12: inciso c) [26]. Los polímeros de estructura lineal y ramificada suelen ser estructuras de polímeros termoplásticos, mientras que los polímeros con estructura entrecruzada holgada son conocidos como elastómeros.

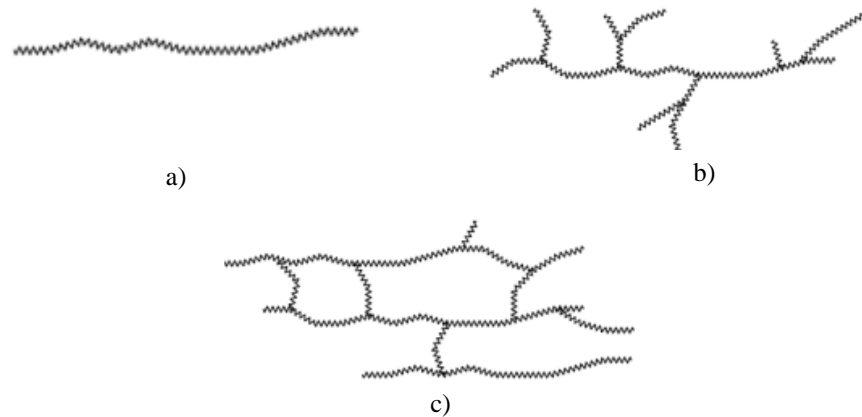


Fig.11 : Estructura esquemática de los polímeros: a) lineal b) ramificada c) entrecruzada [27].

4.1.1 Polímeros conductores

Los polímeros convencionales se caracterizan por no poder conducir la electricidad, por lo cual son conocidos como materiales aislantes. En 1977 se descubrió un polímero conductor debido a un error de un estudiante del doctor Hideki Shirakaw en el Instituto Tecnológico de Tokio, quien agregó mil veces más catalizador (yodo) a una muestra de poli acetileno, aumentando su conductividad eléctrica mil millones de veces. Este suceso fue el preámbulo para la síntesis de polímeros conductores, o también conocidos como metales sintéticos [28].

4.1.1.1 Conducción eléctrica en polímeros

Los polímeros están principalmente formados por átomos de hidrógeno y carbono, los cuales poseen uno y cuatro electrones de valencia. En un material conductor, el principio de flujo eléctrico se basa en el movimiento de los electrones a través de "estados discretos de energía" conocidos como bandas; estas bandas pueden estar llenas, vacías o en algún nivel intermedio. Para que un material sea conductor debe tener sus bandas de energía parcialmente llenas, para permitir que los electrones puedan moverse libremente [28].

Existen dos tipos de bandas, la de último grado de ocupación denominada banda de valencia (presente en los enlaces entre átomos y moléculas) y la banda superior donde se encuentran los electrones libres denominada banda de conducción (ver Figura 12). La separación energética entre las dos bandas es denominada energía de Gap, y sirve como medida para clasificar los materiales; mientras mayor sea la energía más aislante es el material [28].

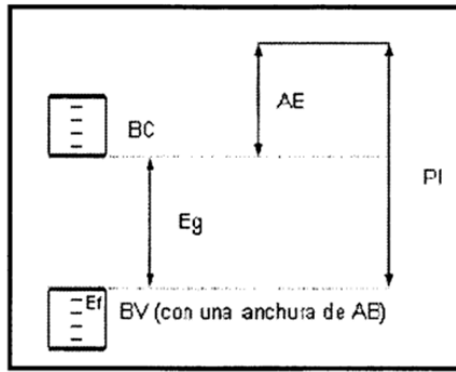


Fig.12 : Representación gráfica: Banda de Valencia (BV), Banda de Conducción (BC), Anchura de la Banda de valencia (AB), Energía de Gap (Eg) [28].

Otro término importante es la anchura de la banda de valencia (AB), que se relaciona con el grado de conjugación de los electrones "pi". En los polímeros conductores se presenta una conjugación alta, lo que conlleva a una deslocalización de electrones que se traduce en cierta movilidad de estos. Los polímeros conductores naturales más comunes cuentan con estructuras conjugadas de enlaces simples y dobles (ver Figura 13); sin embargo, que un material tenga una alta conjugación solo lo hace semiconductor, para que sea conductor debe también romperse el balance electrónico que éste posea y de esta manera eliminar la brecha de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción [28].

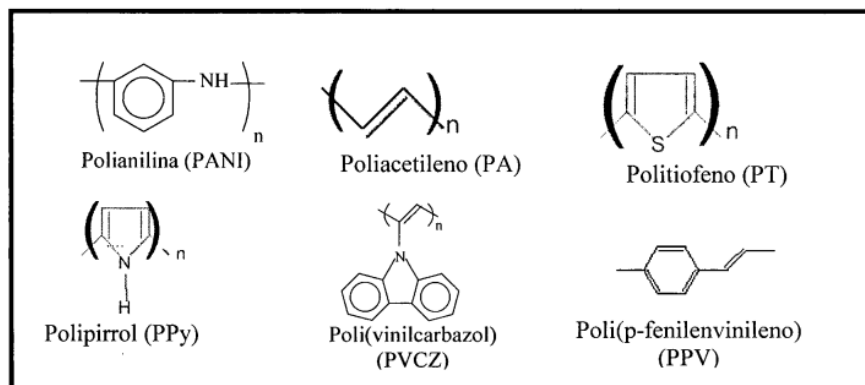


Fig.13 : Ejemplos de estructuras de polímeros conductores [28].

4.1.1.2 Clasificación de polímeros conductores

Los materiales conductores eléctricos con matriz polimérica se pueden subdividir en dos categorías, los materiales conductores extrínsecos e intrínsecos:

- Los conductores extrínsecos son materiales compuestos que se obtienen a partir de añadir cargas conductoras (como negro de humo, polvo metálico, hilos o fibras metálicas) en la matriz polimérica (silicona, caucho, PDMS, entre otros polímeros no conductores); los cuales, por encima de la concentración de percolación, forman caminos conductores a lo largo del material, confiriendo así la propiedad de conductividad eléctrica.

- Por otro lado, los conductores intrínsecos son materiales poliméricos cuyas moléculas son capaces de conducir electricidad (PANI, PA, PPy, PEDOT, entre otros); es decir, el propio polímero se convierte en conductor después de someterse a un procesamiento específico, por ende, la conductividad es una propiedad intrínseca del material [29].

También podemos encontrar una variación en los polímeros intrínsecos, que son los polímeros intrínsecos mezclados con polímeros no conductores. Surgen porque inicialmente se pensaba que los polímeros conductores intrínsecos o también llamados semiconductores, iban a presentar las propiedades mecánicas de los polímeros convencionales como la flexibilidad, pero no ocurre así, esto es debido a la deslocalización electrónica presente en la estructura los hace más rígidos que los polímeros dieléctricos. Por esta razón, se hace necesario la adición de polímeros no conductores que ofrezcan unas buenas propiedades mecánicas [28].

Estado del arte

A pesar de que actualmente, existen soluciones en el mercado extranjero, como prótesis que permiten el manejo de pantallas táctiles, los fabricantes no hacen pública la información sobre la composición de estas prótesis o elementos. Otras soluciones, como el uso de lápices especiales o posturas compensatorias por parte de los usuarios con prótesis de miembro superior, son solo soluciones parciales que no brindan verdadera autonomía ni mejora en la calidad de vida.

A continuación, se describen metodologías de fabricación para diseñar un material polimérico conductor; es importante aclarar que al realizar la investigación no fue posible encontrar en la bibliografía estudios previos que buscaran de forma exacta diseñar un material polimérico conductor que permita la interacción con pantallas táctiles; por lo tanto, se utilizará material bibliográfico donde los autores se enfocaron en diseñar y evaluar polímeros conductores.

5.1 Métodos de fabricación para polímeros no conductores

Existen diferentes metodologías para obtener polímeros conductores extrínsecos. Este trabajo se enfocará en la combinación de polímeros no conductores, con adición de negro de humo (CB, por sus siglas en inglés), grafito (Gr) y nanotubos de carbono cortos de pared múltiple (MWCNT's, por sus siglas en inglés).

5.1.1 Compuestos de caucho de silicona con redes de nanotubos de carbono (CNT)/grafeno/nanofibras de celulosas alineadas verticalmente

En el estudio propuesto por Song y Zhang, 2022, se utilizaron nanotubos de carbono y grafeno como rellenos conductores para generar un compuesto con caucho líquido de silicona. La metodología consistió en usar polivinilpirrolidona (PVP) como dispersante para estos conductores; por consiguiente, se empleó tecnología de micro fluidización a alta presión para preparar dispersiones acuosas de CNT y grafeno, y se utilizó nanofibra de celulosa (CNF) como adhesivo; además, se agregó a las dispersiones para conectar los rellenos conductores. Se prepararon espumas conductoras CNT/grafeno/CNF alineadas verticalmente mediante la estrategia de ensamblaje de plantilla de hielo [28]. El caucho de silicona líquida (LSR) se rellenó en las espumas para obtener un material compuesto, y por último el polimetilhidrosiloxano injertado con metacrilato de 3- (trimetoxisililo) propilo (PHMS-g-MPS) se sintetizó para mejorar la interacción de interfaz entre el caucho de silicona y los rellenos conductores. Este estudio entregó un método para preparar compuestos de caucho de silicona conductora, con un umbral de percolación conductivo de 0,08% y una conductividad eléctrica de entre 0,12 y 100 S/m [30].

5.1.2 Sensor táctil multimodal altamente deformable y sensible basado en compuestos de caucho conductor para monitorear la presión y la temperatura

En el estudio propuesto por Zhu *et al.*, 2022, se desarrolló un sensor táctil deformable a partir de compuestos conductores con matriz de silicona (caucho). Se añadieron rellenos de partículas de MWCNT, GP y CB para conseguir la conductividad eléctrica en la silicona. La metodología de fabricación consistió en mezclar los rellenos conductores, previamente pesados en etanol, se agitaron y dispersaron con una varilla de vidrio. El volumen de etanol es de 30% del material de caucho. Luego, los rellenos conductores se dispersaron por ultrasonido durante 1 h. La matriz RTV (goma de silicona vulcanizada a temperatura ambiente) se añadió de forma proporcional a un vaso de precipitado y se agitó a 300 rpm utilizando agitador eléctrico durante 30 min. Luego, se usó un agente de curado con una fracción del 5% del RTV, este se añadió a la matriz y se agitó a 500 rpm durante 30 min.

Después, se utilizó una bomba de vacío para eliminar cualquier burbuja a 0,09 MPa, durante 30 min. Posteriormente, la mezcla líquida se extrajo con un tubo de aguja y se inyectó en un molde de politetrafluoroetileno; estos materiales se centrifugaron a una velocidad de 200 rpm durante 120 segundos. Finalmente, la mezcla se colocó en un horno de secado a 60 grados durante 24 horas. Este estudio entregó un sensor táctil multimodal flexible, que puede medir simultáneamente la presión y la temperatura gracias a los efectos sensibles que genera el compuesto de caucho (0.01171 kPa^{-1} and $2.46\text{--}30.56\%/^{\circ}\text{C}$) en un amplio espectro (rango de detención 0-110KPa y 30-90°C); además, se destaca en su procesabilidad, capacidad de estiramiento y repetibilidad [31].

5.1.3 Propiedades funcionales mejoradas de nanocompuestos de polietileno de baja densidad que contienen rellenos híbridos de nanotubos de carbono de paredes múltiples y nanonegro de carbono

En el estudio propuesto por Paszkiewicz *et al.*, 2020, se desarrolló una investigación relacionada con el desarrollo de nuevos materiales eléctricamente conductores basados en nanorellenos híbridos de carbono. La metodología de fabricación consistió en preparar nanocompuestos de polietileno de baja densidad (LDPE) utilizando MWCN y nanonegro de carbono (nCB). Se usó una extrusora de doble tornillo con alimentadores gravimétricos para mezclar los componentes, y se prepararon tres series de nanocompuestos con diferentes concentraciones de nCB y de la mezcla híbrida de MWCNT/nCB. El proceso de extrusión implicó la preparación de un masterbatch con una concentración del 20% en peso de nanorellenos, que luego se diluyó a concentraciones más bajas en la matriz de LDPE. Se establecieron las temperaturas de extrusión y velocidades de rotación de los tornillos para los diferentes tipos de nanocompuestos.

Posteriormente, se obtuvieron muestras en forma de mancuerna mediante moldeo por inyección.

Este estudio concluyó que se obtuvo una dispersión uniforme de los nanomateriales mediante el análisis SEM, además, se encontró que la resistencia a la tracción disminuyó con una mayor concentración de relleno (16,88-19,75 Mpa) con respecto al LDPE puro (22.93 MPa), mediante ensayos de tensión. Por otro lado, no se observaron mejoras significativas en las propiedades de los compuestos híbridos MWCNT/nCB en comparación con LDPE/MWCNT, lo que sugiere una ausencia de efecto sinérgico entre nCB y MWCNT; por medio del análisis de resistividad volumétrica se encontró que los compuestos que contenían solo MWCNT mostraron una conductividad eléctrica más alta (en el orden de 10^2 S/m) que los que tenían solo nCb (en el orden de 10^{-10} S/m) o los híbridos MWCNT/nCB (en el orden de 10^1 S/m) con la misma carga de masa [32].

5.1.4 Nanotubos de carbono híbridos y negro de humo conductor en compuestos de caucho natural para mejorar la conductividad eléctrica al reducir los espacios que separan los encapsulados de nanotubos de carbono.

El estudio propuesto por Nakaramontri *et al.*, 2017, se centró en la mejora de la conductividad eléctrica de los compuestos de caucho natural a través de la utilización de una combinación de CNT híbridos y CCB. El enfoque principal del estudio fue reducir los espacios entre los encapsulados de nanotubos de carbono, lo que buscó mejorar la eficiencia de la conductividad eléctrica. La metodología de fabricación consistió en preparar los compuestos de caucho natural (NR) con cargas híbridas de CCB, CNT y CNT/CCB mediante mezcla en estado fundido utilizando un molino abierto de dos rodillos a temperatura ambiente. Se ajustaron los parámetros del molino para cada lote de 200 g y se realizó un proceso de mezclado de 15 minutos que incluyó la adición secuencial de activadores y curativos. Posteriormente, el compuesto se acondicionó en un desecador durante 24 horas antes de preparar láminas a través del moldeo por compresión a 160 °C.

