

Funcionalización de un textil de algodón para otorgar capacidad de conducción eléctrica mediante la incorporación de óxido de grafeno reducido

Functionalization of a cotton textile to provide electrical conduction capacity by incorporating reduced graphene oxide

Daniel Campo-Avendaño¹
Rocío Monroy-Rodríguez²
Yendrich Brito-Sierra³
Andrea Duarte-Suárez⁴

¹Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia). Correo electrónico: dcampo@sena.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4587-9138>

²Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia). Correo electrónico: rmonroy@sena.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8073-4017>

³Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia). Correo electrónico: yebrisi02@hotmail.com
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0224-3925>

⁴Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia). Correo electrónico: amduartes@sena.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1055-4587>

Recibido: 31-01-2023 Aceptado: 28-07-2023

Cómo citar: Campo-Avendaño, Daniel; Monroy-Rodríguez, Rocío; Brito-Sierra, Yendrich; Duarte-Suárez, Andrea. Funcionalización de un textil de algodón para otorgar capacidad de conducción eléctrica mediante la incorporación de óxido de grafeno reducido. *Informador Técnico*, 87(2), 133-149.

<https://doi.org/10.23850/22565035.5483>

Resumen

En la actualidad, se desarrollan textiles técnicos basados en tecnologías que integran diferentes campos de la ciencia, como son el textil, la química y la electrónica. En la presente investigación, se realizó la funcionalización de textiles de algodón con óxido de grafeno reducido para mejorar su conductividad, buscando su integración en textiles técnicos/inteligentes. Se tomó como materia prima el grafito, que es transformado a óxido de grafeno por el método de Hummers modificado, y posteriormente reducido por métodos químicos y térmicos a óxido de grafeno reducido. Se evaluaron las propiedades de las partículas obtenidas mediante técnicas de espectroscopía UV-VIS, espectroscopía infrarroja FTIR y microscopía electrónica de barrido SEM, estas dos últimas para el textil y la partícula. El óxido de grafeno se depositó sobre fibras de algodón, y fue reducido empleando el método de agotamiento con ácido ascórbico. Se evaluó la funcionalidad en relación con la conductividad y los parámetros de calidad textil: masa por unidad de área, ensayos de solidez al color, protección UV y resistencia a la ruptura. Los resultados indican que la incorporación de este material en el textil proporciona una conductividad de 0,1477 S/m, lo que significa un aumento de esta en el textil de algodón, que, una vez funcionalizado, presentó un aumento en la resistencia a la ruptura, elongación y protección UV, acrecentando su espectro de aplicaciones en los diferentes campos de textiles técnicos, como hogar, transporte, trabajo, agro y medicina, entre otros.

Palabras clave: acabados textiles; impregnación de partículas; síntesis química; textil técnico.

Abstract

Nowadays, technical textiles are developed based on technologies that integrate different fields of science, such as textiles, chemistry, and electronics. In the current investigation, the functionalization of cotton textiles with reduced graphene oxide was performed to improve their conductivity, seeking their integration into technical/smart textiles. The graphite, which is transformed into graphene oxide by the modified Hummers method and subsequently reduced by chemical and thermal methods to reduced graphene oxide, was taken as raw material. The properties of the particles were assessed by UV-VIS spectroscopy, FTIR infrared spectroscopy, and SEM scanning electron microscopy techniques, the latter two for the textile and the particle. Graphene oxide was deposited on cotton fibers and reduced using the ascorbic acid depletion method. Functionality was evaluated concerning conductivity and textile quality parameters: mass per unit area, color fastness tests, UV protection, and resistance to rupture. The results indicate that the incorporation of this material in the textile provides a conductivity of 0.1477 S/m, which shows an increase in this in the cotton textile. Once the textile was functionalized, it presented an increase in the resistance to rupture, elongation, and UV protection, increasing its spectrum of applications in the different fields of technical textiles such as home, transportation, work, agriculture, and medicine, among others.

Keywords: chemical synthesis; particle impregnation; technical textiles; textile finishes.

1. Introducción

El algodón es una fibra textil natural muy versátil, que por sus propiedades confiere suavidad, comodidad y confort al usuario final, pero presenta inconvenientes relacionados al ataque microbiano, baja protección UV, higroscopia y su naturaleza no conductora, lo cual limita su aplicación en varios campos (Cai *et al.*, 2017; Lund *et al.*, 2018), por lo cual ha venido perdiendo mercado frente a materiales sintéticos como el poliéster. Este último ha duplicado su producción respecto al algodón en los últimos 15 años, generando un impacto negativo en torno al medio ambiente, pues, mientras que un textil de algodón tarda en degradarse aproximadamente entre 6 meses a 3 años, los textiles a base de polímeros, como el poliéster, pueden tardar entre 50 y 200 años (Salmerón, 2018). Tomando como referente este contexto, se funcionalizó algodón con óxido de grafeno reducido (OGr) para mejorar su conductividad, y se evaluaron propiedades técnicas del textil, como resistencia, protección UV, capacidad antimicrobiana y solidez al lavado.

Para funcionalizar con OGr, es importante reconocer algunas de sus propiedades y procesos de síntesis, así como de sus sustancias precursoras. El proceso inicia con el grafito, que es una forma alotrópica del carbono, posee hibridación sp^2 en una disposición de átomos de carbono en forma hexagonal, formando láminas que se apilan unas sobre otras, generando así una estructura cristalina tridimensional (Arjona, 2021).

Estas láminas bidimensionales se conocen como grafeno. Esta hibridación da lugar a la generación de enlaces sigma (δ) C-C tipo covalente, que son fuertes, y sitúan los electrones a lo largo del plano, formando dichos hexágonos, que le dan al material su gran resistencia y propiedades mecánicas. También se forman enlaces pi (π) C=C, que son interacciones más débiles, por lo que los electrones se deslocalizan, generando las propiedades electrónicas del grafeno (Abril, 2017). Por su parte, Urcuyo *et al.* (2021) indican que dicha estructura permite tener dos tipos de configuraciones sobre sus bordes: “zigzag” y “armchair”, en la primera, su comportamiento tendrá un carácter metálico, por lo que puede ser más reactiva químicamente, en tanto que los armchair poseen características de semiconductores.

Las propiedades de semiconducción del grafeno pueden mejorarse significativamente con la modificación de su red cristalina, al generar un mayor número de “vacancias”, que aumentan el flujo de electrones. En teoría, las capas grafénicas presentan propiedades particulares, como movilidades de carga muy

altas a ciertas temperaturas ($10^5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$), alta conductividad térmica ($4000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), transparencia (absorbe 2,3 % de luz visible), flexibilidad y resistencia (módulo de Young = 1TPa), e impermeabilidad (Moliner, 2016), entre otras.

Dentro de las diversas variantes que puede tener el grafeno, está el óxido de grafeno reducido (OGr), el cual se obtiene en dos etapas: en la primera, se hace un proceso de oxidación a partir del grafito o de material de carbono grafitizable, con agentes oxidantes fuertes como el permanganato de potasio y ácido sulfúrico, que permiten la formación del óxido permangánico y generan la aparición de grupos oxigenados sobre la estructura del grafito (Messina, 2021). Posteriormente, se busca la separación de las láminas del óxido de grafito por medio de un proceso de exfoliación, mediante ultrasonido que forma óxido de grafeno (OG) (Guerrero *et al.*, 2022). En la segunda, se retiran los grupos oxigenados con reductores como el ácido cítrico, ascórbico o monohidrato de hidracina (Colom *et al.*, 2020).

