




# Design and manufacture of a protective device for elbows using flexible polymeric material with high mechanical resistance, through 3D additive manufacturing

Diseño y manufactura de un dispositivo protector para codos, utilizando material polimérico flexible con alta resistencia mecánica, mediante la manufactura aditiva en 3D

S. A. Hernández-Reina  ; A. N. Casas-Quintero  ; W. Aperador-Chaparro 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.23881>

Artículo de investigación científica y tecnológica

**Abstract**—The study of Thermoplastic Polyurethane was carried out, to evaluate its mechanical characteristics in different internal structures with a tension and compression analysis, whose objective is to find the internal structure that presents the highest energy absorption before the plastic deformation. 11 test probes were designed with different internal structures each one to perform a stress test and obtain the stress vs. deformation curve, which is later analyzed to obtain the material's resilience, with respect of the internal structure; then, the failure analysis of the test probes and the stress and compression tests in the ANSYS software were done. Once the stress test is performed, the test probe with the internal structure that obtained the highest energy absorption before plastic deformation, cubic internal structure, is chosen. Performing failure analysis, the test probes are classified into two different types of ruptures depending on the type of fracture; doing the analysis in ANSYS, the points of highest energy absorption in the internal structure were obtained; using a Thermoplastic Polyurethane material and implementing different internal structures, it is possible to reach a similar operation of a spring, which stores energy and then dissipates it in the medium.

**Index Terms** —3D printer, CAD, cubic structure, density, resilience.

**Resumen**— Se realizó el estudio del Poliuretano Termoplástico, con el fin de evaluar sus características mecánicas en diferentes estructuras internas con un análisis de tensión y compresión, cuyo objetivo es encontrar la estructura interna que presente la mayor absorción de energía antes de la deformación plástica. Se diseñaron 11 probetas con diferente estructura interna cada una con el fin de realizar una prueba de tensión y obtener la curva de tensión vs deformación, que posteriormente se analiza y se obtiene

la resiliencia del material, con respecto a la estructura interna; seguido a esto, se realiza el análisis de falla de las probetas y las pruebas de tensión y compresión en el software ANSYS. Una vez realizada la prueba de tensión se escoge la probeta con estructura interna que obtuvo la mayor absorción de energía antes de la deformación plástica, estructura interna cúbica; de igual forma, al realizar los análisis de falla, las probetas se clasifican en dos diferentes tipos de rupturas dependiendo del tipo de fractura; al realizar el análisis en ANSYS se obtuvieron los puntos de mayor absorción de energía en la estructura interna; al utilizar un material de Poliuretano Termoplástico e implementar varias estructuras internas diferentes, se puede llegar a un funcionamiento parecido al de un resorte, el cual almacena energía para luego disiparla en el medio.

**Palabras claves**—CAD, densidad, estructura cúbica, impresión 3D, resiliencia.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el riesgo de accidentalidad en hechos de tránsito a nivel mundial ha tomado relevancia, debido a las cifras que indican la cantidad de víctimas que se generan; y por tal motivo el protector generado fue diseñado para evitar y prevenir lesiones en el área de los codos para los ciclistas específicamente. A nivel local en Colombia existe la Agencia Nacional de seguridad vial: las muertes de usuarios de bicicletas registran un incremento del 1.12% en 2017 con respecto al 2016. Lo anteriormente mencionado se debe a que 349 y 355 muertes se registraron durante el 2016 y 2017 respectivamente, lo que conlleva a una gran alerta y mayor investigación con el

Este manuscrito fue enviado el 03 de marzo de 2020 y aceptado el 26 de noviembre de 2020. This work was supported in part by Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada. under IMP ING 3123.

S. A. Hernández-Reina, Ingeniería Mecatrónica Universidad Militar Nueva granada (e mail: u1802826@unimilitar.edu.co)

A. N. Casas-Quintero, Ingeniería Mecatrónica Universidad Militar Nueva granada (e mail: u1802800@unimilitar.edu.co)

W. Aperador-Chaparro, profesor de Ingeniería Mecatrónica Universidad Militar Nueva Granada (e mail: william.aperador@unimilitar.edu.co)



fin de reducir gradualmente las cifras anteriormente expuestas [1]. Sin embargo, en Bogotá para el 2017 hubo una disminución del 15% en el número de ciclistas accidentados, cuya cifra fue 60 en comparación a 71 del 2016. Desde el 2017 la Secretaría Distrital de Movilidad realizó la marcación de puntos ciegos en 1.338 buses en Bogotá; con el fin de crear conciencia entre los operadores del servicio de transportes públicos y transeúntes como peatones, ciclistas y motociclistas; a cerca de la existencia de estos puntos y la importancia en la reducción de los accidentes. [2] La fabricación de piezas en 3D con materiales poliméricos permite que elementos de protección del cuerpo humano como coderas y rodilleras, sean flexibles livianos y con alta capacidad de absorber y disipar energía sin que se fracture [3-5]. El material polimérico utilizado para la fabricación del dispositivo protector es un filamento compuesto por un termoplástico poliuretano y un termoplástico elastómero [6]. El termoplástico poliuretano es un elastómero versátil con propiedades que ofrecen alta flexibilidad de procesamiento; adicionalmente, este material tiene diversas aplicaciones como el calzado, los adhesivos y el moldeado especializado [7]. La clave de la versatilidad de éste es que su dureza, pues es sumamente personalizada; adicionalmente, el termoplástico poliuretano cuenta con propiedades físicas como la resistencia a la abrasión, la claridad óptica y la durabilidad; el elastómero posee sustancias naturales o sintéticas con propiedades químico-físicas típicas de la goma natural [8]. Este material, soportar grandes deformaciones elásticas, estirándose al menos el doble de largo para luego retomar su tamaño original nuevamente, tanto los elastómeros como los termoplásticos son totalmente reciclables, llamados termoendurecidos, los termoplásticos pueden fundirse y ser trabajados más de una vez. Los elastómeros termoplásticos se pueden moldear para obtener las formas deseadas con procesos clásicos de transformación de materias plásticas [6]. Los métodos más comunes son el moldeo por inyección y la extrusión. Debido a las propiedades que poseen los polímeros es que se utilizan en estructuras de aplicaciones de ingeniería de alta tecnología; esto se debe a que estos compuestos se pueden adaptar con el fin de ofrecer una calidad superior. Dentro de sus propiedades de adaptación “se encuentra la capacidad de absorción de energía de impacto en comparación a los metales” es decir, su capacidad de deformación y absorción de energía es buena en comparación a otros compuestos, lo que hace de los polímeros una opción elegida para construcciones de alta tecnología en la ingeniería. Para esta aplicación, la capacidad de absorción de la energía en polímeros es importante, pues se utiliza en protecciones especializadas para deportes en la seguridad humana. Las protecciones realizadas hacen las veces de amortiguador, con el fin de absorber la energía de impacto de forma controlada con el fin de garantizar la seguridad y evitar lesiones de gravedad en el deportista. [9]