Este estudio concluyó que los compuestos de NR con CNT presentan una conductividad limitada que se mejoró mediante la adición de CCB. Se logró una dispersión homogénea de la carga en la matriz de NR, esto fue analizado mediante microscopía de luz reflejada. Por otro lado mediante un medidor de LCR se concluyó que gracias a la dispersión homogénea se logró una conductividad eléctrica significativamente alta (en el orden de 10^2 μ S/cm). La presencia de redes de relleno con CNT unidas por agregados de CCB facilitó la creación de túneles de electrones, lo que condujo a una conductancia de tipo óhmico en los vulcanizados de NR con relleno híbrido CNT/CCB. Se confirmó mediante un análisis estadístico ANOVA, que el tipo de relleno y la carga de relleno tenían una fuerte influencia en la conductividad relativa de los compuestos,

mientras que el tipo de relleno se identificó como el parámetro principal en la obtención de vulcanizados de NR conductores [33].

6.1 Caracterización del material tomado como referente

Se procedió a analizar las propiedades eléctricas y fisicoquímicas de un material utilizado en la fabricación de stylus (lápiz digital o bolígrafo para tablet) con el objetivo de establecer propiedades óptimas de referencia para la interacción del usuario con pantallas táctiles. En este proceso se llevó a cabo la caracterización de una muestra del material mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) para examinar su morfología y detectar la eventual presencia de partículas conductoras. Este análisis se realizó utilizando un microscopio electrónico de barrido (Tescan Clara, Brno, República Checa) ubicado en el Instituto iÓmicas de la Pontificia Universidad Javeriana.

Además, se realizó un análisis químico de una muestra mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) utilizando un equipo Spectrum 100 (PerkinElmer, Shelton, USA) ubicado en la Universidad del Valle, con el objetivo de identificar las interacciones moleculares y determinar la posible matriz polimérica empleada en el desarrollo del material conductor de referencia.

Finalmente, se empleó un analizador de impedancias (Hioki, Ueda, Japón) ubicado en la Pontificia Universidad Javeriana, para analizar una muestra del material de referencia. Este analizador permite, a partir de un modelo y de la medición de impedancia y fase, determinar la resistencia y capacitancia eléctrica en paralelo del material.

6.2 Metodología de fabricación de material con matriz polimérica y rellenos de partículas conductoras.

A continuación, se detalla el diseño de mezclas establecido para la obtención de las mezclas polímero-partícula conductora. En primer lugar, se incluye el análisis estadístico realizado para determinar los porcentajes y proporciones necesarios en cada muestra y finalmente, se presenta el paso a paso de la metodología de fabricación seguida para la obtención de los compuestos.

6.2.1 Materiales

La elección de materiales se basó en un análisis del estado del arte, identificando las partículas con mayor conductividad a menor carga de relleno, así como polímeros que facilitarían las mezclas. Además, se consideró la disponibilidad de recursos como criterio adicional en la selección.

A continuación, se presentan los materiales usados durante la ejecución de este proyecto:

- Negro de humo conductor (CB, por sus siglas en inglés) – Corporación Cabot (Cartagena, Colombia).
- Silicona líquida mold star 15 slow – SUMIGLAS S.A. (Medellín, Colombia).
- Grafito en hojuelas (Gr, 99%), tamaño de partícula de malla - 325 ($\geq 99\%$), natural- Sigma Aldrich.
- Nanotubos de carbono cortos de pared múltiple (MWCNT's, por sus siglas en inglés) - Chengdu Organic Chemicals Co. Lt (Timesnano), (Chengdú, China).

6.2.2 Análisis Estadístico

Las mezclas polímero-partícula conductora, están conformadas por: silicona, MWCNT's, CB y/o Gr, en la Figura 14 se muestra de manera esquemática las distintas mezclas a realizar.

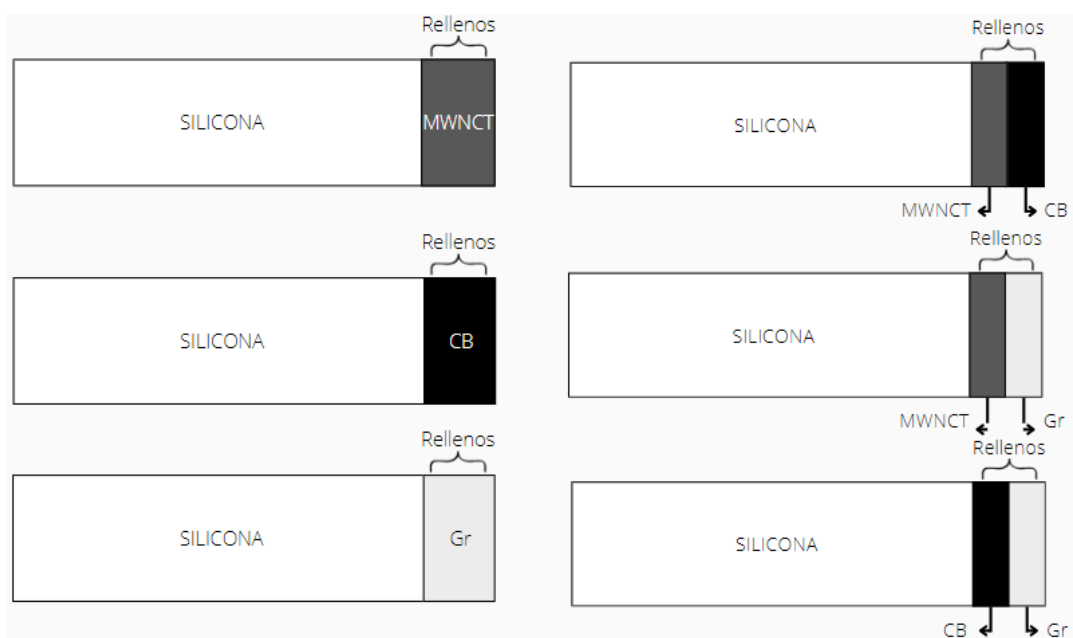
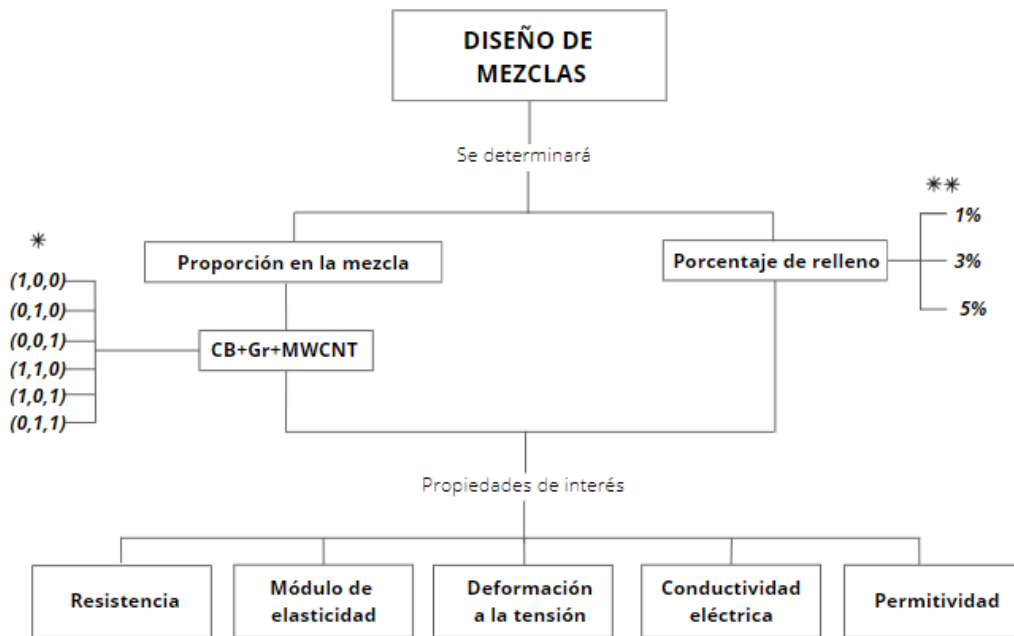


Fig.14 : Esquema de composición de proporciones del material a diseñar.

A este material se le evaluaron propiedades mecánicas (resistencia, módulo de elasticidad y deformación máxima a la tensión) y eléctricas (conductividad y permitividad eléctrica), que permitieron predecir el comportamiento que tendrán al usarse en la fabricación de pulpejos para prótesis de miembro superior, con el fin de identificar cuál de los rellenos (MWCNTs, CB y Gr) tiene mayor incidencia sobre las propiedades de interés. Para esto, se realizó un diseño de experimentos mixto teniendo en cuenta lo evidenciado en el estado del arte de los porcentajes y mezclas que presentaban las mejores propiedades mecánicas y eléctricas de acuerdo a los requerimientos establecidos. En el diseño de experimentos mixto, se tiene un diseño con

mezclas y una factorial de un solo factor (análisis de varianza). Con esto se busca evaluar el efecto del porcentaje y tipo de relleno (MWCNT's, CB y Gr), además de la sinergia entre estos, en las propiedades mecánicas a tensión, la permitividad y la conductividad eléctrica del material, como se puede observar en la Figura 15.



* Proporción (MWCNT, CB, Gr): proporción de mezcla de los componentes de relleno, para cada porcentaje de relleno

** Porcentaje(1%,3%,5%): porcentaje de relleno con respecto a la silicona

Fig.15 : Diagrama del análisis estadístico planteado para el diseño del material.

6.2.1 Metodología de fabricación

6.2.1.1 Proceso de obtención de materiales

El material compuesto de matriz polimérica se desarrolló a partir de la revisión del estado del arte de diferentes trabajos donde los investigadores evalúan el efecto de la incorporación de partículas conductoras en las propiedades físico-mecánicas y eléctricas de compuestos con matriz polimérica. Teniendo en cuenta esto, se obtuvieron nueve tipos de muestras, tres con incorporación de CB, tres con incorporación de Gr, una con incorporación de MWCNT's y dos mezclas híbridas de CB/ MWCNT's.

Las concentraciones de partículas en peso de la matriz de silicona fueron del 1%, 3% y 5% para las muestras de CB y Gr, mientras que la muestra de MWCNT's se realizó al 1%. Finalmente, las mezclas híbridas de CB/ MWCNT's se realizaron al 1 y al 2% en proporción de (1/2,1/2). Cabe aclarar que las mezclas que contenían MWCNT's presentaron desafíos en la dispersión durante el proceso de fabricación, lo que obligó a realizar ajustes en los porcentajes según lo previsto en el diseño de mezclas mencionado con anterioridad. Asimismo, se llevaron a cabo análisis eléctricos preliminares que permitieron descartar la mezcla de Gr/MWCNT's debido a que el Gr no generó cambios significativos en la conductividad del material.

La preparación de la mezcla se llevó a cabo en la Pontificia Universidad Javeriana Cali, utilizando un taladro de columna (KTC, Miami, USA) a una velocidad de 550 rpm. Inicialmente, se agitaron 25 g de la silicona con 25 g del catalizador durante 20 minutos. Luego, se añadió el relleno de partículas conductoras correspondiente y se agitó durante otros 20 minutos. Posteriormente, la mezcla se vertió y moldeó en probetas tipo V según la norma ASTM D638, utilizando moldes de acero inoxidable y el método de compresión. Las muestras resultantes se dejaron secar a temperatura ambiente durante 12 horas, tras lo cual se desmoldaron y almacenaron. Este proceso se repitió para cada porcentaje y proporción mencionados. La Figura 16 proporciona una representación visual detallada del procedimiento paso a paso.



Fig.16 : Diagrama paso a paso del proceso de obtención de los materiales.

6.3 Caracterizar y evaluar el desempeño mecánico y eléctrico de los materiales seleccionados y/o diseñados.

Para las partículas conductoras, se realizó la caracterización morfológica mediante SEM de una muestra por cada partícula, en el equipo mencionado con anterioridad. Además, se realizó un ensayo para caracterización de las propiedades eléctricas mediante un analizador de impedancia con el fin de determinar la resistencia y capacitancia en paralelo de cada partícula conductora (MWCNT's, CB y Gr).

Para los materiales compuestos, al igual que las partículas, se llevó a cabo una caracterización morfológica mediante SEM, donde se analizaron las diferentes fases del material y la distribución de las partículas conductoras. La evaluación de las propiedades eléctricas de los compuestos se realizó mediante un analizador de impedancia, para determinar posteriormente la conductividad y permitividad eléctrica, se realizó un ensayo para cada compuesto obtenido. Finalmente, las propiedades mecánicas se determinaron mediante ensayos de tensión siguiendo la norma ASTM D638; para ello, se utilizó una máquina universal de ensayos Modelo 3366 (INSTRON, Norwood, USA), equipada con una celda de carga de 10 kN, ubicada en la Pontificia Universidad Javeriana Cali. La velocidad de ensayo fue de 50 mm/min y se realizaron 6 ensayos para cada probeta obtenida. Este ensayo permitió determinar la resistencia, el módulo de elasticidad y la deformación máxima de los materiales.

6.4 Elegir el material que más se ajuste a los requerimientos necesarios para ser usado en pantallas táctiles capacitivas proyectadas.

A partir de los resultados y el análisis obtenido en el objetivo anterior, se seleccionó el o los materiales que más se ajustaron a las propiedades de interés del diseño (resistencia, módulo de elasticidad y deformación máxima a la tensión; conductividad y permitividad eléctrica). Además, se realizó una prueba de uso, que consistió en interacciones entre el material y una pantalla táctil para observar su comportamiento frente al estímulo percibido.

7.1 Caracterización del material tomado como referente

Como se mencionó anteriormente, se empleó espectroscopia FTIR (ver Figura 17) para la caracterización del material de referencia. Este espectro exhibe tres bandas notables entre los 1450 cm^{-1} , 2847 cm^{-1} y 2916 cm^{-1} , que se atribuyen a movimientos de tensión de los enlaces C-H, tensión C-C a 1491 cm^{-1} y un movimiento de flexión de $-\text{CH}_2$ en 697 cm^{-1} y 756 cm^{-1} . Es relevante señalar que estos mismos picos son comunes en los espectros de muchos polímeros, ya que son representativos de sus grupos funcionales principales [34]. Entre ellos, se pueden distinguir picos específicos en 907 cm^{-1} , 963 cm^{-1} y 2172 cm^{-1} , los cuales son característicos de polímeros como el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), Polietileno de Alta densidad (HDPE) y Polipropileno (PP) [35] [36].