La funcionalidad de las partículas de OG y el OGr genera un conjunto de aplicaciones diversas, como descontaminación de aguas por metales pesados y colorantes; sensores para gases y compuestos orgánicos, que permiten una mayor sensibilidad y selectividad y tejidos técnicos que mejoran la conductividad térmica y eléctrica (Esteve-Adell *et al.*, 2020).

La industria textil viene enfrentando diferentes retos que hacen que las prendas no solo cumplan la función de cubrir y hacer sentir bien a los usuarios, sino que muestren características funcionales de acuerdo con diferentes contextos a los que se enfrentan las personas en la actualidad, como lo son condiciones del ambiente, laborales, rendimiento deportivo, salud y bienestar, entre otras. Aparecen entonces los denominados textiles técnicos, divididos en funcionales de primera, segunda y tercera generación, estos últimos llamados también textiles ultrainteligentes, cuyo desarrollo ha sido un punto de partida en la producción de tejidos conductores que faciliten la transferencia de datos e interconecten los dispositivos que se encuentren en las prendas (Villa, 2018). Los textiles conductores tienen aplicaciones en ropa de protección para bomberos, militares, ropa deportiva de alto rendimiento, sensores y pantallas incorporadas en prendas de vestir (Jordá, 2017).

El OGr es un material que, aplicado en sustratos textiles mediante diferentes técnicas, permite la funcionalización de tejidos para hacerlos mejores conductores, reemplazando métodos convencionales usados actualmente, como es el caso del uso de polímeros y compuestos o bases metálicas, los cuales presentan inconvenientes por sus altos costos, tamaños de muestras limitados, desgaste o deterioro del material textil, y en algunas ocasiones incompatibilidad en el proceso por lotes (Kaushik *et al.*, 2015). La incorporación de grafeno en el material textil permite obtener tejidos inteligentes, que puedan identificar condiciones del medio y generar una respuesta, así como también brindar aplicaciones biomédicas, como es el caso de la actividad antimicrobiana en bases textiles y la capacidad de detectar las condiciones de salud de una persona (Molina, 2020; Delgado-Oleas *et al.*, 2022).

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales, equipos y reactivos

En los procesos de síntesis, se usaron como reactivos de grado analítico, grafito en polvo suave, permanganato de potasio sólido al 99,9 % p/p (KMnO_4), ácido sulfúrico al 95-97 % p/p (H_2SO_4), peróxido de hidrógeno al 30 % p/v (H_2O_2), ácido cítrico monohidratado ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) L (+), ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) de las marcas Merck y Chemi, y agua tipo I, producida en el laboratorio del Centro Textil y de gestión Industrial, de la regional Antioquia del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Se contó con equipamiento básico de laboratorio, planchas de agitación, equipo de filtración, baño ultrasónico, horno de convección forzada y centrífuga.

Para los procesos de funcionalización, se empleó tejido plano 100 % algodón con tipo de ligadura sarga 2*2, un textil jersey sencillo tejido punto 100 % algodón, KH-560 (3-glicidiloxipropil trimetoxisilano), humectante, suavizante y dispersante textil, cloruro de sodio (NaCl), y como equipamiento cubas metálicas, termómetros, equipos de proceso de acabados textiles teñidora IR y termofijadora Rapid. La caracterización de las sustancias obtenidas empleó el espectrofotómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), de Thermo Scientific Nicolet iS10, el espectrofotómetro de UV-VIS GENESYS 10S, de Thermo Scientific, para evidenciar los procesos de reducción por el desplazamiento de la longitud de onda, y el microscopio de barrido electrónico (SEM) ZEISS EVO MA y LS Serie, para los análisis morfológicos. Para las pruebas de conductividad, un circuito en paralelo, un multímetro marca UNIT y fuente de voltaje para la medición de la resistencia eléctrica.

2.2. Métodos

2.2.1. Obtención de óxido de grafito

El método inició con la preparación de una muestra de grafito suave comercial, a la cual se le realiza una reducción de tamaño en un mortero ágata, hasta la obtención de un polvo fino. Se lleva al horno con el fin de remover humedad. Posteriormente, se realiza un análisis por espectroscopía infrarroja, con el objetivo de identificar las señales propias del grafito.

Para la obtención del óxido de grafito, se aplicó el método Hummers, modificado según el procedimiento descrito por Zolezzi (2017), para el cual se disuelve una cantidad definida de grafito macerado en H_2SO_4 con agitación constante. La mezcla se introdujo en un baño frío a 10 °C y se adicionó $KMnO_4$ sólido. Una vez terminada la adición de $KMnO_4$, se aumentó la temperatura a 85 °C bajo agitación constante, agregando agua tipo I gota a gota, finalizando el proceso manteniendo la agitación durante 15 minutos más. A la suspensión obtenida se adicionó de manera lenta H_2O_2 , y se dejó en reposo durante 40 min. El producto se centrifugó a 6000 rpm durante 10 minutos para la separación del sólido. Posteriormente, el sólido fue lavado y centrifugado con agua tipo I hasta llegar un pH 4,5 en el sobrenadante. El precipitado obtenido se secó a 60 °C durante 24 horas. Como resultado de este proceso se obtuvo óxido de grafito (Og), el cual se analizó por espectroscopía infrarroja.

2.2.2. Exfoliación de óxido de grafito para obtener óxido de grafeno

Se prepararon suspensiones de Og en agua tipo I, a concentraciones de 3 g/L. La suspensión se llevó al baño de ultrasonido a una frecuencia de 55 Hz durante 4 horas, a temperatura de 60 °C.

2.2.3. Funcionalización de sustrato de algodón con óxido de grafeno

Selección del textil y pretratamiento: a las muestras de tejidos seleccionadas se les realizó un pretratamiento de descruce y blanqueo químico. Posteriormente, se dividieron en tamaños de 15 x 15 centímetros, y fueron sometidas a un proceso de lavado con adición de auxiliares textiles en el siguiente orden: humectante 2 g/L y suavizante 1 g/L, durante 30 minutos a 85 °C.

Tratamiento de tejidos con un agente de acoplamiento KH-560: para asegurar la fijación del óxido de grafeno en los tejidos de algodón, se realizó una impregnación sobre la superficie de la tela con el agente de acoplamiento KH-560, en una relación de baño 1:10 (mínima encontrada después de hacer varios ensayos a proporciones superiores), manteniendo las muestras en constante agitación durante 1 hora y posterior secado en la termofijadora a 110 °C por 10 minutos.

Impregnación de los tejidos de algodón con suspensiones de óxido de grafeno: se seleccionó el método por agotamiento para la funcionalización de los textiles. El procedimiento se controló a través de una curva de impregnación: el orden de adición de los compuestos, temperatura y tiempos del proceso se ilustra en la Figura 1. Se utilizó una relación de baño 1:10 (por cada gramo de tela, 10 mL de la suspensión de OG), realizándose de manera secuencial la impregnación y la reducción del óxido de grafeno sobre el textil.