La banda protectora es una pieza utilizada en algunos deportes para proteger las partes más expuestas a golpes, heridas o laceraciones [10]. Dentro de sus aplicaciones se encuentran las protecciones para codos, rodillas, cabeza, entre otros [11]. Dentro de los beneficios que aportan tanto las bandas protectoras se encuentra la disminución de riesgos a lesiones,

alivio de dolores por sobrecarga y su resistencia de acuerdo con el deporte [12]. En relación con lo anterior, las coderas son piezas de tela y otros materiales para colocar alrededor del codo y ser protegido de golpes, raspaduras o lesiones [13]. Estas son prendas acolchadas utilizadas para los deportes en los cuales las caídas son frecuentes y los deportistas están altamente expuestos. También hay diseños como bandas protectoras introducidas desde la mano y ajustables mediante materiales elásticos; la parte más gruesa es colocada en el hueso del codo con el fin de amortiguar el impacto al momento de una caída [14-15]. Los materiales elásticos o prendas ajustadas según proporcionan fuerza externa para dar forma al cuerpo, mejorar la silueta de las Figuras del cuerpo, facilitar la contracción muscular o incluso corregir posturas del portador”. Para el caso de la prenda realizada, se toma este material elástico en el área de los brazos, de codos hacia abajo hasta las muñecas, con el fin de dar forma a dicha parte de los brazos y poder lograr que la protección construida en los codos quede lo más fija posible, pues al momento de una caída, esta debe estar ajustada al codo para que cubra la articulación y la proteja de posibles lesiones o fracturas. [16]

Los materiales 3D en su mayoría son termoplásticos, algunos de ellos son: ABS acrilonitrilo butadieno estireno, no biodegradable, pero con una alta tenacidad, dureza y rigidez; PLA ácido poli láctico, biodegradable obtenido del almidón de maíz; HIPS poliestireno de alto impacto similar al ABS; PET tereftalato de polietileno utilizado para la fabricación de botellas, pues tiene una capacidad buena de cristalización, es un material resistente a los impactos y fuerte; Laywood-d3 material con textura similar a la madera, que de acuerdo al aumento o disminución de temperatura (en grados) varía su color en cuanto a intensidad; TPE elastómero termoplástico con alta flexibilidad y amplia deformación, entre otros elementos utilizados para la impresión 3D [17-18]. La impresión 3D proporciona una libertad de diseño geométrico; que de acuerdo con la estructura impresa en 3D los materiales a utilizar deben ser altamente elásticos y resistentes [19]. Son evidentes los avances tecnológicos en la actualidad, y que dicha construcción de estructuras es una nueva revolución en cuanto a materiales, diseño y resistencia, pues se piensan nuevas formas de realización de productos y desarrollos netamente ingenieriles de gran utilidad [20-21].

Los materiales compuestos reforzados con textiles trenzados exhiben una alta estabilidad estructural y una excelente tolerancia al daño, para su uso en equipos de protección deportiva; con la necesidad de mantener la integridad de sus estructuras y disipar la energía de impacto para proteger el cuerpo humano [22]. Las estructuras en 3D al ser reforzadas por materiales textiles como lonas o recubrimientos, mejoran las propiedades del material, pues lo hacen más resistente al impacto que se pueda ocasionar. De igual forma todo deporte tiene un riesgo representado en daños o lesiones al cuerpo; sin embargo, las protecciones adecuadas minimizan este tipo de riesgos y por eso los compuestos trenzados bajo cargas de impacto se vuelven cruciales; específicamente en aplicaciones de protección deportiva, absorción de energía [23]. De otro lado, para las protecciones se tiene un diseño tipo sándwich,

pues se utiliza la tela rompe vientos, la estructura impresa en 3D y finalmente como protección se tiene una lona resistente al desgaste, con el fin de hacer más duraderas y resistentes las protecciones [20]. La estructura para un protector de espalda se puede dividir en una parte dura y una parte suave, aunque algunos protectores de espalda han sido diseñados sin parte dura. La parte blanda está formada por elastómeros, proporcionando las características viscoelásticas; y la parte dura, consiste en termoestables o termoplásticos que distribuirán la fuerza a un área más amplia que la del impacto. También hay algunos protectores de espalda desarrollados con materiales especiales viscoelásticos, proporcionando naturaleza pseudo-dilatantes, que exhibe un comportamiento duro en respuesta expedita y comportamiento suave en respuesta pausada [22]. De acuerdo con lo descrito anteriormente, se relaciona con las protecciones creadas para ciclistas, puesto que se involucran partes blandas y duras con el fin de proporcionar propiedades de alta calidad, adaptables a la articulación que se desee proteger.

El propósito de esta investigación fue el estudio de diferentes geometrías de la estructura interna analizando su energía absorbida a partir de ensayos de esfuerzo deformación y contrastándolo con la simulación realizada mediante en ANSYS con la estructura geométrica seleccionada luego del análisis. Adicionalmente, se caracterizó mediante técnicas estructurales y superficiales el material polimérico, así como la fractura del material mediante técnicas como la microscopía. De acuerdo con los resultados, se seleccionó la estructura interna capaz de absorber la mayor energía para posteriormente realizar el diseño de la codera y adicionalmente colocarlo como hombrera.

## II. MÉTODOS Y MATERIALES

El material utilizado de poliuretano termoplástico (TPU) y elastómero termoplástico (TPE), fue usado por ser flexible, resistente a la abrasión y elevada dureza.