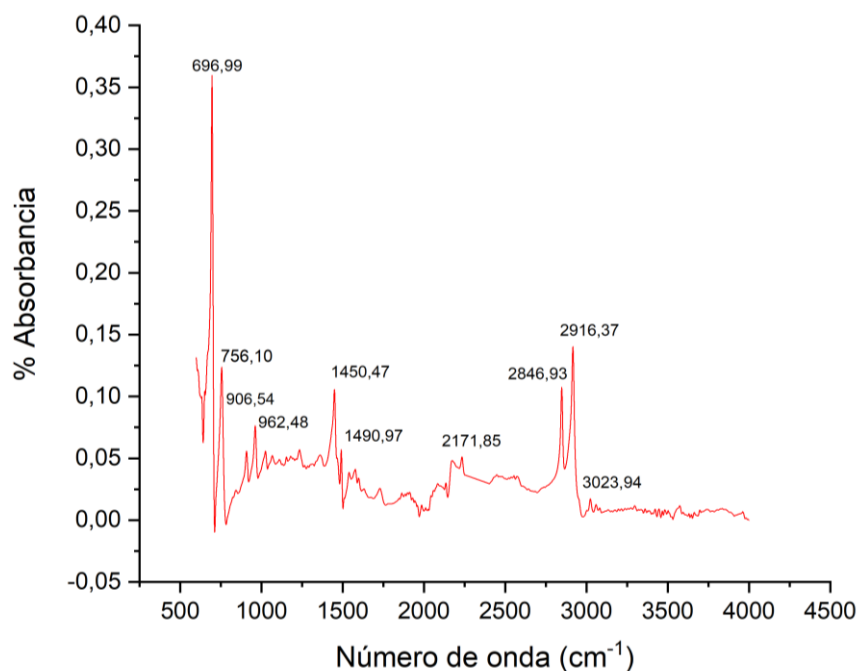


Fig.17 : Análisis del espectro del material referente.

En la Figura 18 se exhiben las micrografías SEM del material examinado a distintas magnificaciones. Se evidencia la presencia de una fase dispersa conformada por partículas conductoras. Al realizar comparaciones, se asemejan a un material polimérico con una dispersión de grafeno, negro de humo o posiblemente una combinación de ambos. Estas imágenes guardan similitud con las obtenidas por Minju *et al.*, [37], donde se observa una matriz de ABS con dispersión de grafeno en diferentes proporciones [38] [39].

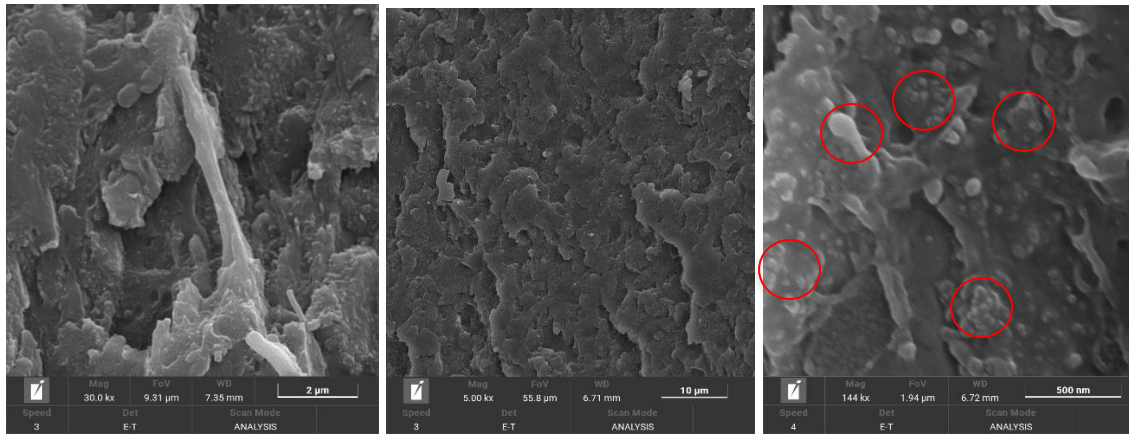


Fig.18 : Micrografía SEM del material referente.

En la Figura 19 se presentan los resultados de resistencia y capacitancia eléctrica del material de referencia. Se empleó un modelo que considera la capacitancia y resistencia en paralelo, evaluados en el rango de 10 a 80 MHz. Estos resultados proporcionan una referencia para evaluar los datos a obtener de los materiales compuestos diseñados. Se puede inferir que la resistencia eléctrica es significativamente alta (del orden de $M\Omega$) y la capacitancia es baja (del orden de pF), pero a pesar de esto, el material referente permite el flujo de carga a través de él.

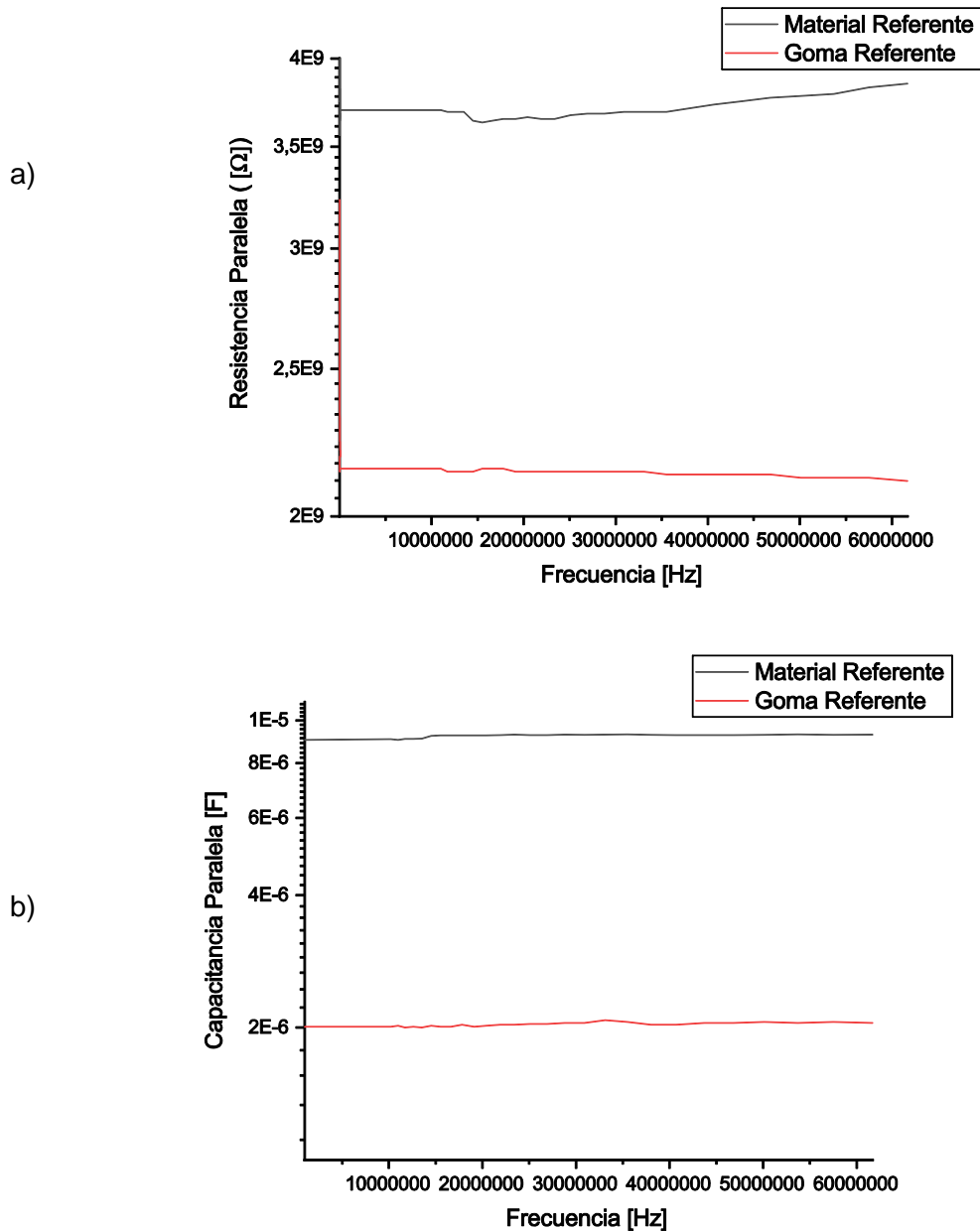


Fig.19 : Resultados material referente: a) Resistencias eléctricas en paralelo vs Frecuencia b) Capacitancia en paralelo vs Frecuencia.

En comparación con la silicona pura (ver Figura 20), que constituye nuestro material polimérico base y que fue evaluada con el modelo mencionado anteriormente pero evaluados en el rango de 0,1 a 0,8 KHz, se observa que exhibe una resistencia eléctrica más alta (del orden de TΩ) y una capacitancia similar al material de referencia (del orden de pF).

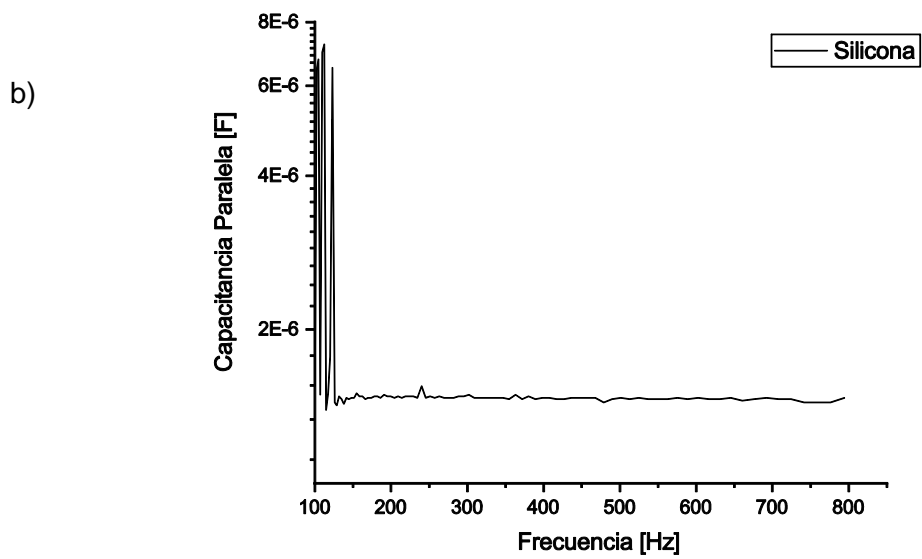
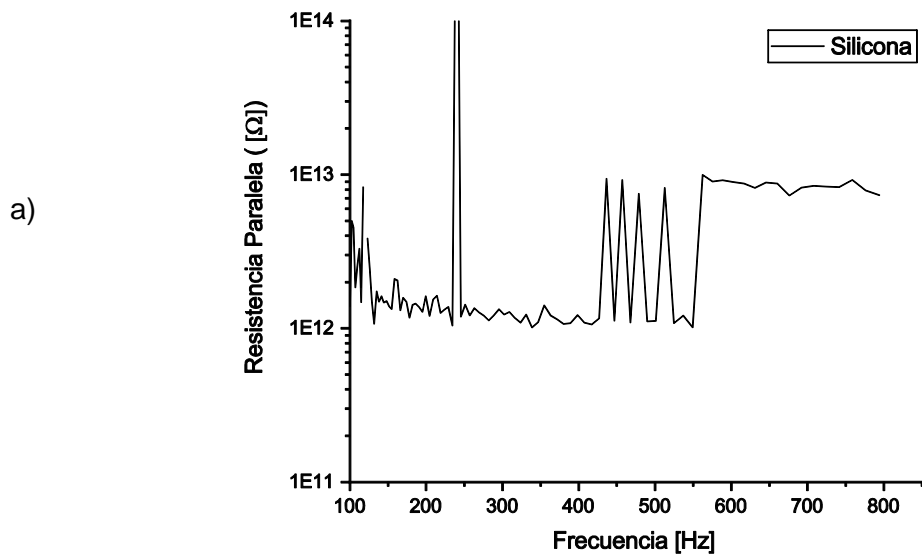


Fig.20 : Resultados Silicona pura: a) Resistencias eléctricas en paralelo vs Frecuencia b) Capacitancia en paralelo vs Frecuencia.

7.2 Caracterizar y evaluar el desempeño mecánico y eléctrico de los materiales seleccionados y/o diseñados.

7.2.1 Caracterización de partículas conductoras

En las Figuras 21-23 se presenta el análisis SEM realizado para caracterizar las partículas conductoras. Al comparar los resultados con la literatura, se destacó la concordancia entre lo obtenido y lo esperado. En la micrografía SEM del CB, se distingue una estructura de partículas pequeñas y amorfas de diversos tamaños que configuran un conjunto irregular. Estas partículas, mayormente aglomeradas, adoptan una forma esférica [39] [40]. Por otro lado, en la micrografía SEM del Gr, se visualiza una estructura laminar característica con capas apiladas de átomos de carbono [41] - [43]. Estas capas exhiben una disposición ordenada y paralela, conformando una estructura plana y regular. Además, se aprecian las distintas capas de grafeno que constituyen la estructura del grafito. En la micrografía SEM de los MWCNT's, se distingue una estructura de aglomerados cilíndricos alargados y sueltos compuesto por múltiples capas enredadas entre sí (orientación y disposición aleatoria), se puede observar una alta relación de aspecto (longitud/diámetro), con una longitud que varía significativamente [44] [45].

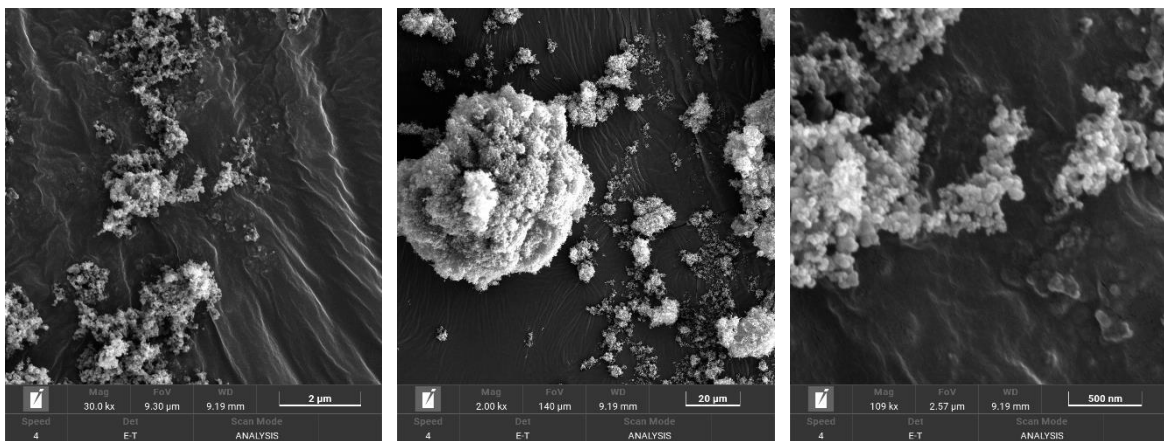


Fig.21 : Micrografías SEM de partículas conductoras: CB.