El proceso inició con la suspensión del óxido de grafeno, a la cual se le adiciona humectante (1g/L) y dispersante textil (1g/L), calentando a 60 °C. Una vez el baño alcanza la temperatura deseada, se incorpora NaCl (20 g/L) y se agrega la tela impregnada con el agente acoplante KH-560, previamente pesado. El conjunto se lleva a agitación por 60 minutos, una vez termina, se seca en la termofijadora a 110 °C por 5 minutos. Es necesario realizar este procedimiento por triplicado con la misma muestra de tela.

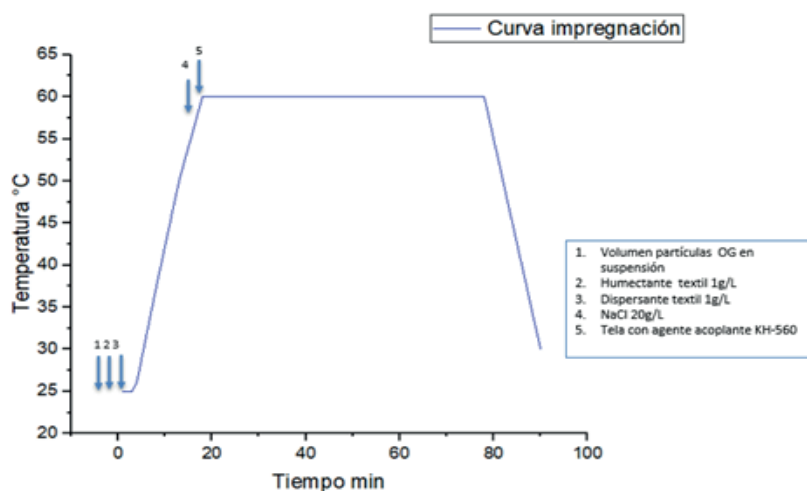


Figura 1. Curva de impregnación del óxido de grafeno

Nota: La curva de impregnación muestra el desarrollo de proceso químico y térmico que se realizó con el textil
Fuente: elaboración propia.

2.2.4. Tratamiento para la reducción del óxido de grafeno en el textil

En una cuba metálica, se adicionó el volumen de agua requerido para una relación de baño 1:10, teniendo en cuenta el peso de la tela con el OG impregnado, se pone en calentamiento hasta alcanzar los 90 °C. Se agregó ácido ascórbico en relación 2:1 con respecto al OG, agitando y homogeneizando completamente. Cid et al. (2012) indican que la relación de peso entre el ácido ascórbico y el OG es 1:1, pero se fija un exceso para garantizar que todo el OG sea reducido. Posteriormente, se introdujo el textil y se mantuvo en agitación constante durante dos horas. Transcurrido el tiempo, la tela se escurrió y fue llevada a una banda de secado. Se tomaron muestras del textil para posteriores análisis de laboratorio.

2.2.5. Desarrollo de funcionalización de un textil sin presencia de agente de acoplamiento

Se realizó la funcionalización de un textil con las mismas características técnicas y procedimientos indicados, pero sin la adición del agente de acoplamiento, con el fin de evaluar la influencia de este sobre la fijación del óxido de grafeno y las características funcionales del textil de algodón.

2.2.6. Prueba de conductividad

Se construyó un circuito en serie con una batería de 3 voltios, cables y un bombillo led, como se ilustra en la Figura 2. Se incorporó un multímetro para medición de voltajes y resistencias, también se hicieron mediciones de área y longitud de textiles empelados.

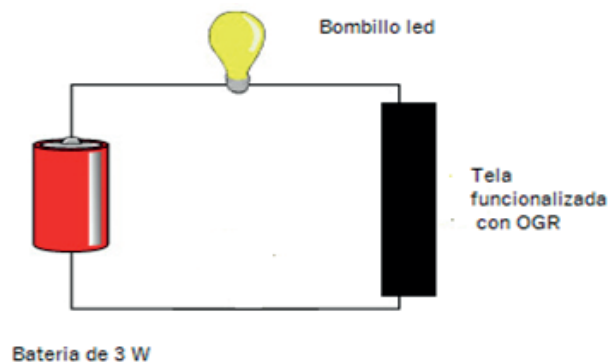


Figura 2. Circuito en serie para determinación de conductividad de los textiles

Nota: Circuito en serie para identificar conductividad en los textiles funcionalizados con óxido de grafeno reducido.

Fuente: elaboración propia.

Para las pruebas de conductividad se seleccionaron muestras de textil de tejido plano y de punto con las siguientes características: textil blanqueado sin funcionalizar (blanco), textil funcionalizado con óxido de grafeno y textil funcionalizado con óxido de grafeno reducido. Los textiles se conectan al circuito y se verifica el encendido del bombillo como prueba positiva de conductividad. Según los datos obtenidos, se seleccionaron los textiles que arrojan resultados positivos para realizar pruebas de calidad textil.

2.2.7. Pruebas de calidad textil

Se tomaron muestras que fueron enviadas al Laboratorio de Calidad Textil del Centro Textil y de Gestión Industrial del SENA, Regional Antioquia, para la realización de las siguientes pruebas de calidad: determinación de la masa por unidad de área de la tela, según la norma NTC 230:2010 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2010) y métodos de prueba estándar para masa por unidad de área (peso) de tela ASTM D3776/D3776M-09a (Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales [ASTM], 2017), ensayo de solidez al color 2 a NTC 1155-3:2017 (ICONTEC, 2017), y solidez del color al lavado: acelerado AATCC 61-2013E (2020) (Asociación Estadounidense de Químicos y Coloristas Textiles [AACC], 2020), clasificación protección UV según norma AS/NZS 4399:2017 (Estándares Australia; Estándares Nueva Zelanda, 2017), caracterización del tejido por método de laboratorio, resistencia a la rotura y elongación de las telas método del agarre según norma NTC 754-1:2013-10-16 (ICONTEC, 2013) y método de prueba estándar para resistencia a la rotura y elongación de tejidos textiles (prueba de agarre) ASTM D 5034:21 (Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales [ASTM], 2021).

3. Resultados y análisis

Los resultados obtenidos se dividieron en tres fases, la primera corresponde al proceso de oxidación del grafito, en donde se recopilaron datos de espectrofotometría FTIR para identificar los posibles grupos oxigenados formados; en la segunda fase se tiene el proceso de reducción del óxido de grafeno, en donde se recopilaron datos de espectroscopia UV-VIS y FTIR, que permitieron evidenciar los procesos de oxidación y reducción de las sustancias sintetizadas, los cuales se compararon con otras investigaciones como material bibliográfico de

referencia, con el fin de establecer similitudes o diferencias. Finalmente, se describen los resultados de la fase de funcionalización, en donde se hicieron pruebas para determinar, por medio de la resistencia la conductividad del textil, los grupos funcionales por espectroscopía FTIR. Además, se estableció la presencia del OGr por microscopía de barrido electrónico (SEM) sobre la superficie del textil, formado por pequeños agregados, y se desarrollaron pruebas de calidad textil, para observar las características técnicas con las que termina el textil una vez realizado el proceso de funcionalización.