Se procedió a realizar las probetas para la prueba de tensión de acuerdo con la norma ASTM D638-14 con los 11 diferentes tipos de estructuras internas seleccionadas e implementadas en la impresora 3D. Las estructuras utilizadas para el análisis de tensión fueron: cubic subdivision, zigzag, concéntrico 3D, octet, line, tri hexa, concentric, triangles, quarter cubic, grid y cubic (estos son los nombres determinados en el software de la impresora). La absorción de energía es definida como el área bajo la curva de tensión desplazamiento [24-25].

Para la impresión de las estructuras se utilizó una impresora 3D que cuenta con una tecnología 3D FDM/FFF, volumen de impresión de 50\*50\*50 cm, estructura con perfil de aluminio lacado negro, diámetro de la boquilla de 0,4 mm, con capacidad de más de 200 horas de impresión continuas, velocidad de impresión hasta 200mm/s, espesor de capa entre 0.05 y 0.4mm, fuente de alimentación con entrada 110 V conmutable y salida de 24V, potencia de 160 a 200W, precisión de  $\pm 0.1$ mm, pantalla LCD, temperatura del extrusor hasta de 220°C, plataforma calefactada hasta de 60°C, compatible con cualquier tipo de

filamento, posee conectividad por tarjeta SD y cable USB, compatible con Windows, Linux y OSX.

El material fue caracterizado en su microestructura por microscopía electrónica de barrido (SEM) JEOL NeoScope JCM-5000.

Para el análisis de la composición estructural de las mezclas por espectroscopia infrarroja, se utilizó un espectrómetro Nicolet iS10 (Thermo Fisher Scientific) operado en modo transformada de Fourier, equipado con una reflectancia total atenuada horizontal (HATR) y un accesorio de cristal ZnSe. Los espectros se obtuvieron con una resolución de  $4 \text{ cm}^{-1}$ , en un rango espectral de  $4000\text{-}650 \text{ cm}^{-1}$  y 32 barridos. Los espectros fueron procesados con el software omnic 9.1.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig.1, se determinó la resiliencia del material polimérico, entendida como el trabajo de recuperación de muestra, la cual es la relación de energía devuelta a energía absorbida cuando la pieza evaluada se deforma y luego se libera. Puede ser elástica, flexible, compresible o torsional. Se evaluaron mediante esfuerzo deformación la estructura interna de relleno del material polimérico, dejando fija la densidad en un 20%; posteriormente, se analiza el área bajo la curva mediante un análisis de tensión.

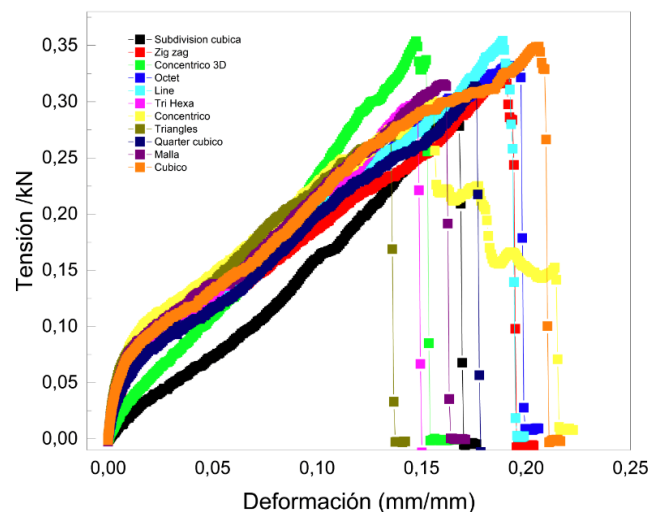


Fig.1. Curvas de tensión vs. deformación de los 11 tipos de relleno con el fin de analizar datos y el área bajo la curva, es decir, la energía almacenada antes de la deformación plástica.

TABLA I

ESTRUCTURA INTERNA, ENERGÍAS ALMACENADAS Y RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSIÓN DE CADA PROBETA CON SU RESPECTIVO LLENADO INTERNO

Áreas (#)	Estructura	Tensión de rotura (MPa)	Fuerza máxima (kN)	Longitud final (mm)	Elongación (%)	Área bajo la curva	(%)
1	Cubic subdivison	10,154	0.286	87	58.100	217	49
2	zigzag	11,500	0.324	84	52,200	352,453	79
3	Concentric 3D	12,545	0.354	83	51,000	267,167	60
4	Octet	11,775	0.332	81	47,200	401,996	90
5	Line	12,554	0.354	74	34,500	382,723	86
6	Tri Hexa	10,579	0.298	73	32,700	252,167	56
7	Concentric	10,792	0.304	82	49,500	291,221	65
8	Triangles	9,535	0.269	72	31,000	228,175	51
9	Cuarter Cubic	11,128	0.314	79	43,630	308,719	69
10	Grid	11,190	0.316	76	38,100	300,675	67
11	Cubic	12,377	0.349	82	49,100	444,829	100

En la Tabla I, se observa que las geometrías internas que tienen una mayor tensión de ruptura son: concentric3D, line y cubic. A pesar de que la geometría concentric3D es mayor en cuanto a tensión a la rotura que las demás estructuras presentan una deformación total baja, de acuerdo con la Fig.1 correspondiente de concentric 3D se observa una mayor rigidez del material. En cuanto a la fuerza máxima las geometrías concentric 3D y line presentan el mayor valor, y para ambas geometrías el valor fue similar; aunque la geometría line posee menor rigidez y, por lo que su deformación es mayor. En el caso de la geometría concéntrica alcanzó el esfuerzo máximo, ocasionando la curva evidenciada debido al desgaste por esfuerzos. Teniendo en cuenta el área bajo la curva, la geometría cubic presenta una mayor energía absorbida antes de la deformación plástica debido a que tanto las propiedades de tensión de rotura como deformación, aunque, hacen que haya una mayor área bajo la curva.