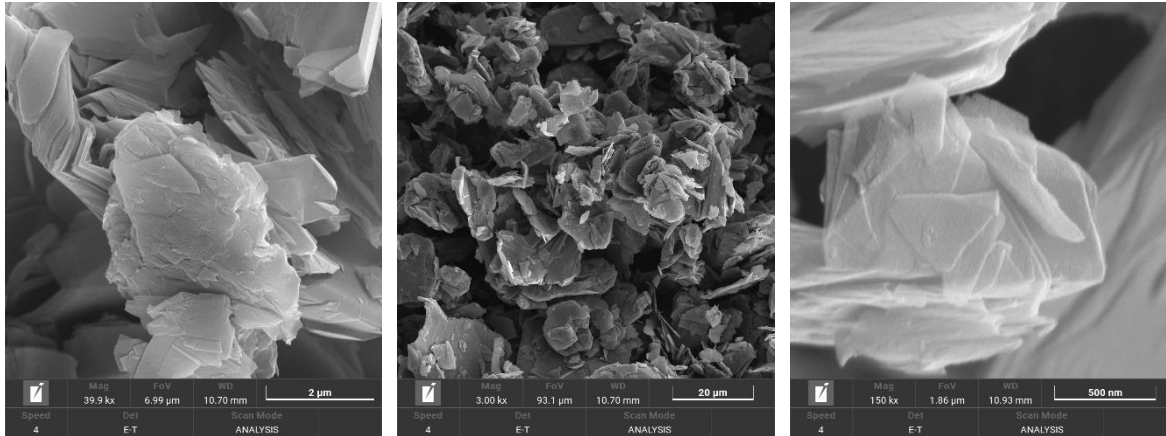


Fig.22 : Micrografías SEM de partículas conductoras: Gr.

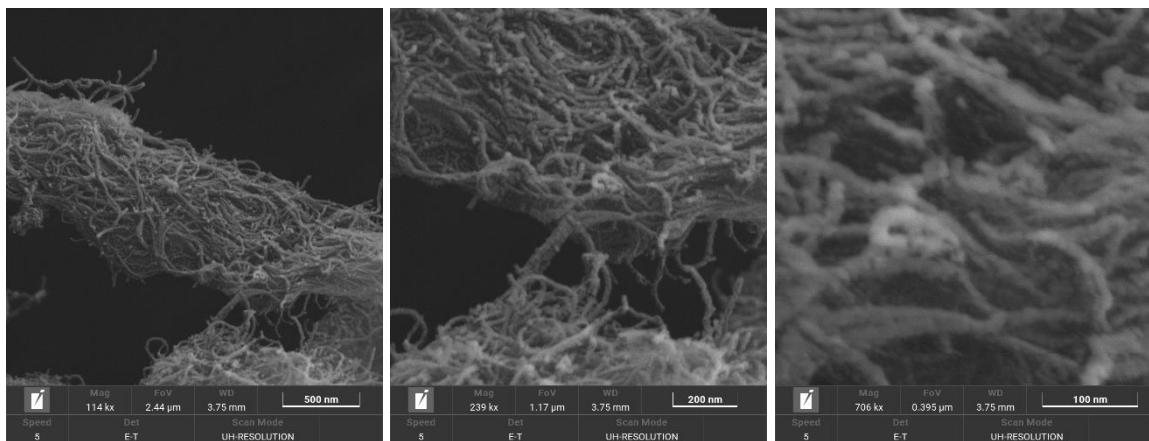


Fig.23 : Micrografías SEM de partículas conductoras: : MWCNT's.

Por otro lado, se empleó el mismo modelo de medición de propiedades eléctricas para evaluar los polvos de partículas conductoras, considerando la capacitancia y resistencia eléctrica en paralelo, pero evaluados en el rango de 0,1 a 0,8 KHz. Estos resultados proporcionan una visión de las propiedades iniciales, permitiendo inferir cómo afectarán a la silicona. Se pudo determinar que, en cuanto a la resistencia eléctrica, los MWCNT's presentan la resistencia eléctrica más alta, lo cual no concuerda con el comportamiento esperado según la bibliografía [32] [33]; esto podría indicar posibles impurezas en el material. Por otro lado, el CB muestra la resistencia eléctrica más baja, indicando que la mezcla con estas partículas podría generar una mayor reducción de la resistencia eléctrica en la silicona. En cuanto al Gr, presenta una resistencia eléctrica media, cercana a la resistencia eléctrica del CB. Todas las resistencias eléctricas medidas están en el orden de los $M\Omega$ (ver Figura 24).

En relación con la capacitancia, no fue posible determinarla para los MWCNT's, debido a que el modelo no pudo explicar su comportamiento inductivo; el CB mostró una mayor capacitancia, lo cual indicia una mayor impedancia; finalmente en el caso del Gr, aunque no presentaba un comportamiento inductivo, su capacitancia era muy baja; la capacitancia del Gr y los MWCNT's está en el orden de los nF, mientras que la capacitancia de CB en el orden de los μF (ver Figura 25).

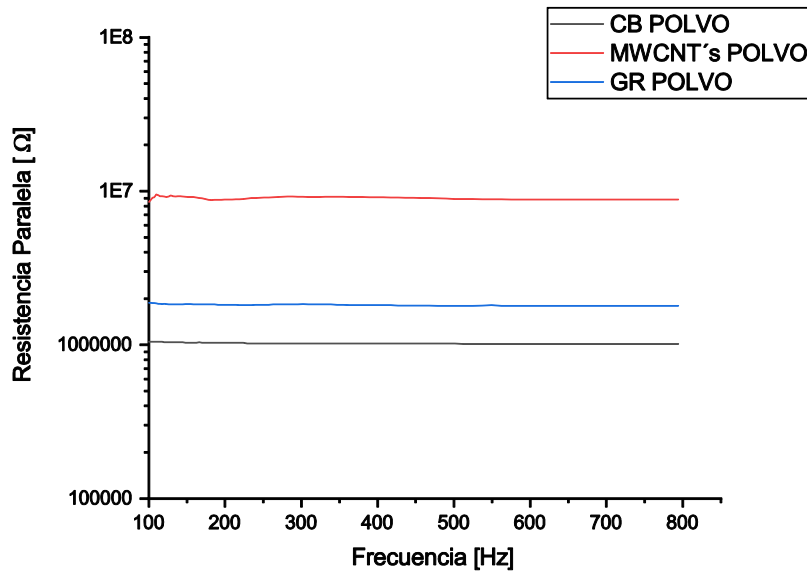


Fig.24 : Resistencia eléctrica en paralelo VS Frecuencia.

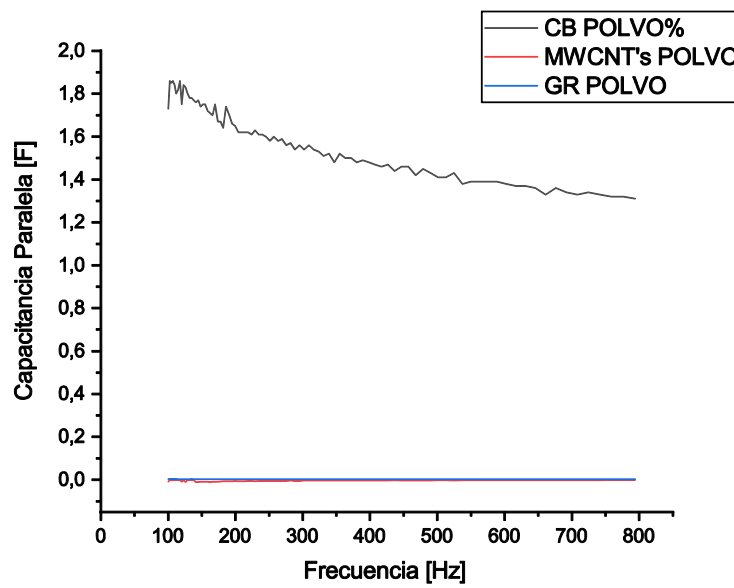


Fig.25 : Capacitancia en paralelo VS Frecuencia.

7.2.2 Caracterización de materiales compuestos

El comportamiento a tensión de cada uno de los materiales diseñados se representa en las Figuras 26. Aquí se destacan que la inclusión de Gr en menor porcentaje conlleva a una disminución en la resistencia mecánica, al igual que en el caso del CB en mayores porcentajes. En el caso de las mezclas MWCNT's y CB en mayores porcentajes, así como exclusivamente en la mezcla de MWCNT's, se revela una disminución en la resistencia mecánica. Esto se atribuye a que las partículas aparentemente actúan como concentradores de esfuerzo, posiblemente debido a la aglomeración de partículas o a una interfaz deficiente entre las partículas y la matriz de silicona [31]. En lo que respecta al módulo de elasticidad, se presenta un comportamiento congruente con lo descrito anteriormente; a mayor resistencia mecánica, mayor módulo de elasticidad y viceversa. Este patrón sugiere una rigidización del compuesto con la incorporación de las partículas, debido a que las partículas entran en las cadenas poliméricas de la silicona e impiden el desplazamiento de las mismas ante la aplicación de una fuerza [46]. Finalmente, en términos de deformación, en todos los casos, excepto en la mezcla con MWCNT's, se observa una disminución. Este hallazgo es coherente con las propiedades evaluadas anteriormente, ya que la rigidización resultante de la inclusión de partículas conlleva a una menor capacidad de deformación.

Al comparar las propiedades mecánicas obtenidas para los compuestos diseñados, el efecto de la incorporación de nanopartículas en matrices elastoméricas es similar a las obtenidas por Zhu *et al.*, 2022, y Paszkiewicz *et al.*, 2020 [31] [32].

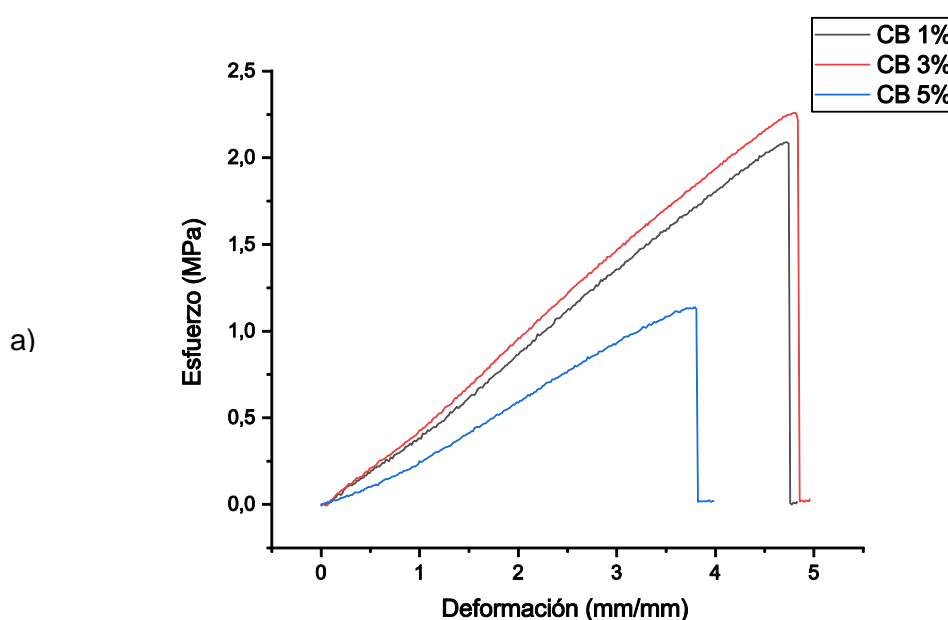


Fig.26 : Curva Esfuerzo vs Deformación de materiales diseñados: a) CB b) MWCNT's y c) Gr.

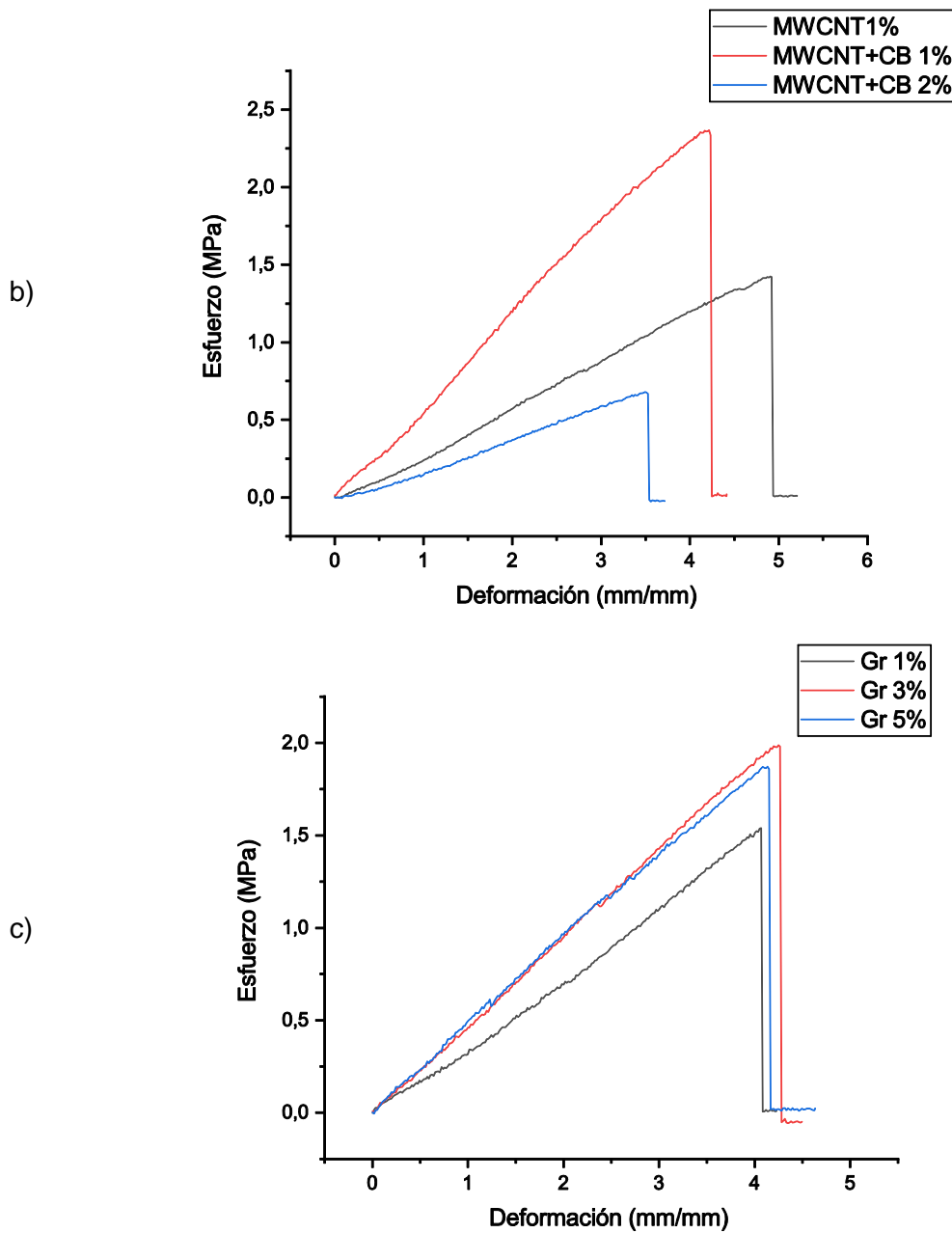


Fig.26 : Curva Esfuerzo vs Deformación de materiales diseñados: a) CB b) MWCNT's y c) Gr.