3.1. Fase 1: formación del óxido de grafito

Se obtuvo un polvo de color café, que fue llevado al espectrofotómetro FTIR para identificar los grupos funcionales presentes. En la Figura 3a se muestran las señales del estiramiento y tensión de los enlaces, producidas por los grupos oxígenos que pudieran formarse sobre la estructura del grafito. Se observaron bandas producto del enlace C=O en 1738 cm^{-1} para el grupo carbonilo, y se presenta una señal perteneciente al enlace C-O a los 1365 cm^{-1} , por lo que se puede considerar la presencia de un ácido carboxílico. También se evidenció la presencia del grupo epoxi C-O-C por las señales a 1365 y 1216 cm^{-1} , y finalmente el pico ancho presentado a 3192 cm^{-1} , producto de las variaciones OH/H₂O, que posiblemente, a pesar del secado, aún presenta trazas de H₂O, o se puede atribuir a la presencia de grupo carboxilo, producto del proceso oxidativo, puesto que el agua puede intercalarse en la estructura del grafito, o a la presencia de grupos carboxilo, que se refuerza mediante la señal C=O explicada anteriormente. En la Figura 3b se muestra el espectro para el grafito, que se tomó como material de referencia para evidenciar el proceso de oxidación, en este no se presentan señales perceptibles, puesto que esta estructura carece de grupos funcionales, la comparación entre las figuras 3a y 3b evidenciaron la oxidación, identificando grupos oxigenados producto de los enlaces C-O y C=O sobre la estructura del grafito.

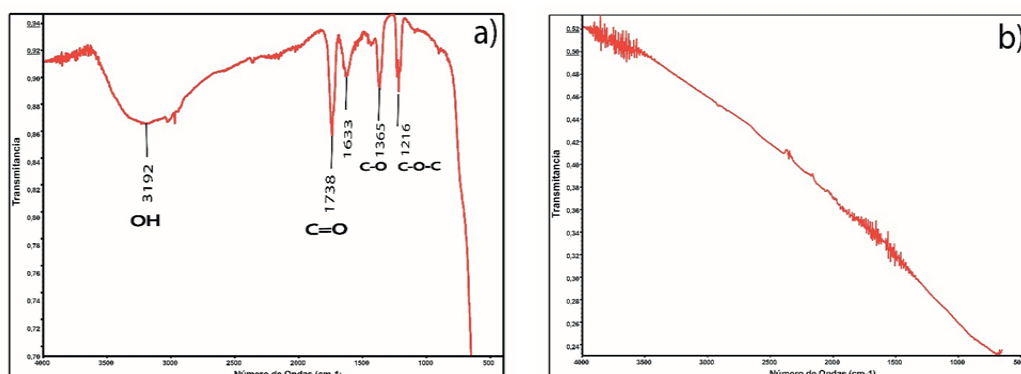


Figura 3. Espectros FTIR
Nota. a) óxido de grafito, b) grafito.
Fuente: elaboración propia.

3.2. Fase II: óxido de grafeno reducido con ácido ascórbico

Luego del proceso de oxidación, se procedió a reducir el OG con ácido ascórbico, donde se obtuvo un polvo de color negro, el espectro obtenido de esta fase se presenta en la Figura 4, donde se evidencia una disminución en las señales en comparación con el óxido de grafito, se conserva la tensión del enlace OH a los 3200 cm^{-1} , pero con menos intensidad, se mantienen las bandas sobre 1600 a 1675 cm^{-1} del enlace C=C, la banda C-O-C mucho más corta, y las señales C=O y C-O han desaparecido.

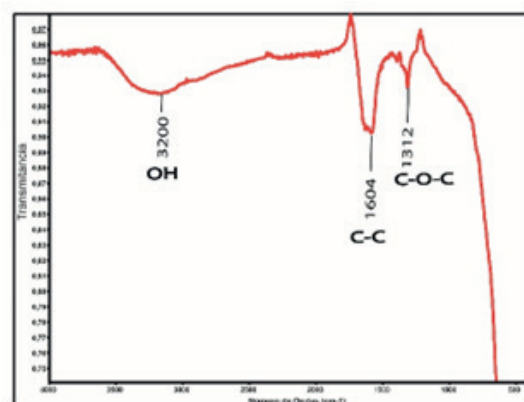


Figura 4. Espectro FTIR óxido de grafeno reducido
Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Análisis UV-VIS

Se hicieron barridos por UV-VIS entre los 190 y 600 nm, para identificar la longitud de onda a la cual absorbe el óxido de grafito. En la Figura 5 se observa una señal sobre los 228 nm, característica de la transición $\pi-\pi^*$ producto de los enlaces C=C conjugados de la estructura (López; Cuenca, 2017). Chaparro et al. (2014) reportaron esta misma señal a los 230 nm y una segunda señal sobre los 300 nm, producto de la transición del enlace C-O. Para este caso, se considera que puede ser producto de la transición $\pi-\pi^*$ y $n-\pi^*$ del grupo carbonilo, la cual también se identificó en los espectros FTIR.

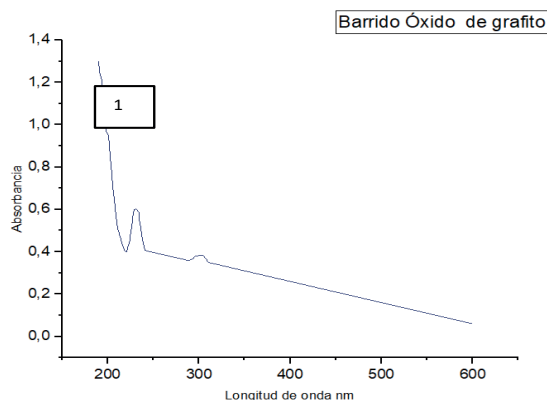


Figura 5. Espectro UV-VIS óxido de grafeno reducido
Fuente: elaboración propia.

En los ensayos de reducción se hacen barridos a diferentes tiempos 30, 60 y 90 minutos, para ver el desplazamiento de la señal hacia el rojo a lo largo de los periodos de reducción. Se registra la mayor absorbancia a 254 nm a 90 minutos (Tr_90), como se ilustra en la Figura 6. Al comparar la señal de OG con la señal de Tr_90, que corresponde al OGr, se muestra un desplazamiento, el cual se da por la reducción de los grupos C=O y el restablecimiento la estructura aromática de la sustancia (Lunavictoria, 2020). Barrera (2023) reporta valores similares para reducción (255 nm), y atribuye los cambios en las señales al desorden estructural que generan los grupos oxigenados localizados dentro de la brecha de banda de energía, disminuyendo la diferencia energética entre el HOMO y el LUMO, generado una menor absorción de energía, aumentando la longitud de onda.

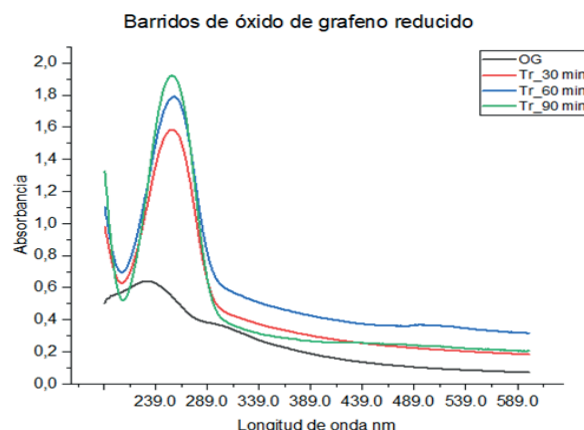


Figura 6. Barridos UV-VIS del óxido de grafeno reducido a diferentes tiempos

Fuente:

3.3. Fase III: funcionalización de textiles

Los resultados de funcionalización se describen en la Figura 7. Como se ilustra, el textil sufre varios cambios de color que indican la fijación del OG, en esta primera fase el textil se torna café. Según He *et al.* (2019), durante esta etapa se puede obtener un textil con un potencial alto de absorción de óxido de grafeno gracias a la fuerte interacción electrostática, la fuerza de Van Der Waals y el enlace de hidrógeno entre los grupos funcionales que contienen oxígeno presente en el óxido de grafeno, el agente de acoplamiento KH-560 y tejido de algodón. Durante el proceso reducción este cambia de color a negro producto de la formación del OGR, acorde a los ensayos observados en la síntesis de las sustancias y con lo reportado por Bhattacharjee *et al.* (2020).