Al realizar las pruebas del microscopio de barrido electrónico de las estructuras internas, según lo obtenido en la tabla I se puede comprobar porque unas estructuras tienen diferente resiliencia, como en el caso de la Fig.2, en la cual se observa que a pesar de tener la misma densidad que las demás estructuras el relleno se encuentra que no alcanza a completarse en su totalidad, y por lo tanto se encuentra que es la estructura que absorbe menor cantidad de energía. En el caso de las Fig.3, Fig.4, Fig.6 y Fig.7 se aprecia que las estructuras tienen imperfecciones asociadas a la impresión, generando que las conexiones internas de las estructuras se deformen o no tengan el diámetro inferior al nominal de 0.4mm, la estructura en la Fig.11 Grid, posee una gran resiliencia, pero debido a que su estructura es bidimensional ante impactos en diferentes direcciones se comportara de manera diferente, por lo tanto, en la Fig.12 se observa la estructura cúbica, en la cual se observa que la distribución de esta se encuentra generalizada y completa en ambas direcciones, ya que además de ser la estructura que absorbe mayor cantidad de energía, también es tridimensional,

lo cual permite comportarse de la misma manera ante impactos provenientes de diferentes direcciones.

Puede haber diferentes tipos de morfología del tipo de rotura. Existen dos tipos de fractura; fractura dúctil y frágil. La fractura dúctil ocurre luego de que el material se somete a una alta deformación plástica; presente en materiales que poseen una zona de deformación plástica alta; para el caso del análisis de rotura en poliuretanos ocurre un tipo de rotura dúctil; al tomar las imágenes con el microscopio para el análisis de las fallas en

la estructura interna, se logra observar una zona fibrosa ocurrida debido a la fractura por formación de micro vacíos, como también una zona de desgarro o desprendimiento de material, con fractura de deformación superficial. La fractura por formación de micro vacíos ocurre debido al tipo de esfuerzos a los que se somete; quedando estos en la misma dirección del desprendimiento. Para la fractura con deformación superficial, la zona de quebrantamiento se forma también debido micro vacíos, pero éstos se aplastan cuando las dos superficies rasgadas se deslizan una sobre otra, generando una superficie aparentemente lisa. [26] De la Fig.13 a la Fig.27 se observan los daños ocurridos en las probetas y los tipos de fractura clasificándose de la siguiente manera: ocurre fractura por formación de micro vacíos en las probetas con estructuras internas de: Cubic subdivisión (Fig.13 y Fig.14) demostrando no solo el tipo de falla sino el deterioro ocurrido en ella, zigzag (Fig.15 y Fig.16) evidenciando el tipo de fractura y el rompimiento ocurrido en ella, Concentric 3D (Fig.17 y Fig.18) evidenciando el tipo de fisura, Octet (Fig.19 y Fig.20) evidenciando el tipo de fractura, Tri Hexa (Fig.22), Concentric (Fig.23), Triangles (Fig.24) y Cubic (Fig.27); de igual forma, ocurre fractura por deformación superficial para las probetas con estructuras internas en formas de línea (Fig.21), Cuarter cubic (Fig.25) y Grid (Fig.26).

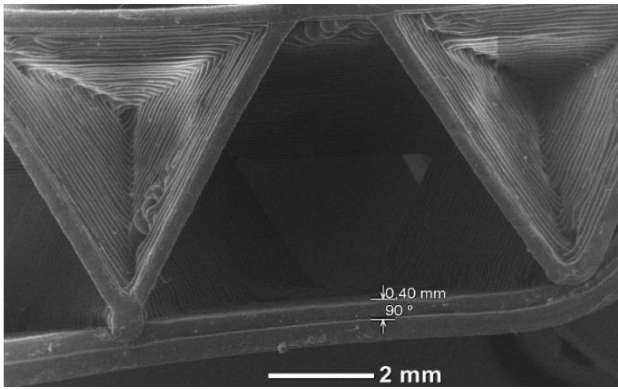


Fig.2. Llenado tipo subdivisión cúbica.

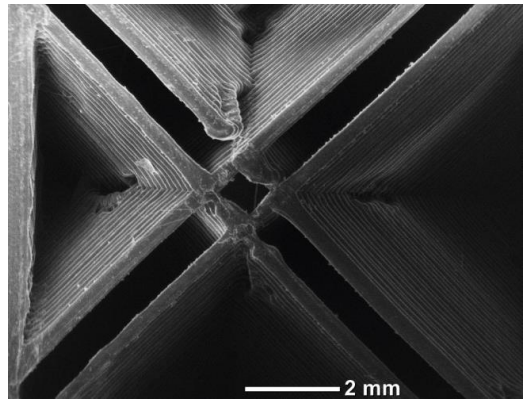


Fig.5. Llenado tipo Octet.

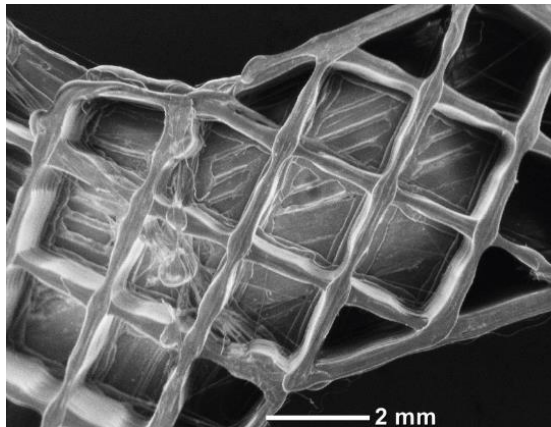


Fig.3. Llenado en tipo zigzag.

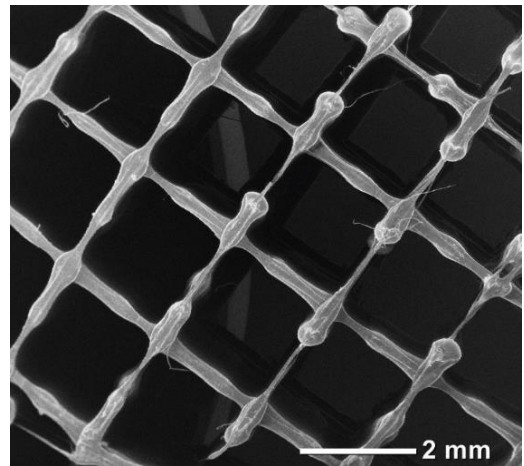


Fig.6. Llenado tipo Line.