En la mezcla con 1% de refuerzo de MWCNT's y CB, se obtuvo una resistencia a la tensión de 2,39 MPa y un módulo de elasticidad de 0,61 MPa, representando el mayor aumento en la resistencia, de un 22,86 %, y el mayor aumento en el módulo de 31,86 %, respecto a la matriz de silicona, en la cual se obtuvieron valores de 1,85 MPa y 0,417 MPa para la resistencia a la tensión y el módulo, respectivamente.

Por otro lado, en la probeta con 2% de refuerzo de MWCNT's y CB, se obtuvo una deformación de 3,69, representando la mayor disminución en la deformación; de un 77,9 % respecto a la matriz de silicona en la cual se obtuvo un valor de 4,74 (ver figura 27).

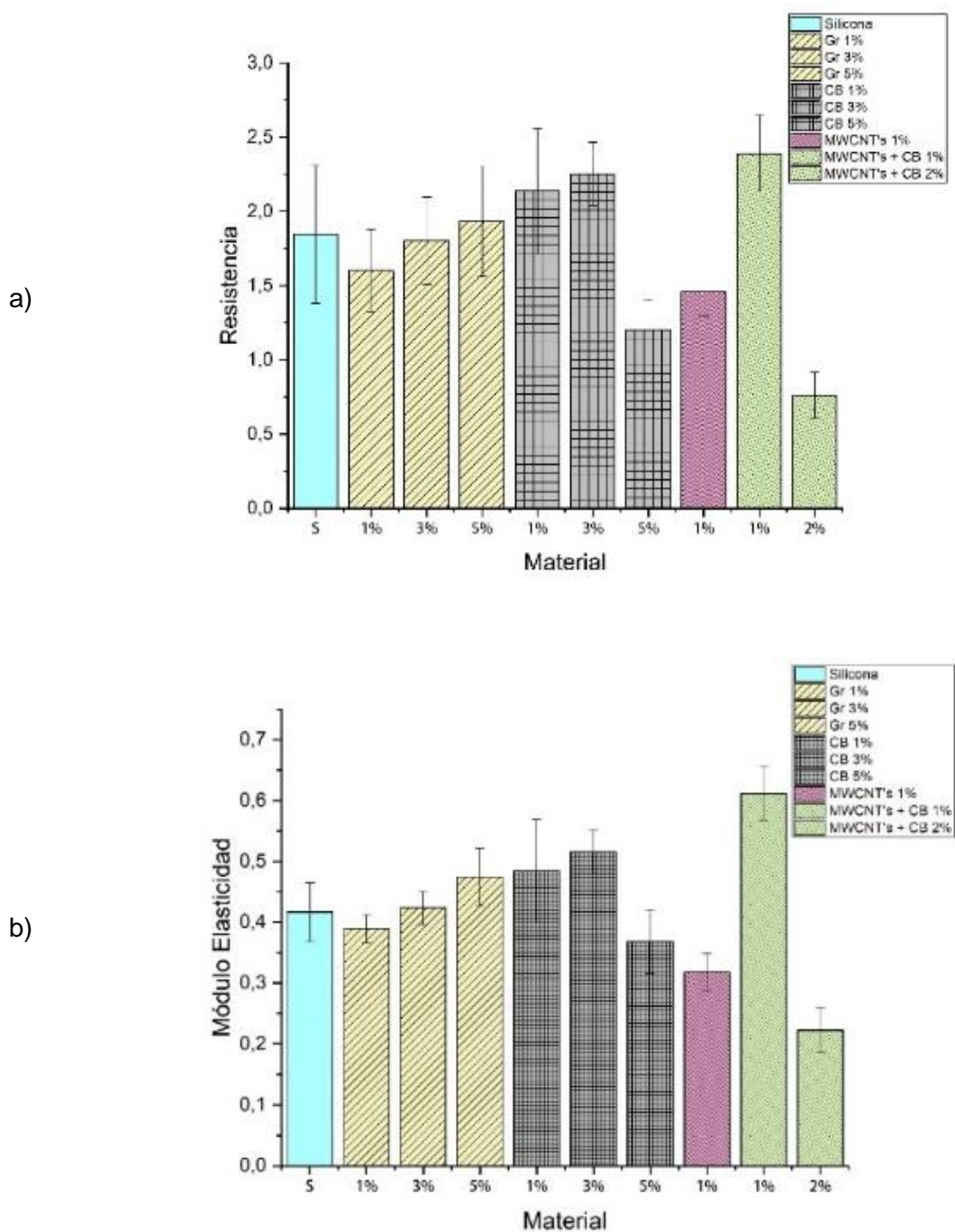


Fig.27 : Propiedades ensayo a tensión: a) Resistencia a tensión b) Módulo de elasticidad c) Deformación

c)

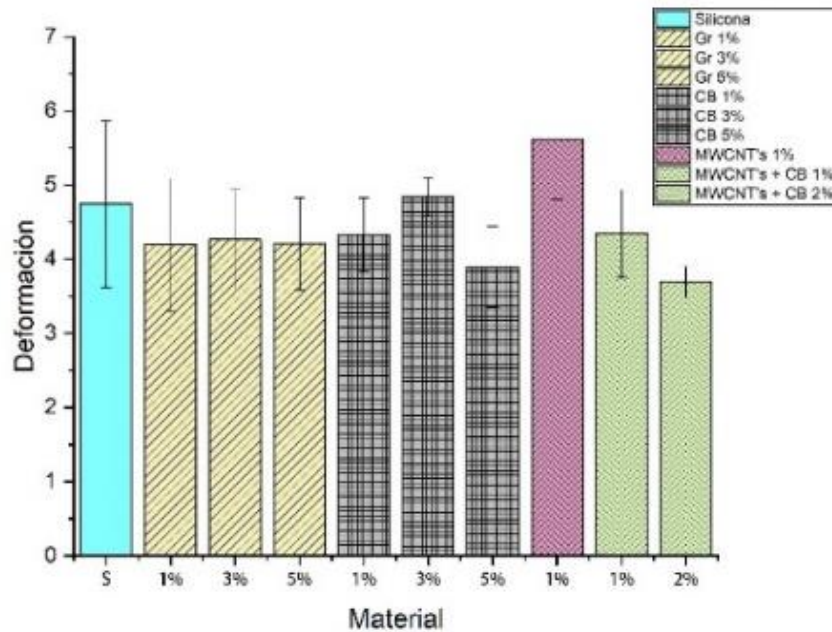


Fig.27 : Propiedades ensayo a tensión: a) Resistencia a tensión b) Módulo de elasticidad c) Deformación

En la Figura 28 se presenta el análisis mediante SEM llevado a cabo para caracterizar los compuestos obtenidos. Al comparar los resultados con la literatura, se destaca la concordancia entre lo observado y lo esperado para los compuestos de CB y Gr [31].

En la micrografía SEM de la silicona pura (ver Figura 28 - a) se aprecia una mayor homogeneidad y regularidad en comparación con aquellas muestras que contienen inclusión de partículas. En la micrografía SEM de la silicona con relleno de Gr (ver Figura 28- b) se observa una dispersión desordenada de partículas con estructuras planas y capas apiladas características del grafito. Por otro lado, en la micrografía SEM de la silicona con relleno de CB (ver Figura 28- c) se distingue una menor homogeneidad y se pueden apreciar pequeñas partículas esféricas y amorfas de diversos tamaños, formando un conjunto irregular sin aglomeraciones significativas. El SEM de la silicona con relleno de MWCNT's (ver Figura 28- d) presenta una morfología diferente a la silicona pura, lo que podría indicar una dispersión de partículas, aunque no es posible observar claramente la estructura característica de los MWCNT's, esto debido principalmente a su tamaño. Finalmente, en el SEM de la silicona con relleno de MWCNT's y CB (ver Figura 28- e) se evidencia la dispersión de partículas con formas esféricas e irregulares de diferentes tamaños.

Adicionalmente, se observa en todos los compuestos con relleno conductor un distanciamiento entre las posibles partículas, indicando una distribución deficiente que podría resultar en un aislamiento en partes del material.

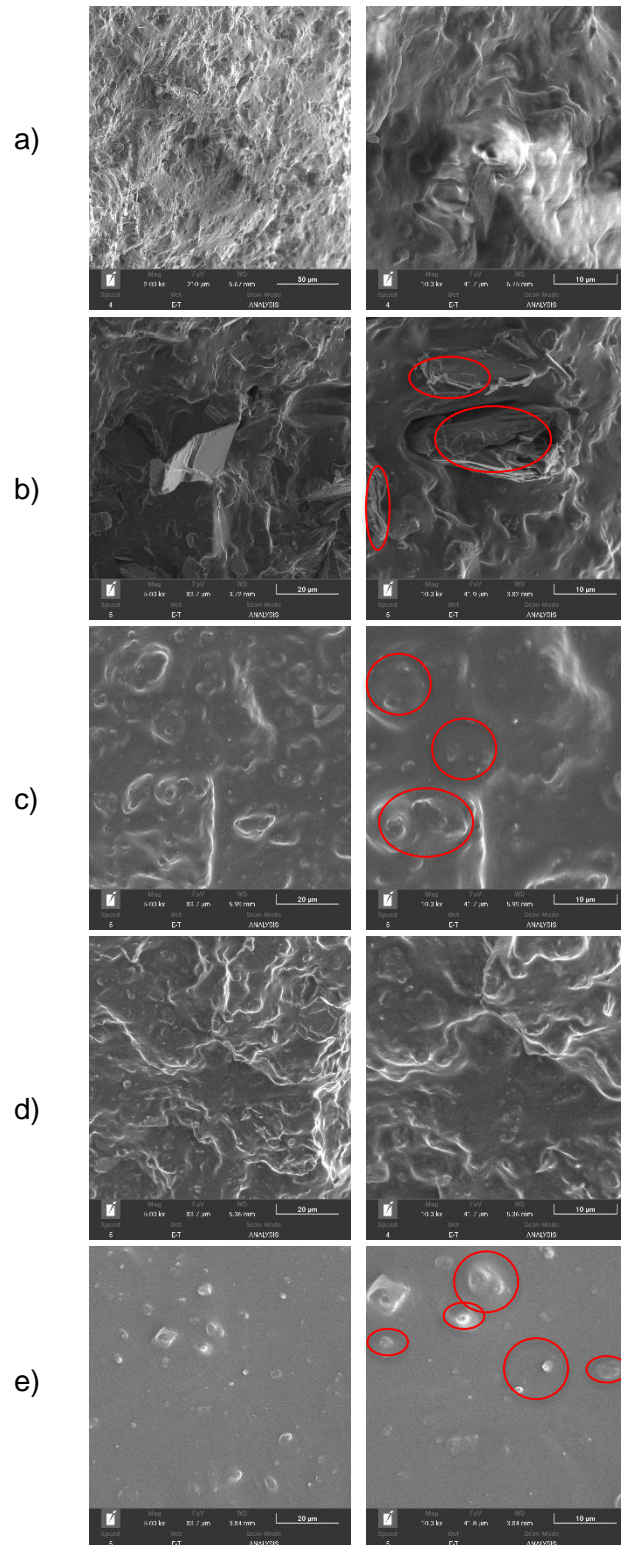


Fig.28 : Micrografías SEM: a) Silicona pura b) Silicona + Gr 5% c) Silicona + CB 5%
d) Silicona + MWCNT's 1% e) Silicona + MWCNT's + CB 2%.

Finalmente, se procedió a evaluar el comportamiento eléctrico de los materiales diseñados utilizando el mismo modelo evaluados a 0,2 a 0,8 KHz. En primer lugar, se examinaron las mezclas que contenían Gr. Los resultados indican que la concentración de Gr en diversas proporciones no afecta de manera significativa la resistencia ni la capacitancia eléctrica del material. A pesar del ruido presente en la gráfica de la resistencia eléctrica, esta se estabiliza a frecuencias más altas, manteniéndose en el orden de los $T\Omega$, lo que implica que la resistencia eléctrica sigue siendo similar a la de la silicona, aunque ligeramente inferior. En cuanto a la capacitancia, se observa un comportamiento más estable, y en comparación con la silicona, disminuye mínimamente, manteniéndose en el orden de los pF sin cambios significativos (ver Figura 29).

Al analizar los diferentes porcentajes de rellenos, se nota que no hay cambios trascendentales entre ellos con relación a las propiedades. En cuanto a la resistencia eléctrica, se podría concluir que la mayor resistencia eléctrica la presentan la mezcla con 3%, mientras que las mezclas de 1% y de 5% muestran resistencias eléctricas muy similares. En lo que respecta a la capacitancia, la mezcla con 3% presenta la menor capacitancia, y la de mayor capacitancia es la que contiene 5% (ver Figura 29).