Figura 7. Apariencia de los textiles durante los procesos de funcionalización

Nota. El gráfico describe el proceso de funcionalización de izquierda a derecha, la selección del textil tejido plano, adición de agente acoplante para fijación del óxido de grafeno, impregnación del óxido de grafeno sobre el textil por el método de agotamiento (coloración café) y reducción del óxido de grafeno con ácido ascórbico en el textil (cambio de color de café a negro).

Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Estructura química mediante FTIR del textil funcionalizado

La técnica se utilizó para obtener información de los grupos funcionales presentes en la superficie de las telas, los resultados se muestran en la Figura 8. Se analizaron las siguientes muestras: textil sin funcionalizar (a), textil impregnado con agente de acoplamiento (KH-560) (b), textil impregnado con partículas de OG y agente acoplante KH-560 (c) y textil reducido con ácido ascórbico (d). Todas las muestras analizadas (a, b, c y d) presentaron señales características del textil, pertenecientes a la celulosa del algodón, con presencia de alcoholes primarios y secundarios. Los picos presentes en los 3300 cm^{-1} corresponden a estiramientos OH. En los 1055 cm^{-1} representan estiramientos de vibración de grupos C-O (Ramírez, 2021; Labrador; Osto, 2021).

En la Figura 8b, se observó una señal en los $1192\text{ y }815\text{ cm}^{-1}$ correspondientes al estiramiento de grupos Si-O y vibraciones de flexión de grupos C-C, respectivamente, presentes en el agente de acoplamiento, lo que coincide con lo reportado por He *et al.* (2019). Cabe anotar que, aunque estos grupos funcionales se presentan por la adición del agente acoplante, siguen presentes las señales características de la celulosa, por lo que se puede indicar que no se modificó la estructura del textil significativamente. La Figura 8c mostró una señal a los 1633 cm^{-1} , la cual corresponde a estiramientos de los grupos -COOH, así mismo se evidenció la presencia del grupo de estiramiento OH a los 3333 cm^{-1} , resultados que evidencian la adherencia del OG al textil una vez realizado el proceso de funcionalización. En la Figura 8d, se identificó que estos grupos oxigenados se presentan con mucha menor intensidad, confirmando la reducción del OG. La comparación de los diferentes espectros FTIR del textil solo y funcionalizado permitieron evidenciar que el proceso de óxido/reducción no cambia la estructura del textil, pero que estos compuestos sí están presentes sobre su superficie. Los cambios en las señales de los espectros de la Figura 8c y 8d permitieron concluir que es posible hacer la reducción del OG sobre el textil, por ejemplo, la señal presente a los 1633 cm^{-1} en la Figura 8c desaparece en la 8d.

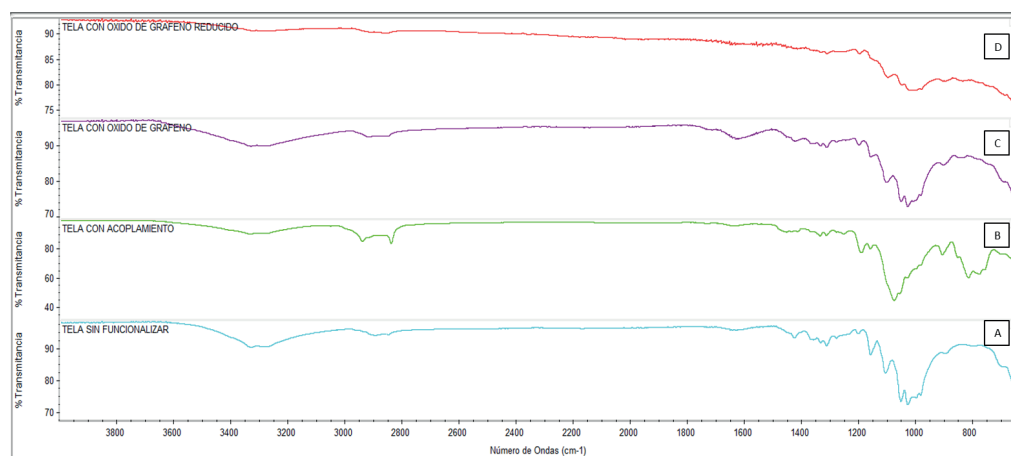


Figura 8. Espectros FTIR de textil de algodón antes y después de funcionalizar

Nota. Espectros FTI: a) Textil de algodón sin funcionalizar. b) Textil con agente de acoplamiento KH-560. c) Textil impregnado con OG. d) Textil impregnado con KH-560/OG y reducido con ácido ascórbico.

Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Pruebas de conductividad del textil

Se utilizó un circuito en serie para determinar la conductividad de las telas funcionalizadas con óxido de grafeno reducido. El circuito fue conectado a una bombilla led, que al encenderse confirma la conductividad del textil cuando es conectado al circuito, como se ilustra en la Figura 9.

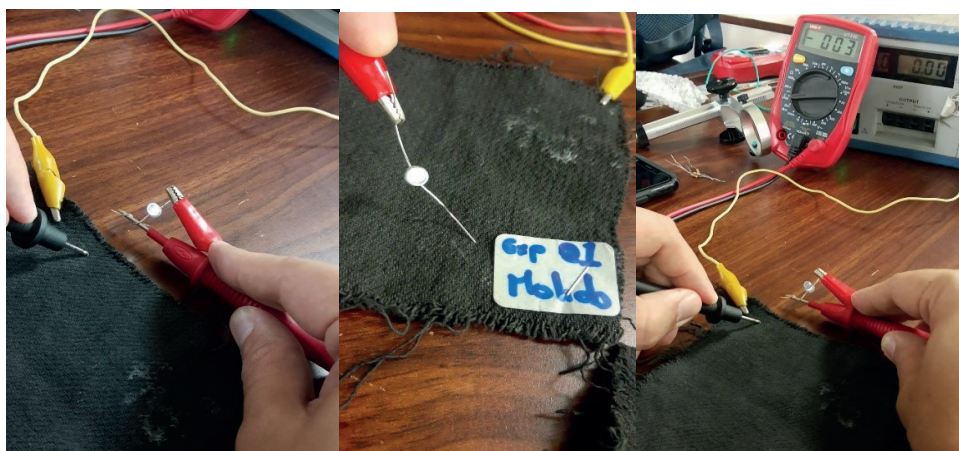


Figura 9. Prueba de conductividad a tela ensayo escaldo

Nota. Prueba de conductividad en tela con óxido de grafeno reducido a una concentración de baño de 3g/L en tejido plano con un circuito en serie.