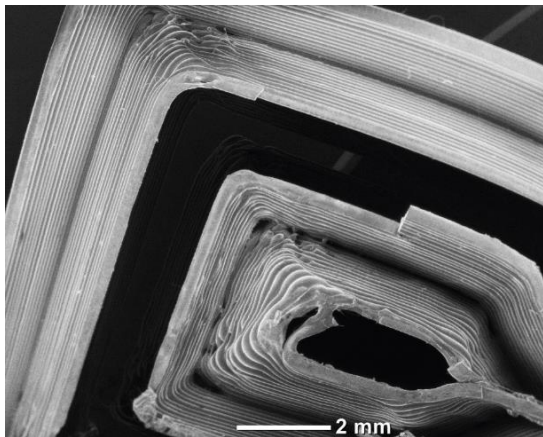


Fig.4. Llenado tipo Concentric 3D.

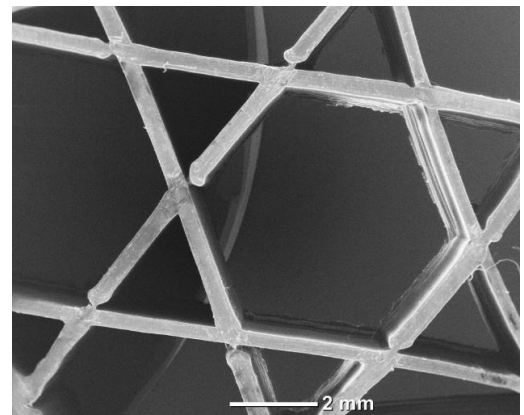


Fig.7. Llenado tipo Tri Hexa.

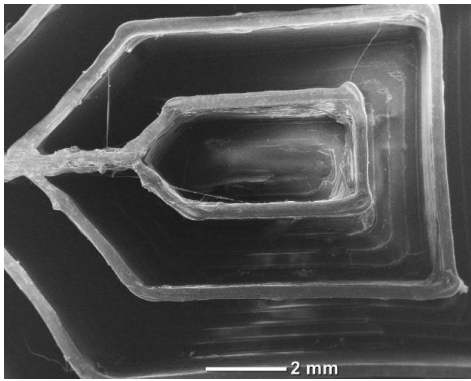


Fig.8. Llenado tipo Concentric.

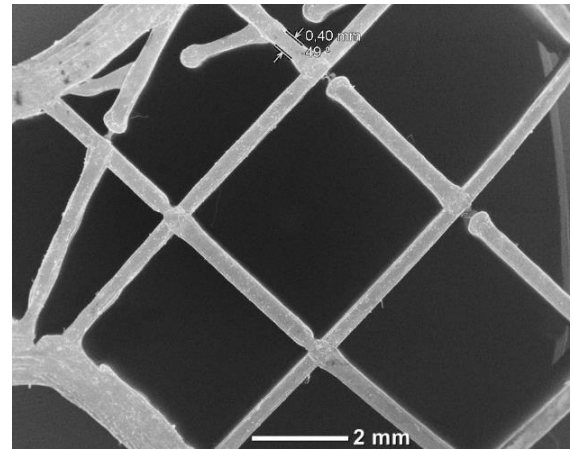


Fig.11. Llenado tipo Grid.

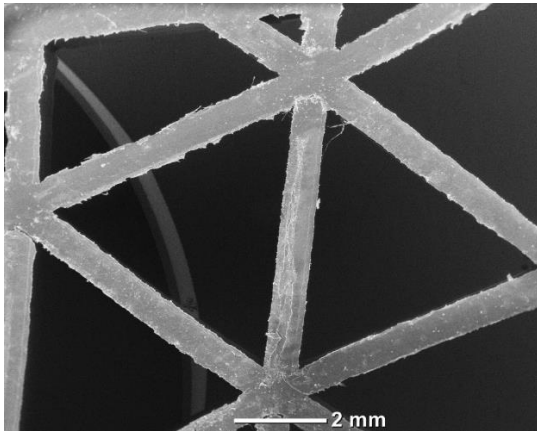


Fig.9. Llenado tipo Triangles.

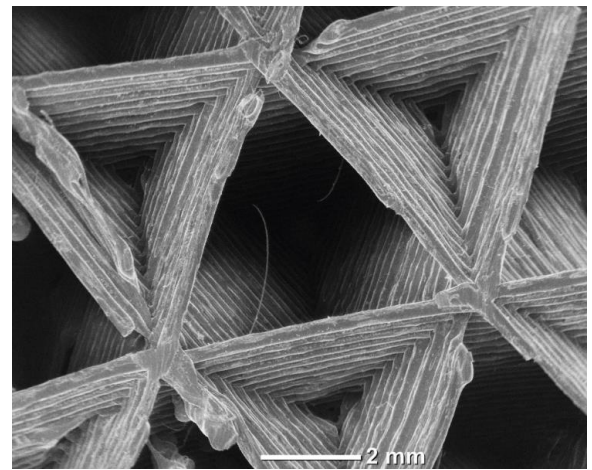


Fig.12. Llenado tipo Cubic.

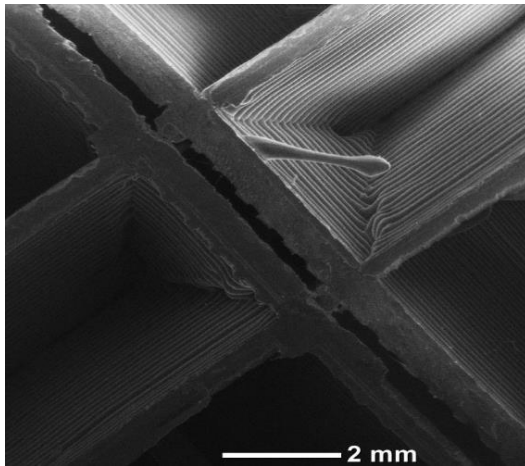


Fig.10. Llenado tipo Cuarter cubic.

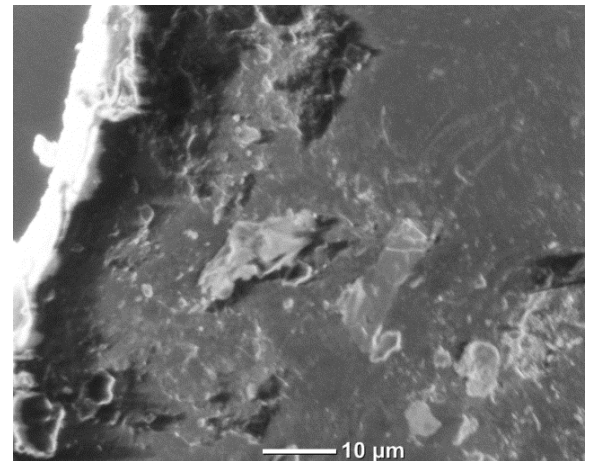


Fig.13. Fractura por formación de micro vacíos en Subdivisión cúbica.