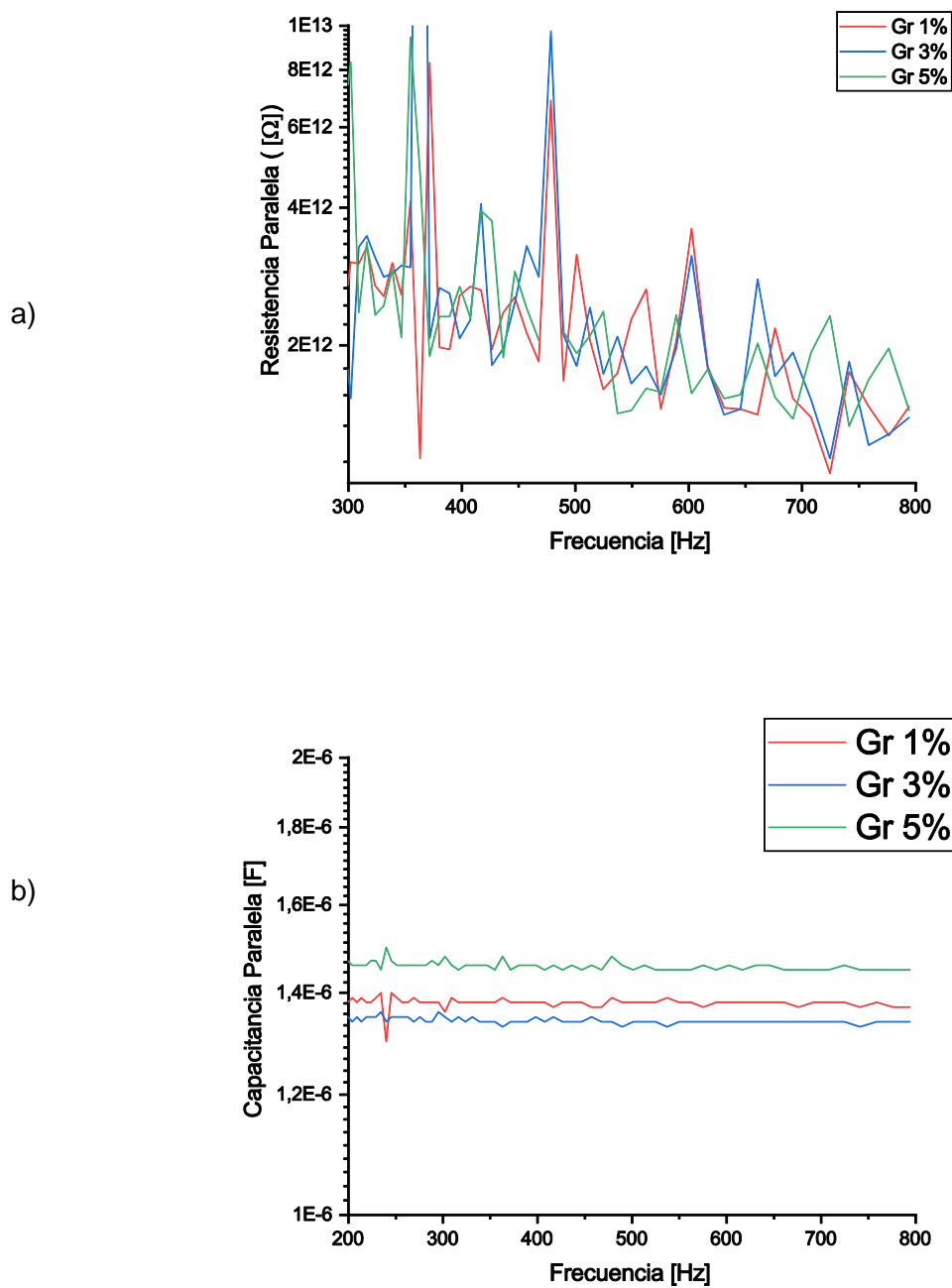


Fig.29 : Resultados Gr : a) Resistencia eléctrica en paralelo VS Frecuencia b) Capacitancia en paralelo VS Frecuencia.

Por consiguiente, se procedió a evaluar las mezclas que contenían CB. Los resultados revelan que el aumento en la concentración de CB impacta significativamente en la resistencia eléctrica del material, alcanzando un orden de $M\Omega$ en comparación con la silicona; en cuanto a la capacitancia, se observa un comportamiento estable y proporcional al aumento en la concentración de CB con respecto a la silicona, manteniéndose en el orden de los μF ; este resultado está en línea con lo esperado según lo visto en la bibliografía (ver Figura 30).

Al analizar los diversos porcentajes de incorporación, se evidencian cambios significativos con la mayor adición de partículas conductoras. En términos de resistencia eléctrica, se puede concluir que las mezclas con 1% y 3% de CB presentan la mayor resistencia eléctrica, ubicándose en el orden de los TΩ, mientras que las mezclas con un 5% muestran una reducción de la resistencia eléctrica y se sitúan en el orden de los MΩ. En cuanto a la capacitancia, la mezcla con un 3% de CB exhibe la menor capacitancia, mientras que la de mayor capacitancia es la que contiene un 5% de CB; todas se encuentran en el orden de los pF (ver Figura 30).

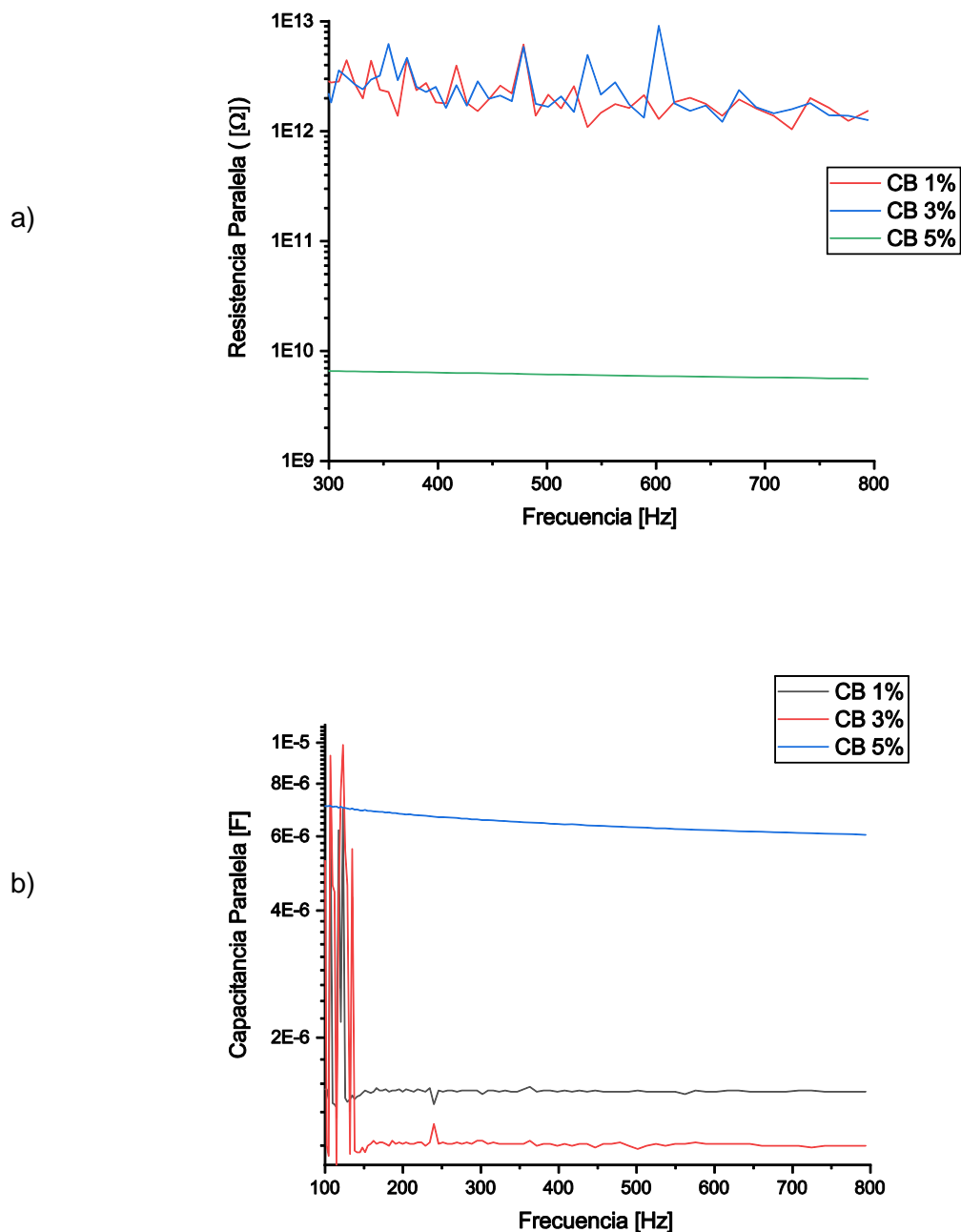
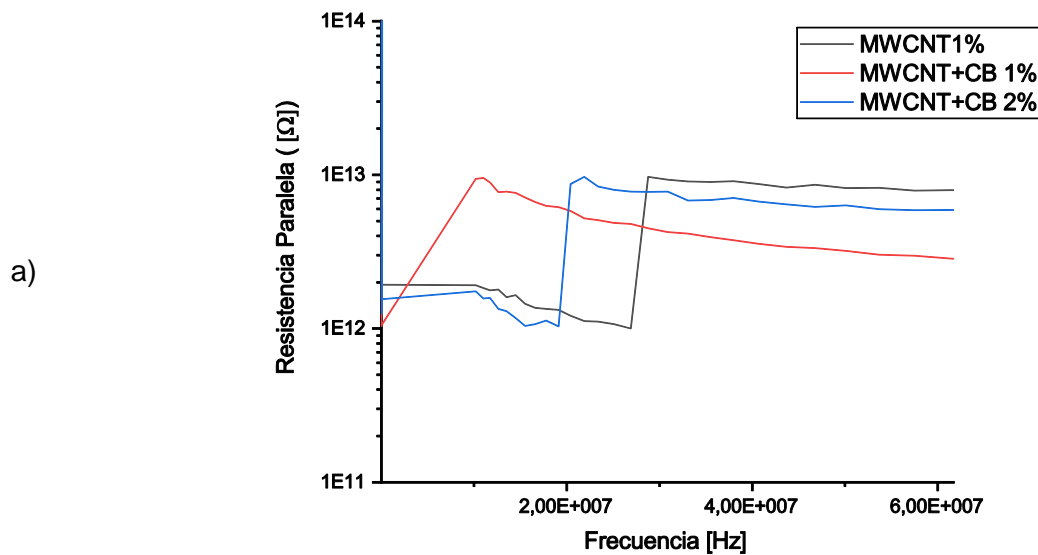


Fig.30 : Resultados CB : a) Resistencia eléctrica en paralelo VS Frecuencia b) Capacitancia en paralelo VS Frecuencia.

Finalmente, se procedió a evaluar las mezclas que contenían MWCNT's. Los resultados revelan que a mayor concentración de MWCNT's menor es la resistencia eléctrica del material, pero no hay cambios significativos con respecto a la resistencia eléctrica de la silicona; en cuanto a la capacitancia, se observa un comportamiento estable y proporcional al aumento en la concentración de CB con respecto a la silicona, manteniéndose en el orden de los pF; este resultado no está en línea con lo esperado según la bibliografía consultada (ver Figura 31).

Al analizar los diversos porcentajes de incorporación, se evidencian cambios significativos con la mayor adición de partículas conductoras. En términos de resistencia eléctrica, se puede concluir que las mezclas con incorporación de partículas de MWCNT's y CB al 1% y 2% presentan la menor resistencia eléctrica, ubicándose en el orden de los TΩ, mientras que la mezcla de MWCNT's al 1% muestran un aumento de la resistencia eléctrica y se sitúa un poco más arriba del orden de los TΩ. En cuanto a la capacitancia, la mezcla de MWCNT's y CB al 1% exhibe la menor capacitancia, mientras que la de mayor capacitancia es la que contiene un MWCNT's y CB al 1%; todas se encuentran en el orden de los pF (ver Figura 31).



b)

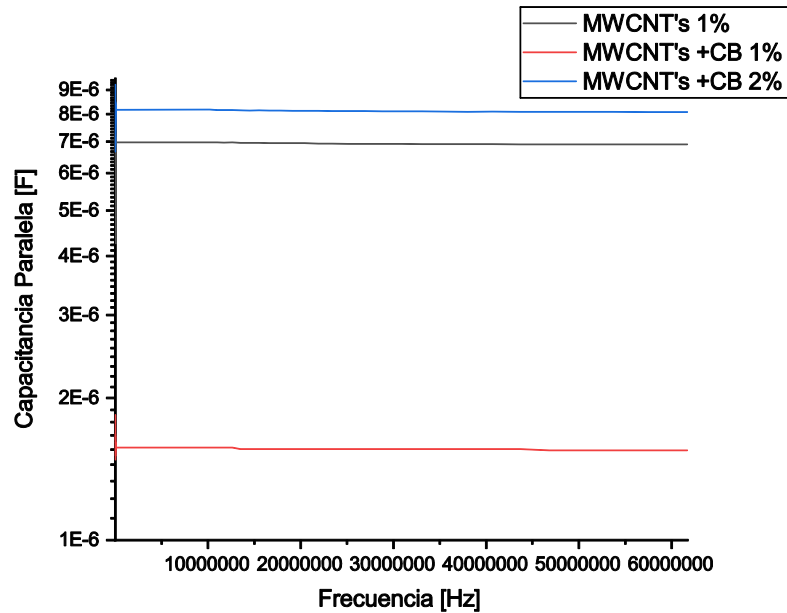


Fig.31 : Resultados MWCNT's : a) Resistencia eléctrica en paralelo VS Frecuencia b) Capacitancia en paralelo VS Frecuencia.

Al analizar las propiedades eléctricas de los materiales fabricados (ver Figura 32), se concluye que el material con incorporación del 5% de CB exhibe las mejores propiedades eléctricas según los requisitos establecidos. Su resistencia eléctrica promedio es de 459,9680 k Ω , y presenta una capacitancia promedio de 609,0157 pF. Se observan cambios significativos en comparación con la silicona, que tiene una resistencia eléctrica promedio de 68,293 M Ω y una capacitancia promedio de 145,887 pF.

Por otro lado, los materiales compuestos con la incorporación de MWCNT's muestran un aumento en la resistencia eléctrica y capacitancia en comparación con la silicona. Por ejemplo, el compuesto con MWCNT's al 1% tiene una resistencia eléctrica promedio de 111,6099 M Ω y una capacitancia promedio de 69,2821 pF (ver Figura 32).

Finalmente, los compuestos con la incorporación de Gr no presentaron cambios significativos en las propiedades eléctricas respecto a la silicona pura; la resistencia y capacitancia eléctrica experimentaron aumentos muy pequeños (ver Figura 32).