Fuente: elaboración propia.

Se realizaron pruebas en telas de tejido de punto y tejido plano impregnadas con OG a diferentes concentraciones de baño 1, 2 y 3 g/L, relación de baño 1:10. Posteriormente, se redujo el OG en la tela con un exceso de ácido ascórbico (2, 4 y 6 g/L, respectivamente) que elimina los grupos funciones oxidados para generar espacios en la estructura, por donde pueden fluir los electrones y, de esta manera, mejorar la conductividad. Los resultados de esta prueba mostraron que en el tejido de punto no se detecta conductividad en ninguna de las concentraciones de baño, pero sí en las muestras de tejido plano para el baño de 3g/L, que registró una resistencia de 375 Ω en la tela funcionalizada, teniendo en cuenta la longitud de 9x10⁻³m y un área de 1,63x10⁻⁴m² del textil, se obtuvo una conductividad 0,1477 S/m, como se evidencia en la Ecuación 1 (Baratas, 2014).

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{l}{A} \quad (1)$$

Donde R representa la resistencia l la longitud y A el área de la sección del conductor.

Este resultado está alejado de valores reportados para materiales metálicos en hilos conductores o revestimiento de iones metálicos sobre telas como la plata o el cobre (Pla, 2017), pero el proceso de funcionalización con OGr mejoró la conductividad del algodón, puesto que este es considerado un aislante con valores reportados en este parámetro de hasta 2,77x10⁻⁹ S/m (Attia *et al.*, 2022), según la humedad. Adicionalmente, se evidencia el efecto que tiene la construcción del tejido en la conductividad obtenida, ya que el tejido plano sarga 2*2 que se usó en el proceso de impregnación presenta una mayor densidad que el tejido de punto jersey sencillo utilizado, haciendo posible que las partículas de OGr se dispongan de forma más homogénea, permitiendo un mejor flujo de electrones. Estos resultados coinciden con lo reportado por Ruiz (2021), que indica que en los procesos de impregnación de OGr en tejidos planos, se evidencia un aumento de la conductividad, puesto que el tejido tiene un mayor coeficiente de entrelazado, aumentando la densidad en el tejido.

3.3.3. Análisis de la funcionalización mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)

La Figura 10 muestra las micrográficas obtenidas con detector de electrones secundarios de la tela durante el proceso de funcionalización. En la Figura 10a, en tela blanqueada y descurtida, se observó el aspecto típico de un textil de algodón, no mercerizado, con sus convoluciones características. En Figura 10b se muestra el textil con el acoplante KH-560, donde las convoluciones ya no se ven tan definidas producto del revestimiento homogéneo

con el acoplante. En la Figura 10c, se observan las partículas de OGr impregnadas de forma homogénea, lo cual demuestra interacciones entre grupos funcionales de celulosa, acoplante y OGr, en tanto que la Figura 10d, en el textil funcionalizado sin adición de acoplante KH-560, se evidenciaron pocas partículas adheridas en la superficie, lo cual justifica el uso del acoplante para el proceso de funcionalización.

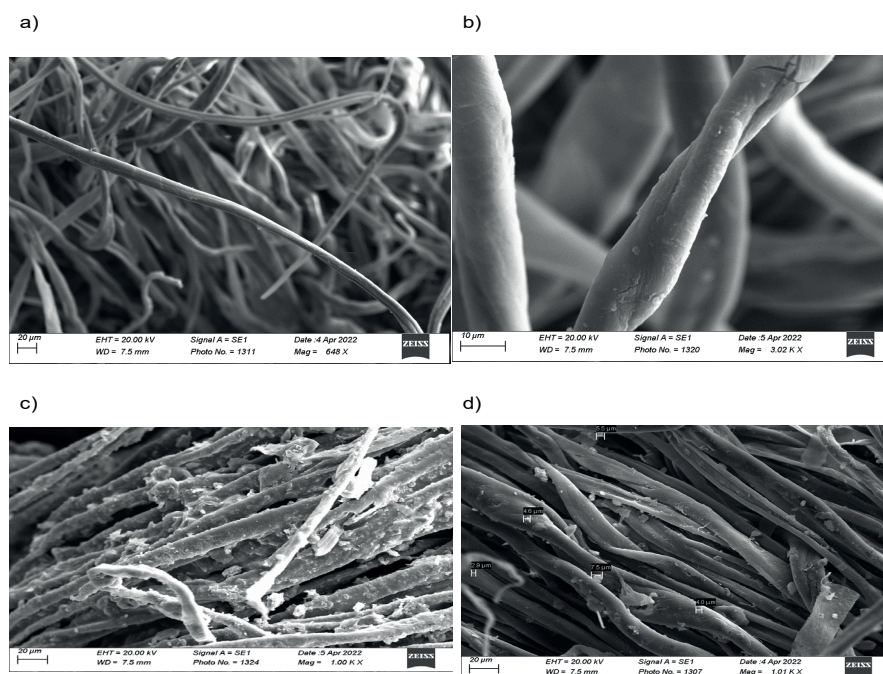


Figura 10. Micrografías SEM de los textiles analizados

Nota. Se muestran las micrografías de diferentes tejidos: a) tejido blanqueado, b) tejido con acoplante, c) tejido funcionalizado con OGr y acoplante, d) tejido funcionalizado con OGr.

Fuente: elaboración propia.

3.3.4. Pruebas de calidad textil

Las pruebas de calidad textil se realizaron sobre el sustrato que presentó conductividad en las pruebas realizadas, el cual corresponde al tejido plano sarga 2*2. Los resultados indicados en la Tabla 1 permitieron comparar los datos obtenidos en el textil sin funcionalizar, el textil funcionalizado sin agente de acoplamiento y el funcionalizado con la presencia del agente acoplante. Se observó que, en el análisis cualitativo de fibras y el ligamento, no tuvieron variación durante los procedimientos de funcionalización. El ensayo realizado para determinar la resistencia a la ruptura según la norma técnica indica una resistencia en Newtons elevada para el textil sin funcionalización de 406 para la trama y 381 para la urdimbre, lo cual establece que este textil, según la norma ASTM D4118-15 (ASTM, 2016), cumple con los requisitos específicos de las telas para confeccionar overoles, ropa de trabajo y vestidos para taller.

La diferencia entre los datos arrojados entre urdimbre y trama se deben a que la densidad lineal del hilo utilizado en urdimbre es más alta, y al estar engomado, aumenta la resistencia del hilo. Adicionalmente, la densidad de un tejido plano se caracteriza normalmente por la presencia de más hilos de urdimbre por unidad de longitud. En los textiles funcionalizados sin el agente de acoplamiento, se presenta una disminución de la resistencia a la ruptura, tanto en urdimbre como en trama, mientras que para el textil funcionalizado con agente de acoplamiento, aumentaron los valores para urdimbre a 424 N y para trama de 399 N, demostrando que la presencia del OGr con el agente de acoplamiento incide en el mejoramiento de la resistencia a la ruptura.

Los resultados analizados para determinar la protección UV se midieron en valores de UPF (factor de protección ultravioleta) de cada textil caracterizado, encontrando en el sustrato sin funcionalizar, una protección UV de 30, según la norma (Estándares Australia; Estándares Nueva Zelanda, 2017). Esto indica que se encuentra en un rango de buena protección, mientras que en el textil funcionalizado sin agente de acoplamiento y con la presencia de este, aumentan a un factor de 50+, obteniendo la calificación máxima, lo que lo clasifica como excelente en protección UV.