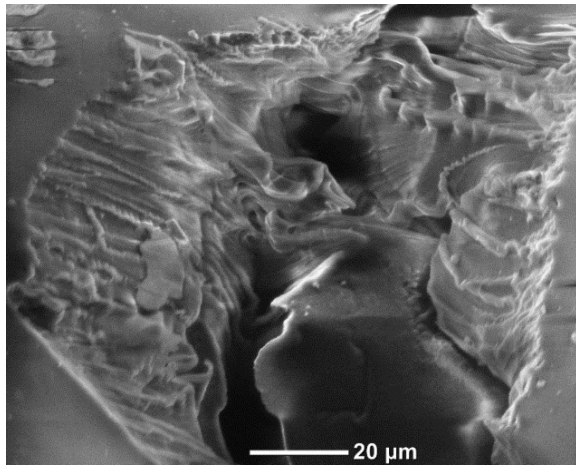


Fig.14. Imagen del sitio del desgarre de subdivisión cúbica.

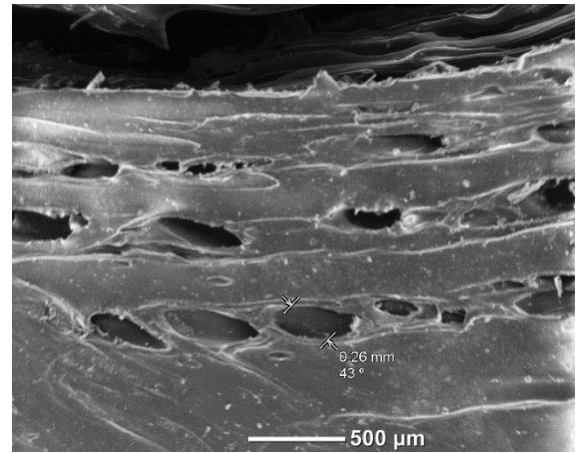


Fig.17. Fractura por formación de micro vacíos, en Concentric 3D.



Fig.15. Fractura por formación de micro vacíos, en Zigzag.

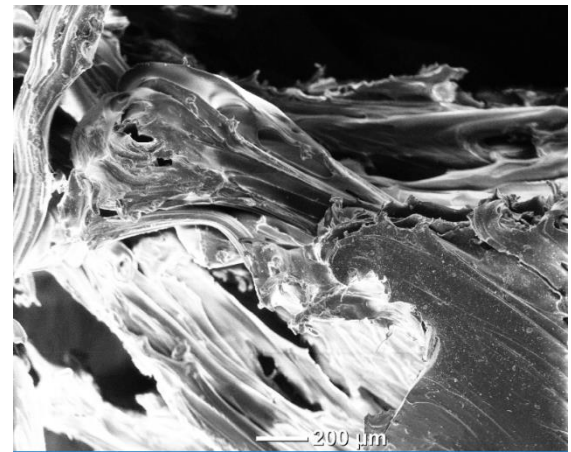


Fig.18. Imagen del sitio del desgarre de Concentric 3D.

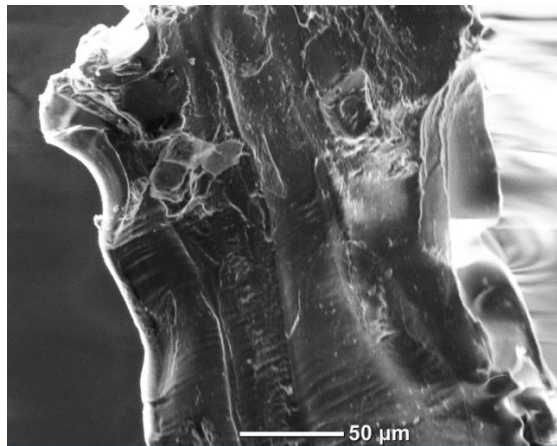


Fig.16. Imagen del sitio del desgarre, Zigzag.

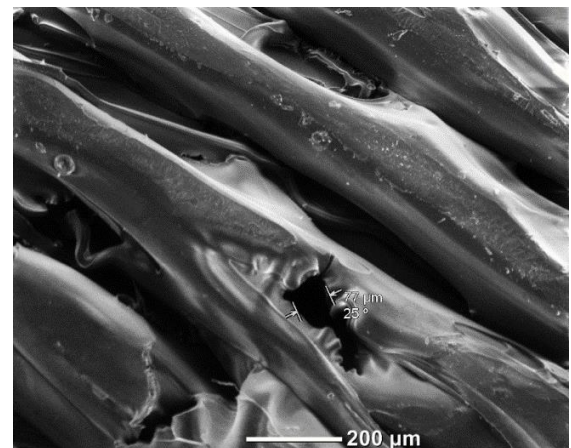


Fig.19. Fractura por formación de micro vacíos, en Octet.

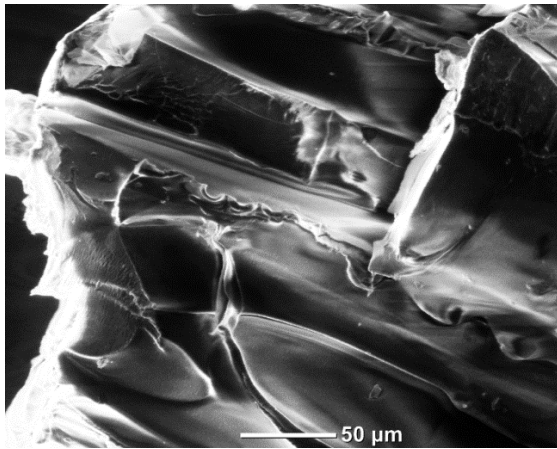


Fig.20. Imagen del sitio del desgarre de Octet.