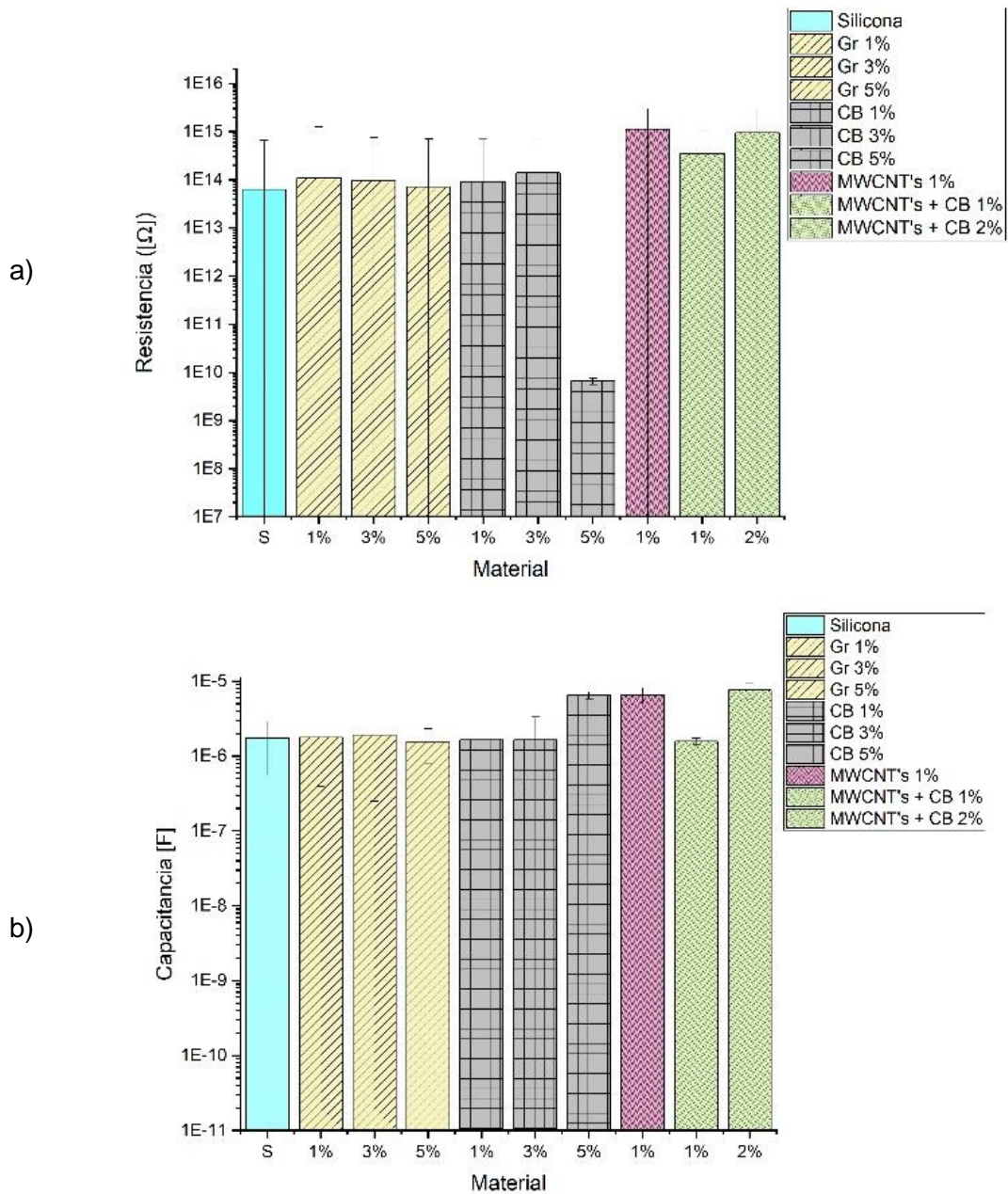


Fig.32 : Propiedades ensayos eléctricos: a) Resistencia eléctrica b) Capacitancia.

Con los datos anteriores se realizaron cálculos de conductividad y permitividad eléctrica de los compuestos diseñados para evaluarlos según los requerimientos establecidos. En la Tabla 3 se puede observar los datos iniciales conocidos, en las Tablas 4, 5, 6 y 7 se pueden observar los resultados de los cálculos para cada material diseñado y, finalmente, en la Tabla 8 se puede observar de manera específica los resultados de conductividad y permitividad eléctrica obtenidos.

Tabla 3. Datos conocidos del modelo.

$A_{\text{cuadrado}} [m^2]$	$A_2 [m^2]$	$A_1 [m^2]$	$d_1 [m]$	$\sigma_0 [S/m]$	ϵ_0
0,011	0,0031	0,0079	0,0001	0	8,85419E-12

Tabla 4. Cálculos: Silicona pura.

SILICONA	
$A_2 [m^2]$	0,0031
$d_2 [m]$	0,0011
$R_p [W]$	68292690
$C_p [F]$	1,45888E-10
$A_1 [m^2]$	0,0079
ρ	190153612,3
σ_m	5,25891E-09
C_p/ϵ_0	16,48
ϵ_m	3,35

Tabla 5. Cálculos: Gr

GR 1%		GR 3%		GR 5%	
$A_2 [m^2]$	0,0028	$A_2 [m^2]$	0,0028	$A_2 [m^2]$	0,0029
$d_2 [m]$	0,0012	$d_2 [m]$	0,0012	$d_2 [m]$	0,0012
$R_p [W]$	115343900	$R_p [W]$	121635400	$R_p [W]$	111191000
$C_p [F]$	1,37724E-10	$C_p [F]$	1,34132E-10	$C_p [F]$	1,4504E-10
$A_1 [m^2]$	0,008	$A_1 [m^2]$	0,0082	$A_1 [m^2]$	0,0080
ρ	271562550,2	ρ	277941931	ρ	282651140,4
σ_m	3,68239E-09	σ_m	3,59787E-09	σ_m	3,53793E-09
C_p/ϵ_0	15,56	C_p/ϵ_0	15,15	C_p/ϵ_0	16,38
ϵ_m	3,64	ϵ_m	3,74	ϵ_m	3,77

Tabla 6. Cálculos: CB

CB 1%		CB 3%		CB5%	
$A_2 [m^2]$	0,0029	$A_2 [m^2]$	0,0027	$A_2 [m^2]$	0,0030
$d_2 [m]$	0,0011	$d_2 [m]$	0,0020	$d_2 [m]$	0,0014
$R_p [W]$	122212300	$R_p [W]$	119302000	$R_p [W]$	459968
$C_p [F]$	1,46689E-10	$C_p [F]$	1,09155E-10	$C_p [F]$	6,09016E-10
$A_1 [m^2]$	0,0081	$A_1 [m^2]$	0,0084	$A_1 [m^2]$	0,0081
ρ	316519420,3	ρ	156863323,8	ρ	998705,52
σ_m	3,15936E-09	σ_m	6,37498E-09	σ_m	1,0013E-06
C_p/ϵ_0	16,57	C_p/ϵ_0	12,33	C_p/ϵ_0	68,78
ϵ_m	3,63	ϵ_m	6,25	ϵ_m	28,95

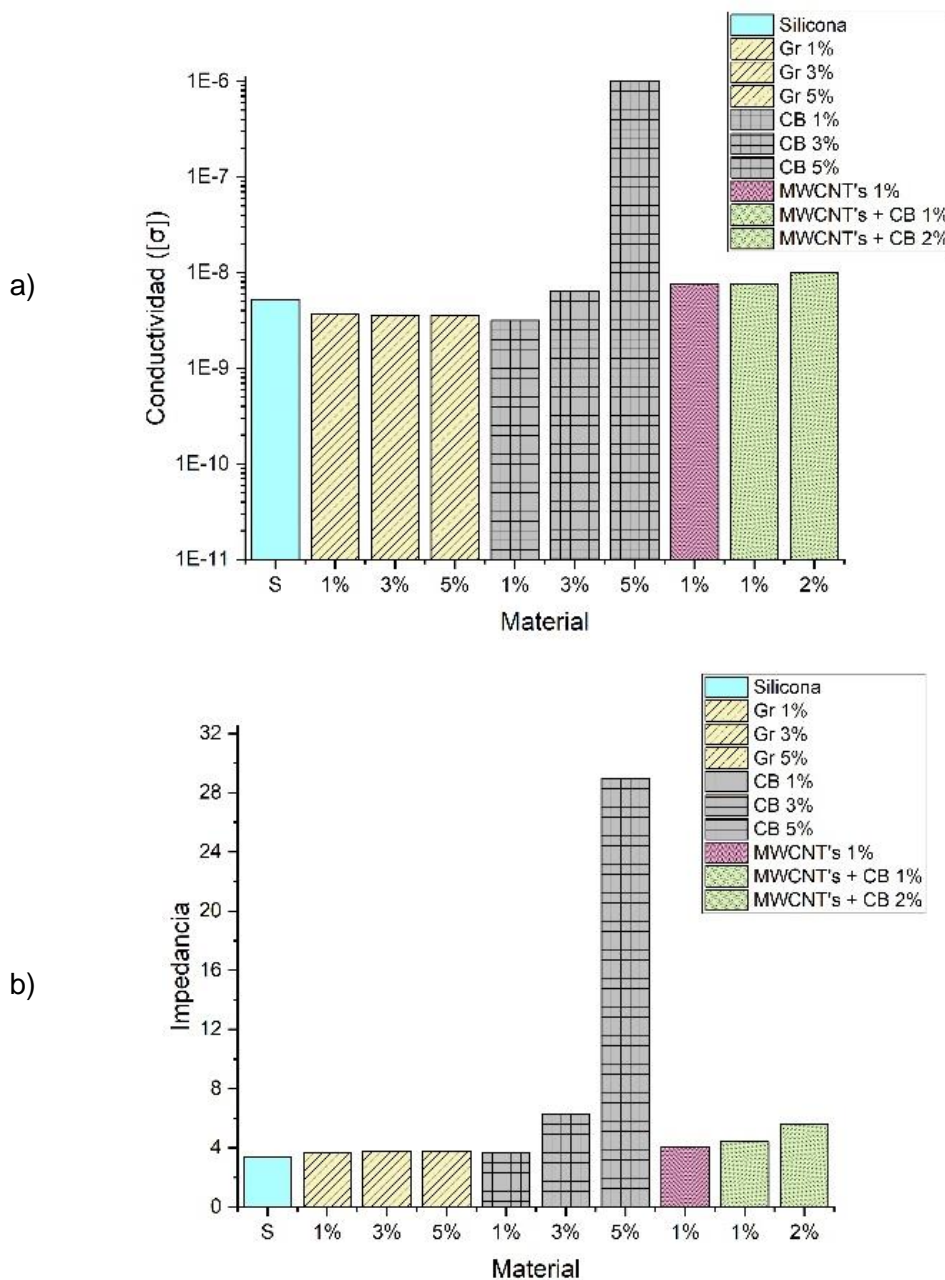
Tabla 7. Cálculos: MWCNT's

MWCNT's 1%		MWCNT's + CB 1%		MWCNT's + CB 2%	
$A_2 [m^2]$	0,0031	$A_2 [m^2]$	0,0031	$A_2 [m^2]$	0,0026
$d_2 [m]$	0,0026	$d_2 [m]$	0,0012	$d_2 [m]$	0,0025
$R_p [W]$	111609900	$R_p [W]$	51984920	$R_p [W]$	96946850
$C_p [F]$	6,92821E-11	$C_p [F]$	1,560553E-10	$C_p [F]$	8,12834E-11
$A_1 [m^2]$	0,0079	$A_1 [m^2]$	0,0079	$A_1 [m^2]$	0,0084
ρ	132232074,1	ρ	131889228,8	ρ	100071350
σ_m	7,56246E-09	σ_m	7,58212E-09	σ_m	9,99287E-09
C_p/ϵ_0	7,82	C_p/ϵ_0	17,62	C_p/ϵ_0	9,18
ϵ_m	4,04	ϵ_m	4,41	ϵ_m	5,62

Tabla 8. Resultados generales

Material	σ_m	ϵ_m
Silicona	5,26E-09	3,35
GR 1%	3,68E-09	3,64
GR 1%	3,60E-09	3,74
GR 1%	3,54E-09	3,77
CB 1%	3,16E-09	3,63
CB 3%	6,37E-09	6,25
CB 5%	1,00E-06	28,95
MWCNT's 1%	7,56E-09	4,04
MWCNT's + CB 1%	7,58E-09	4,41
MWCNT's + CB 2%	9,99E-09	5,62

Los resultados de los cálculos revelan y confirman que la incorporación 5% de CB exhibió los cambios más significativos y favorables, incluso cumpliendo con alguno de los requisitos establecidos. Por otro lado, tanto el CB3% como los compuestos con MWCNT's + CB mostraron aumentos mínimos tanto en la conductividad como en la impedancia eléctrica (ver Figura 33).



7.3. Pruebas de uso

Se implementó una matriz de verificación con el propósito de evaluar el cumplimiento de los materiales diseñados respecto a los requisitos predefinidos, los cuales buscaban obtener un material con una respuesta táctil adecuada. Los resultados de esta evaluación se presentan en la Tabla 9. Se puede concluir que ninguno de los materiales diseñados cumplió con los requerimientos de conductividad y resistencia eléctrica, debido a que las resistencias medidas estaban en el rango de $M\Omega$ y $T\Omega$, y por ende la conductividad resultó mínima. Por otro lado, únicamente el material con un 5% de CB demostró un desempeño satisfactorio en cuanto al criterio de permitividad eléctrica. En última instancia, cuatro materiales exhibieron una disminución en la resistencia mecánica, mientras que, en relación con la deformación, todos cumplieron de manera satisfactoria, debido a que la reducción era mínima con respecto a la silicona.

Tabla 9. Matriz de verificación de requisitos

Material	Conductividad eléctrica	Deformación	Resistencia mecánica	Resistencia eléctrica	Permitividad eléctrica
Gr 1%	✗	✓	✗	✗	✗
Gr 3%	✗	✓	✓	✗	✗
Gr 5%	✗	✓	✓	✗	✗
CB 1%	✗	✓	✓	✗	✗
CB 3%	✗	✓	✓	✗	✗
CB 5%	✗	✓	✗	✗	✓
MWCNT's 1%	✗	✓	✗	✗	✗
MWCNT's + CB 1%	✗	✓	✓	✗	✗
MWCNT's + CB 2%	✗	✓	✗	✗	✗

Además, durante la fase final de análisis de los materiales obtenidos, se llevaron a cabo pruebas que abordaron la respuesta táctil con la interacción de pantallas. Para llevar a cabo dicha evaluación, se emplearon dos enfoques distintos.

En la primera modalidad, se aisló el material y se le sometió a interacción con la pantalla táctil. Los resultados revelaron que ninguno de los materiales diseñados logró una funcionalidad efectiva en esta configuración (ver Figura 34).



Fig.34 : Prueba interacción: a) Con guante aislante b) Con polímero aislante

Finalmente, en la segunda modalidad, se llevaron a cabo pruebas colocando el material directamente en la mano y sobre un objeto conductor. En este caso específico, se observó un resultado positivo, ya que los materiales exhibieron una respuesta táctil funcional (ver Figura 35).