Las pruebas de solidez del color al lavado mediante método acelerado 2A (5 lavados domésticos caseros), donde se comparan los textiles funcionalizados y una muestra de textil sin funcionalizar, indican que el textil funcionalizado sin adición de agente de acoplamiento presenta una baja solidez al lavado, con una calificación de 2 en la escala de grises. Este resultado demuestra que el OGr impregnado en el sustrato puede irse desprendiendo a medida que este se va lavando. Por el contrario, la muestra de textil funcionalizado con presencia de agente de acoplamiento presenta un resultado de 4 en la prueba, confirmando que este es importante en el proceso de fijación y mantenimiento del OGr sobre el sustrato, cuando se somete a ciclos de lavado convencionales.

Tabla 1. Resultados de calidad textil

Ensayo realizado	Norma técnica de referencia	Muestra textil de tejido plano sin funcionalizar	Muestra textil funcionalizado sin KH-560	Muestra de textil funcionalizado con KH-560	Unidades
Análisis cualitativo de fibras	NTC-1213: 2016 AATCC 20:2013	100 % algodón	100 % algodón	100 % algodón	%
Ligamento		Sarga 2*2	Sarga 2*2	Sarga 2*2	
Método para determinar la resistencia a la ruptura y elongación de las telas	NTC-754-1: 2013	U_406/T 381	U_368/T 348	U_424/T 399	Newton
Protección UV	AS/NZS-4399: 2017	30	50+	50+	UPF
Determinación de la masa por unidad de área (peso) de tela	NTC-230: 2010	274	293	412	g/m ²
Solidez del color al lavado Método acelerado 2A (5 lavados domésticos caseros)	NTC-1155-3: 2017	4_5	2	4	Escala de grises

Nota. Se presenta un resumen a partir del informe de resultados del Laboratorio de Calidad Textil del Centro Textil y de Gestión Industrial, de la regional Antioquia del SENA en 2021.

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Se funcionalizó textil de algodón de tejido plano con óxido de grafeno reducido a una concentración de baño del 3 g/L, otorgando una conductividad equivalente a 0,1477 S/m en su superficie. Adicionalmente, las pruebas de calidad textil evidencian que el proceso de funcionalización mejora propiedades como la resistencia y protección UV, generando diversas posibilidades de uso del OGR en la industria de los textiles técnicos, como ropa de trabajo, textiles en el campo de la salud geotextiles, textiles industriales y como conductor en textiles inteligentes.

Las pruebas de conductividad a los textiles permitieron identificar el efecto que tiene la densidad del tejido (hilos por unidad de longitud) sobre esta variable, a una mayor densidad, el material es más compacto o tupido, por lo que el flujo de electrones se interrumpe en menor proporción.

Se obtuvo óxido de grafeno a partir de grafito puro, implementando el método de Hummers modificado, el grado de oxidación del grafito se comprobó mediante técnicas instrumentales de análisis como espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y espectroscopía ultravioleta visible (UV-VIS), con las que se pudo identificar, respectivamente, la presencia de grupos oxigenados en las capas individuales de grafeno y la longitud de onda predominante de estos grupos funcionales cuando están presentes dentro de la estructura del grafeno. De igual manera, se pudo determinar la presencia de óxido de grafeno reducido con estas técnicas de reducción química, utilizando ácido ascórbico como agente reductor, donde se observó en los espectros infrarrojos, la remoción de grupos funcionales oxigenados y espectros de barrido característicos del OGr. Es necesario el uso de otras técnicas de caracterización como RAMAN y Rayos X para identificar los cambios estructurales de paso de grafito a grafeno.

Se logró realizar el proceso conjunto de obtención de óxido de grafeno, impregnación al textil y reducción, lo cual permite disminuir los tiempos de producción, un resultado muy prometedor para futuras aplicaciones en la industria. El análisis de microscopía de barrido electrónico (SEM) permitió identificar la presunta presencia de partículas de OGr sobre la superficie del textil, así como comparar los diferentes procesos desarrollados con y sin el acoplante, de allí se destaca su importancia para la funcionalización y estabilidad de las partículas después de ciclos de lavado convencionales, mejorando el anclaje algodón- partículas y la conducción eléctrica.

Las pruebas de conductividad a los textiles permitieron identificar el efecto que tiene la densidad del tejido (hilos por unidad de longitud) y la presencia del agente de acoplamiento sobre esta variable, logrando determinar que tejidos más densos y compactos permiten una mejor conducción eléctrica. De igual manera, la presencia del agente de acoplamiento es fundamental para la conductividad, la solidez de las partículas de óxido de grafeno sobre el textil y la resistencia mecánica de este, comprobado mediante las pruebas de calidad textil realizadas.

Referencias

- Abril, Guillermo (2017). *Aproximación continua al grafeno: El efecto túnel* [Tesis de pregrado]. Universidad de Valladolid.
<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/25596>
- Arjona, Laura (2021). *El carbono y sus diferentes formas* [Tesis de pregrado]. Universidad de Sevilla.
<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/132332/ARJONA%20VEGAS%20LAURA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Asociación Estaudinense de Químicos y Coloristas Textiles (2020). AATCC 61-2013E(2020). *Colorfastness to Laundering: Accelerated*.
https://www.techstreet.com/standards/aatcc-61-2013e-2020?product_id=1872859
- Attia, Rehab; Yousif, Nashwa; Zohdy, Maged (2022). Electrical conductivity and mechanical properties of conductive cotton fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 51(2), 3149S-3175S.
<https://doi.org/10.1177/1528083720984099>
- Bhattacharjee, Shovon; Macintyre, Chandini; Wen, Xinyue; Bahl, Prateek; Kumar, Uttam; Chughtai, Abrar; Joshi, Rakesh (2020). Nanoparticles incorporated graphene-based durable cotton fabrics. *Carbon*, 166, 148-163.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.05.029>
- Baratas, Juan (2014). *Textiles conductores de algodón con nanotubos de carbono* [Tesis de pregrado]. Universidad Carlos III de Madrid.
https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/26629/TFG_Juan_Antonio_Baratas_Moreno.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Barrera, Royer (2023). *Estudio de las propiedades del óxido de grafeno y derivados obtenidos a partir de nanotubos de carbono para matrices de electrodos en baterías electroquímicas* [Tesis de pregrado]. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
<http://www.riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/3395/BAPRRY04.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cai, Guangming; Xu, Zhenglin; Yang, Mengyun; Tang, Bin; Wang, Xungai (2017). Functionalization of cotton fabrics through thermal reduction of graphene oxide. *Applied Surface Science*, 393, 441-448.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.046>
- Colom, Xavier; Cañavate, Francisco; Lis, Manuel; Sanjuan, Gemma; Gil, Ignacio (2020). Análisis estructural de Óxidos de Grafeno (GO) y Óxidos de Grafeno reducidos (rGO). *Afinidad*, 77(591), 167-174.
<https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/377162/470446>
- Delgado-Oleas, Gabriel; Avellar, Leticia; Stefano, Carlos; Frizera, Anselmo; Leal, Arnaldo; Rocón, Eduardo (2022). Análisis de movimiento mediante textil inteligente. En *XLIII Jornadas de Automática* (pp. 66-70). Universidade da Coruña.
<https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/31354>
- Chaparro, Cinthia; Cabanzo, Rafael; Ospino, Enrique (2014). Estudio de la adsorción de azul de metileno sobre óxido de grafeno. *Revista Colombiana de Materiales*, 5, 131-139.
<https://doi.org/10.17533/udea.rcm.19442>
- Cid, H. E.; Argüello, L. A.; Romano, A. A; Flores, C. A.; Pérez, M. A. (2012). *Síntesis y Caracterización de Grafeno*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Estándares Australia; Estándares Nueva Zelanda (2017). AS/NZS 4399:2017. *Sun protective clothing-Evaluation and classification*.
<https://www.standards.govt.nz/shop/asnzs-43992017/>
- Esteve-Adell, Iván; Gil-Agustí, Mayte; de Zaitogui, Leire; Quijano-López, Alfredo; García-Pellicer, Marta (2020). Grafeno: Obtención, tipos y su aplicación como sensor para detección de gases y sensor de presión. *Avances en Química*, 15(2), 57-72.