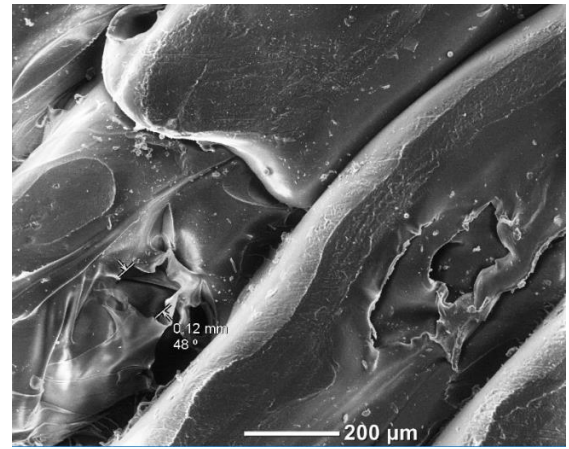


Fig.23. Fractura por formación de micro vacíos en Concentric.

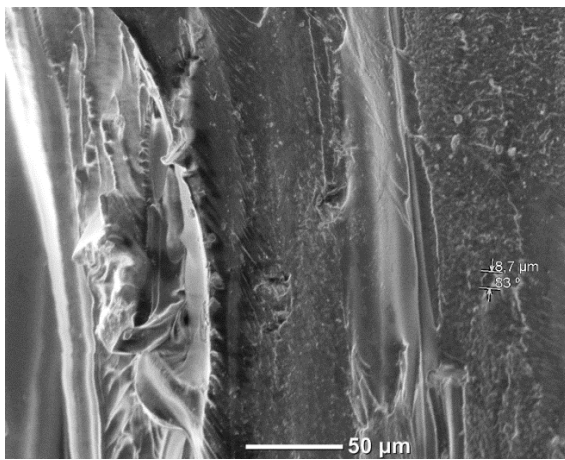


Fig.21. Fractura por deformación superficial, en Line.

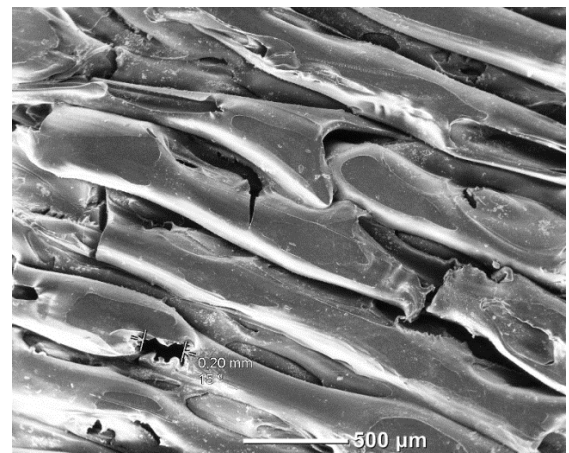


Fig.24. Fractura por formación de micro vacíos, en Triangles.

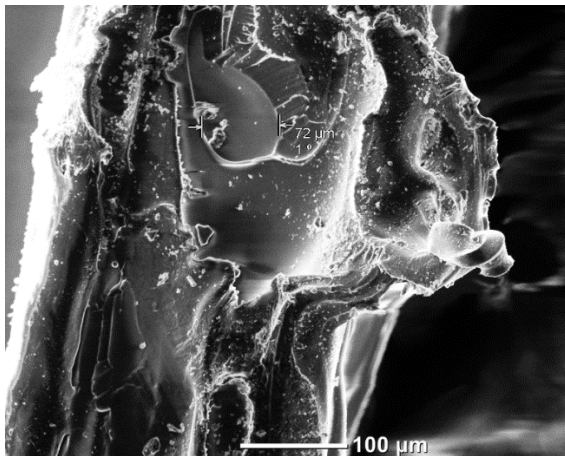


Fig.22. Fractura por formación de micro vacíos, en Tri Hexa.

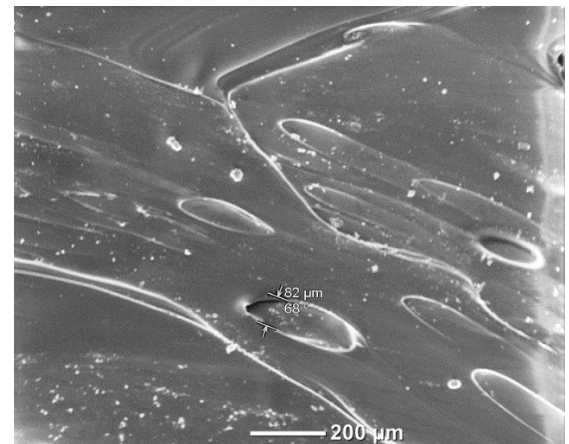


Fig.25. Fractura por deformación superficial, en Quarter Cubic.



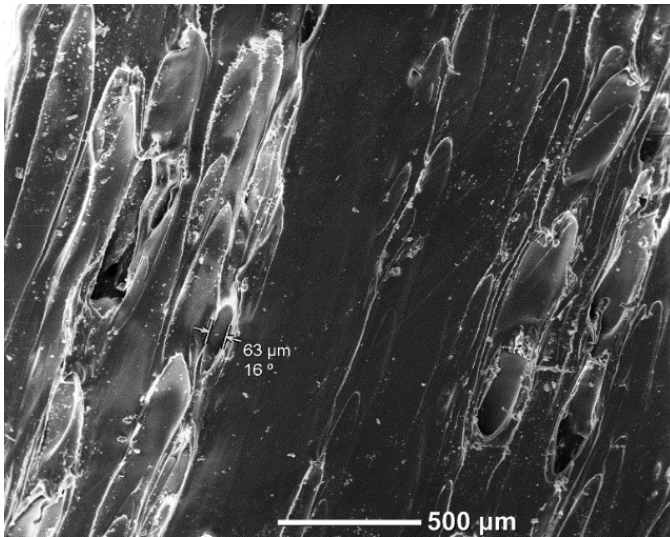


Fig.26. Fractura por deformación superficial, en Grid.