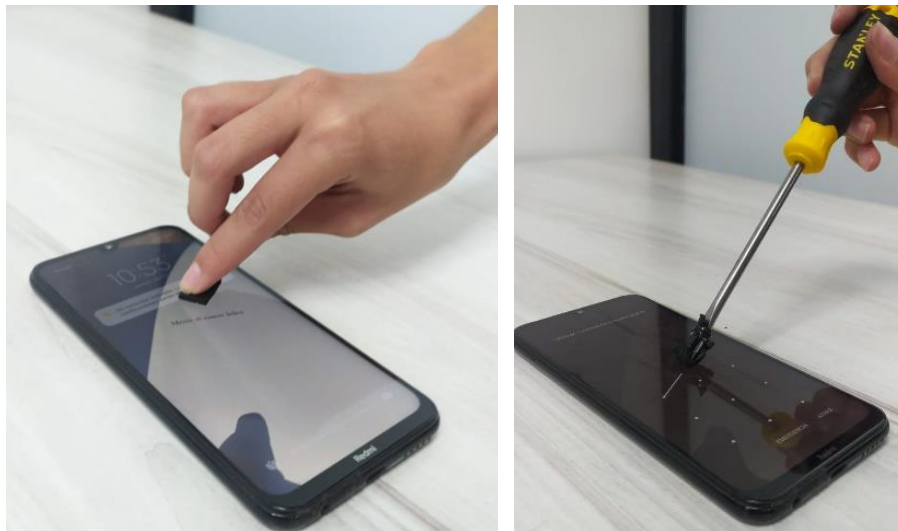


Fig.35 : Prueba interacción: a) Con la mano b) Con aluminio

Conclusiones

La caracterización del material de referencia arrojó información que sirvió como punto de partida para el diseño del material compuesto. Se puede concluir que el material sí presenta una fase dispersa de partículas conductoras en una matriz polimérica. A demás resulta evidente que no son necesarios valores elevados de permitividad y conductividad eléctrica para asegurar un desempeño adecuado en la interacción con pantallas táctiles.

A partir de las propiedades encontradas del material referente y teniendo en cuenta los desafíos de dispersión de las partículas conductoras en el proceso de fabricación, fue necesario realizar ajustes en los porcentajes previstos del diseño de experimentos mixto.

Respecto a las propiedades de los materiales fabricados, a pesar que se registraron modificaciones mínimas, se apreciaron alteraciones en las propiedades eléctricas, sugiriendo que un aumento en la incorporación de partículas conductoras en la matriz de silicona conlleva a un incremento en la conductividad e impedancia eléctrica del material. En cuanto a las propiedades mecánicas, se observó una reducción en la resistencia mecánica y el módulo de elasticidad con el aumento de los porcentajes de partículas conductoras, mientras que no se detectaron cambios significativos en la deformación de los materiales.

Ningún material cumplió con los requisitos de conductividad y resistencia eléctrica, sólo el material con un 5% de CB, cumplió con el requisito de permitividad eléctrica. Todos los materiales cumplieron con el requisito de deformación, mientras que solo cinco materiales cumplieron con el requisito de resistencia mecánica.

Con respecto a las pruebas de uso, se evidenció que es necesario el incremento de la conductividad e impedancia eléctrica de los materiales diseñados para lograr una interacción adecuada con las pantallas táctiles, sin la necesidad de emplear otros medios conductores adicionales.

Finalmente, como alternativas de solución, se podría considerar la implementación de una conductividad superficial en lugar de buscar alcanzar una conductividad eléctrica en toda la masa del material. También, se podría explorar la posibilidad de conectar el material obtenido en este trabajo directamente al cuerpo humano o a un objeto conductor de mayor volumen para lograr una transferencia de carga más efectiva.

Bibliografía

- [1] "Smartphones: número de usuarios mundiales 2016-2021 | Statista." <https://es.statista.com/estadisticas/636569/usuarios-de-telefonos-inteligentes-a-nivel-mundial/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [2] "Discapacidad." <https://www.bancomundial.org/es/topic/disability> (accessed Oct. 22, 2022).
- [3] "Digital 2022 - We Are Social Spain." <https://wearesocial.com/es/blog/2022/01/digital-2022/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [4] "Discapacidad - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud." <https://www.paho.org/es/temas/discapacidad> (accessed Oct. 23, 2022).
- [5] C. Alzate, J. César, C. Perea, and A. Santiago, "Boletines Poblacionales: Personas con Discapacidad-PCD 1 Oficina de Promoción Social I-2020".
- [6] Ministerio de Salud y Protección Social and Oficina de Promoción Social, "Sala situacional de las Personas con Discapacidad," Sep. 2019. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/MET/sala-situacional-discapacidad2019-2-vf.pdf> (accessed Oct. 22, 2022).
- [7] "Servicios | Mediprax." <https://mediprax.mx/servicios/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [8] R. Brack and E. H. Amalu. (2021). A review of technology, materials and R&D challenges of upper limb prosthesis for improved user suitability. *Journal of Orthopaedics.*, Vol. 23, pp. 88.
- [9] G. Walker, "A review of technologies for sensing contact location on the surface of a display," *J Soc Inf Disp*, vol. 20, no. 8, pp. 413–440, 2012, doi: 10.1002/JSID.100.
- [10] X. L. Chen et al. (2013). Analysis of human brain exposure to low-frequency magnetic fields: A numerical assessment of spatially averaged electric fields and exposure limits. *Bioelectromagnetics*, Vol. 34, No. 5, pp. 375–384.
- [11] "Fabrilab: Imprimir calidad de vida en 3D | EL ESPECTADOR." <https://www.elespectador.com/bogota/fabrilab-imprimir-calidad-de-vida-en-3d-article-805185/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [12] Castaño Vergara, M. (2023). *Desarrollo de una prótesis mecánica modular para amputación parcial de mano que ayude a recobrar la capacidad de realizar agarres gruesos y de precisión.* <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/35162>
- [13] Ley 1618 de 2013. Congreso de Colombia. Diario Oficial 48717 del 27 de febrero de 2013.
- [14] Ley 361 de 1997. Congreso de Colombia. Diario Oficial 42978 del 11 de febrero de 1997
- [15] Ley 1996 de 2019. Congreso de Colombia. 26 de agosto de 2019
- [16] A. Hirata, Y. Takano, Y. Kamimura, and O. Fujiwara, "Effect of the averaging volume and algorithm on the in situ electric field for uniform electric- and magnetic-field exposures," *Phys Med Biol*, vol. 55, no. 9, 2010, doi: 10.1088/0031-9155/55/9/N03.

- [17] G. C. S. Ledezma and L. E. T. Llano, "Prototype of a Transceiver for a IntraBody Communication," 2023 IEEE 3rd Colombian BioCAS Workshop, Bogota, Colombia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ColBioCAS59270.2023.10280858.
- [18] Serway, R. A., Vuille, C., Hughes, J., León Cárdenas, J., & García Hernández, A. E. (2018). Fundamentos de física. 454–459.
- [19] Casafont Hernandez, C. N. (2017). SELECCIÓN Y DISEÑO DE SENSORES DE HUMEDAD PARA MINERIA BLOCK CAVING. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/144514/Selecci%C3%B3n-y-dise%C3%B1o-de-sensores-de-humedad-para-miner%C3%ADa-BlockCaving.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] D. R. Askeland, W. J. Wright, D. K. Bhattacharya, R. P. Chhabra, and L. Peralta Rosales, "Ciencia e ingeniería de materiales / Donald R. Askeland, Wendelin J. Wright ; edición SI preparada por D. K. Bhattacharya, Raj P. Chhabra ; traducción Lorena Peralta Rosales ; revisión técnica Jose Nicolas Ponciano Guzman, Leonel Ceja Cardenas.," 2017.
- [21] Cocolletzi Cruz, L. (2018). *Influencia de los nanotubos de carbono en la conductividad eléctrica de resinas epóxicas*. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/24537>
- [22] C. J. Sudsiri and R. J. Ritchie, "Energy absorption of human red blood cells and conductivity of the cytoplasm influenced by temperature," *Biophys Chem*, vol. 273, p. 106578, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.BPC.2021.106578
- [23] Villagómez Briseño, R. (2017). *Desarrollo de un capacitor MOS de alto desempeño*. <http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/22260>
- [24] N. T. Aristote et al., "General overview of sodium, potassium, and zinc-ion capacitors," *J Alloys Compd*, vol. 913, p. 165216, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2022.165216.
- [25] "Polymer | Description, Examples, Types, Material, Uses, & Facts | Britannica." [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/polymer> (accessed Oct. 22, 2022).
- [26] M. C. Petty, "Molecular electronics : from principles to practice," p. 517, 2007, Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/enus/Molecular+Electronics%3A+From+Principles+to+Practice-p-9780470723890>
- [27] I. A. Carranza Sanchez, ""PROBLEMÁTICAS EN LA SÍNTESIS DE POLIDIENOS VÍA POLIMERIZACIÓN ANIÓNICA," Tesis de grado, Jul. 2014. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/55520097.pdf> (accessed Oct. 22, 2022).
- [28] A. N. Estrada Ramirez, "Preparación de fluidos electro-reológicos con base en nanopartículas poliméricas," Oct. 2006. [Online]. Available: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/342/1/Alba%20Nidia%20Estrada%20Ramirez.pdf> (accessed Oct. 22, 2022)
- [29] "Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen 4(4), Diciembre de 2003 Fernández Polímeros conductores: síntesis, propiedades y aplicaciones electroquímicas". [Online]. Available: <https://reviberpol.files.wordpress.com/2019/08/2003-toribio1.pdf>
- [30] P. Song and Y. Zhang, "Vertically aligned carbon nanotubes/graphene/cellulose nanofiber networks for enhancing electrical conductivity and piezoresistivity of

- silicone rubber composites," *Compos Sci Technol*, vol. 222, p. 109366, May 2022, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2022.109366.
- [31] B. Zhu, C. Ma, Z. Qian, L. Ren, and H. Yuan, "Highly Stretchable and Sensitive Multimodal Tactile Sensor Based on Conductive Rubber Composites to Monitor Pressure and Temperature," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/POLYM14071294/S1.
- [32] Paszkiewicz, S., Szymczyk, A., Zubkiewicz, A., Subocz, J., Stanik, R., & Szczepaniak, J. (2020). Enhanced Functional Properties of Low-Density Polyethylene Nanocomposites Containing Hybrid Fillers of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Nano Carbon Black. *Polymers 2020, Vol. 12, Page 1356, 12(6)*, 1356. <https://doi.org/10.3390/POLYM12061356>
- [33] Nakaramontri, Y., Pichaiyut, S., Wisunthorn, S., & Nakason, C. (2017). Hybrid carbon nanotubes and conductive carbon black in natural rubber composites to enhance electrical conductivity by reducing gaps separating carbon nanotube encapsulates. *European Polymer Journal*, 90, 467–484. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2017.03.029>
- [34] Velandia Cabra, J. R. (2017). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*. 5, pp 115-140.
- [35] Puype, F., Samsonek, J., Knoop, J., Egelkraut-Holtus, M., & Ortlieb, M. (2015). Evidence of waste electrical and electronic equipment (WEEE) relevant substances in polymeric food-contact articles sold on the European market. *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 32(3), pp 410–426.
- [36] Saviello, D., Andena, L., Gastaldi, D., Toniolo, L., & Goidanich, S. (2018). Multi-analytical approach for the morphological, molecular, and mechanical characterization after photo-oxidation of polymers used in artworks. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(17).
- [37] Oh, M., Kim, W. D., Zhang, M., Kim, T., Yoo, D., Kim, S. H., & Lee, D. (2021). Mechanical behavior of ABS plastic-matrix nanocomposites with three different carbon-based nanofillers. *Polymer Bulletin*, 78(7), pp 3751–3762.
- [38] Dayyoub, T.; Maksimkin, A.V.; Kaloshkin, S.; Kolesnikov, E.; Chukov, D.; Dyachkova, T.P.; Gutnik, I. (2019). The Structure and Mechanical Properties of the UHMWPE Films Modified by the Mixture of Graphene Nanoplates with Polyaniline. *Polymers*, 11, 23.
- [39] Wang, Hongyu & Zhu, Dongmei & Zhou, Wancheng & Luo, Fa. (2014). Influence of heat treatment on electromagnetic properties of polyimide/carbon black composites. *Polymers for Advanced Technologies*. 25(12).
- [40] Zappiello, C. D., Nanicuacua, D. M., dos Santos, W. N. L., da Silva, D. L. F., Dall'antônia, L. H., de Oliveira, F. M., Clausen, D. N., & Tarley, C. R. T. (2016). Solid Phase Extraction to OnLine Preconcentrate Trace Cadmium Using Chemically

- Modified Nano-Carbon Black with 3- Mercaptopropyltrimethoxysilane. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 27(10), 1715–1726.
- [41] Montagna, L. S., Fim, F. D. C., Galland, G. B., & Basso, N. R. D. S. (2011). Synthesis of poly(propylene)/graphite nanocomposites by in situ polymerization. *Macromolecular Symposia*, 299–300(1), pp 48–56.
- [42] Shojaeenezhad, S. S., Farbod, M., & Kazeminezhad, I. (2017). Effects of initial graphite particle size and shape on oxidation time in graphene oxide prepared by Hummers' method. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2(4), pp 470–475.
- [43] Gan, Lei & Guo, Huajun & Wang, Zhixing & Li, Xinhai & Peng, Wenjie & Wang, Jiexi & Huang, Silin & Su, Mingru. (2013). A facile synthesis of graphite/silicon/graphene spherical composite anode for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*. 104. pp 117–123.
- [44] Alig, I., Pötschke, P., Lellinger, D., Skipa, T., Pegel, S., Kasaliwal, G. R., & Villmow, T. (2012). Establishment, morphology and properties of carbon nanotube networks in polymer melts. *Polymer*, 53(1), 4–28. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2011.10.063>
- [45] Chang, D. W., Jeon, I.-Y., Choi, H.-J., Baek, J.-B., Chang, D. W., Jeon, I.-Y., Choi, H.-J., & Baek, J.-B. (2013). Mild and Nondestructive Chemical Modification of Carbon Nanotubes (CNTs): Direct Friedel-Crafts Acylation Reaction. *Physical and Chemical Properties of Carbon Nanotubes*. <https://doi.org/10.5772/50805>
- [46] L. Valentini, S. Bittolo Bon, M.A. Lopez-Manchado, R. Verdejo, L. Pappalardo, A. Bognini, A. Alvino, S. Borsini, A. Berardo, N.M. Pugno, Synergistic effect of graphene nanoplatelets and carbon black in multifunctional EPDM nanocomposites, *Composites Science and Technology*, Volume 128, 2016, Pages 123-130, ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.03.024>.