- Guerrero, Carlos; Llamas, Mayra; Martínez, Antonio; Reyes, Edgar; Guerrero, Tania (2022). Poliolefinas reforzadas con óxido de grafeno reducido. Mediciones viscoelásticas. *Ingenierías*, 25(92), 3-14.
<https://doi.org/10.29105/ingenierias25.92-52>
- He, Shan; Xin, Binjie; Chen, Zhuoming; Liu, Yan (2019). Functionalization of cotton by reduced graphene oxide for improved electrical conductivity. *Textile Research Journal*, 89(6), 10381050.
<https://doi.org/10.1177/0040517518760757>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2010). NTC 230:2010. *Textiles. Determinación de la masa por unidad de área (peso) de tela*.
<https://tienda.icontec.org/gp-textiles-determinacion-de-la-masa-por-unidad-de-area-peso-de-tela-ntc230-2010.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2013). NTC 754-1:2013. *Textiles. Método para determinar la resistencia a la rotura y elongación de las telas. Método del agarre*.
<https://tienda.icontec.org/gp-textiles-metodo-para-determinar-la-resistencia-a-la-rotura-y-elongacion-de-las-telas-metodo-del-agarre-ntc754-1-2013.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2017). NTC 1155-3:2017. *Textiles. Ensayos de solidez del color. parte 3: solidez del color al lavado. Método acelerado*.
<https://tienda.icontec.org/gp-textiles-ensayos-de-solidez-del-color-parte-3-solidez-del-color-al-lavado-metodo-acelerado-ntc1155-3-2017.html>
- Jordá, María (2017). *Desarrollo de un proceso industrial de recubrimiento de tejidos con óxido de grafeno reducido a partir de la adaptación de un proceso industrial basado en la tintura con colorantes TINA* [Tesis de pregrado]. Universidad Politécnica de Valencia.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/95462?>
- Kaushik, Vishakha; Lee, Jaehong; Hong, Juree; Lee, Seulah; Lee, Sanggeun; Seo, Jungmok; Mahata, Chandreswar; Lee, Taeyoon (2015). Textile-based electronic components for energy applications: Principles, problems, and perspective. *Nanomaterials*, 5(3), 1493-1531.
<https://doi.org/10.3390/nano5031493>
- Labrador, Henry; Osto, Steffany (2021). Caracterización de la celulosa proveniente del lodo papelerero y su esterificación. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 10(2), 67-81.
<https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v10n2.94003>
- López, Juan; Cuenca, Juan (2017). *Producción de óxido de grafeno directamente desde un blanco de grafito sin catalizador usando láser pulsado* [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica de Pereira.
<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/f9375056-449f-49b2-af5e-bb04d16875aa/content>
- Lunavictoria, Miguel (2020). *Síntesis y caracterización de óxido de grafeno y óxido de grafeno reducido* [Tesis de pregrado]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/15565/1/15T00792.pdf>
- Lund, Anja; van der Velden, Natascha; Persson, Nils-Krister; Hamed, Mahiar; Müller, Christian (2018). Electrically conducting fibres for e-textiles: An open playground for conjugated polymers and carbon nanomaterials. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 126(Mayo), 1-29.
<https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.03.001>

- Messina, María (2021). *Síntesis de grafeno 3D* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de la Plata.
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/118963/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Molina, Cristina (2020). *Estudio y validación de la metodología de innovación abierta aplicada al desarrollo y comercialización de textiles inteligentes* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Valencia.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/136074>
- Moliner, Rafael (2016). Del carbón activo al grafeno: Evolución de los materiales de carbono. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 41, 2-5.
- Pla, Joan (2017). *Caracterización de sensores integrados en prendas textiles deportivas para la práctica del triatlón* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Valencia.
<https://riunet.upv.es:443/handle/10251/76948>
- Ramírez, Evelyn (2021). *Caracterización de muestras de textil para su reciclaje con espectroscopía de infrarrojo medio y módulo ATR* [Tesis de pregrado]. Universidad de Lleida.
<https://repositori.udl.cat/server/api/core/bitstreams/b6a91ac5-a7f3-4348-a495-402986480838/content>
- Ruiz, Tamara (2021). *Funcionalización de textiles mediante la aplicación de grafeno* [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Valencia.
- Salmerón, Cristina (2 de mayo de 2018). *Entérate cuánto tarda cada prenda en degradarse*. Malvestida.
<https://malvestida.com/2018/05/vas-de-shopping-enterate-cuanto-tarda-cada-prenda-en-degradarse/>
- Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (2016). ASTM D4118-15. *Especificación de rendimiento estándar para overoles tejidos, overoles, overoles y telas de abrigo de mujer*.
<https://www.astm.org/d4118-15.html>
- Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (2017). ASTM D3776. *Métodos de prueba estándar para masa por unidad de área (peso) de tela*.
<https://www.laboratuar.com/es/testler/koruyucu-giysi-testleri/astm-d3776-d3776m-09a-kumasin-birim-alan-agirlik-basina-kutlesi-icin-standart-test-yontemleri/>
- Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (2021). ASTM D5034-21. *Método de prueba estándar para resistencia a la rotura y elongación de tejidos textiles (prueba de agarre)*.
<https://www.laboratuar.com/es/testler/astm-testleri/astm-d5034-tekstil-kumaslarin-kopma-mukavemeti-ve-uzamasi-icin-standart-test-yontemi/>
- Urcuyo, Roberto; González-Flores, Diego; Cordero-Solano, Karla (2021). Perspectivas y aplicaciones reales del grafeno después de 16 años de su descubrimiento. *Revista Colombiana de Química*, 50(1), 51-85.
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v50n1.90134>
- Villa, Fernando (2018). *Aplicaciones de la nanotecnología en la industria textil* [Tesis maestría]. Universidad Nacional de Educación a Distancia, España.
http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Fmartin/Martin_Villa_Fernando_TFM.pdf
- Zolezzi, Camilo (2017). *Efecto del grado de oxidación del óxido de grafeno sobre la remoción de contaminantes solubles y particulados* [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile.
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/148988/Efecto-del-grado-de-oxidacion-del-oxido-de-grafeno-sobre-la-remocion-de-contaminantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>