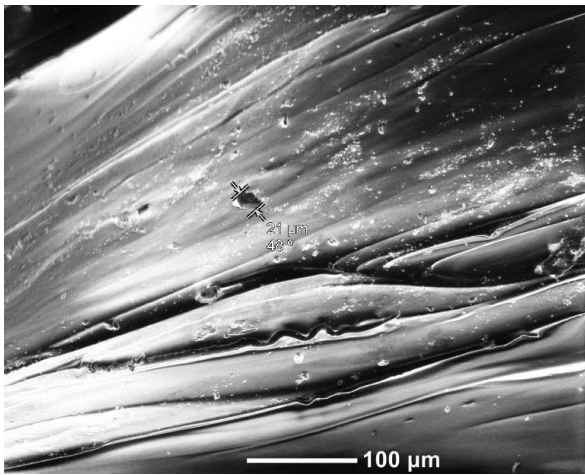


Fig.27. Fractura por formación de micro vacíos en Cubic. La prueba de espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier o FTIR, se realizó con el fin de obtener un espectro infrarrojo de absorción, que en este caso es la estructura de poliuretano termoplástico realizada en impresión 3D. Esta prueba recopila datos con alta resolución espectral un rango amplio espectral. Este ensayo utiliza la transformada de Fourier con el fin de convertir datos sin procesar en el espectro real, como se observa en la Fig.28 y Fig.29 en donde se observa no solo dicho análisis, sino la composición química presente en el poliuretano termoplástico.

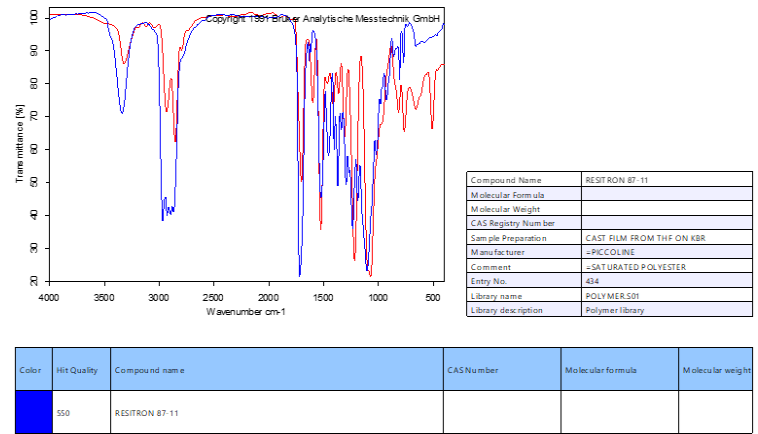


Fig.28. Resultados del FTIR usado en el material sin fundir, enlazado a un material comercial.

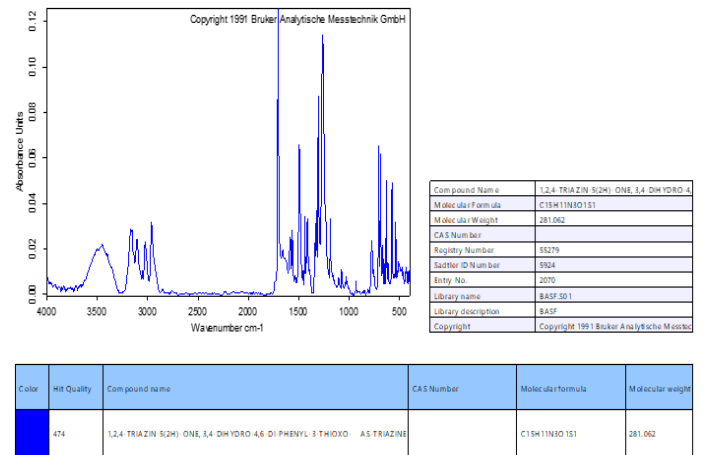


Fig.29. Resultados del FTIR usado en el material sin fundir.

Posteriormente, según el análisis previo del material, se diseñó la chaqueta rompe vientos en la cual, se implementan las protecciones para codos y de forma adicional para hombros, con la estructura interna cúbica y densidad al 20%. De igual forma, se realiza la estructura externa de las protecciones en hombros y codos, debido a que en las articulaciones, se deben adaptar a la ergonomía corporal; es decir, de acuerdo a las pruebas realizadas su diseño debe hacerse por partes conformando cada una de ellas la protección con el fin de lograr una adecuada y cómoda prenda; pues si se realizaba una sola pieza, no se amoldará ni se tendrá una adecuada movilidad en las articulaciones, haciendo que queden desprotegidas o mal asignadas. Para el diseño de esta chaqueta, se utilizan 5 tipos de tela diferentes, los cuales se evidencian en los anexos; que para el caso de la Fig.30, se evidencia la lona utilizada para proteger el material de absorción, ya que al ocurrir el impacto se puede generar desgaste sobre este, y como se muestra en su imagen, se logra ver el recubrimiento realizado a la tela, la cual hace que esta lona resista y que además sea un material mucho más grueso; para el caso del micrografía de la Fig.31, se evidencia la malla transpirable utilizada para el área de los costados, las axilas y la parte central de la espalda, es decir, sobre la columna

vertebral, evidenciando en la imagen el área no solo del tejido sino de los espacios que posee, de igual manera, se observa un tejido un poco más amplio; para el caso de la Fig.32, se evidencia una tela elástica ubicada en el área inferior de los brazos, es decir de codos hacia muñecas, con el fin de amoldarse al cuerpo haciendo más efectiva la protección de esa zona, evidenciando en la imagen un tejido trenzado; la Fig.33, evidencia una tela reflectiva la cual se asigna para el área central del pecho y de igual forma para la parte de la columna vertebral, evidenciando en la imagen que dicha tela presenta un patrón de esferas que hacen parte del recubrimiento de ésta que su característica principal, y es poder reflejarse en la oscuridad; de igual forma, para la micrografía mostrada en la Fig.34, se evidencia la tela reflectiva con su tejido propio de ésta en la cual ya no tiene el recubrimiento, con el fin de observar más de cerca su diseño, donde se puede ver tanto la trama como la maquinación que son el tejido vertical y horizontal respectivamente; para la Fig.35, se evidencia una tela rompe vientos la cual se asigna para la estructura completa de la chaqueta, evidenciando en la imagen un tejido entre cruzado, en el cual se ve la trama, el tejido vertical y la maquinación, que es el tejido horizontal, similar al tejido que posee el reflectivo; de igual forma en la imagen da la impresión que ciertas áreas son más extensas que otra, sin embargo esto se debe a cuanto se elonga el material en ciertas zonas y no al tejido propio de dicha tela. Todo ello con el fin de lograr una prenda liviana, cómoda y protectora.

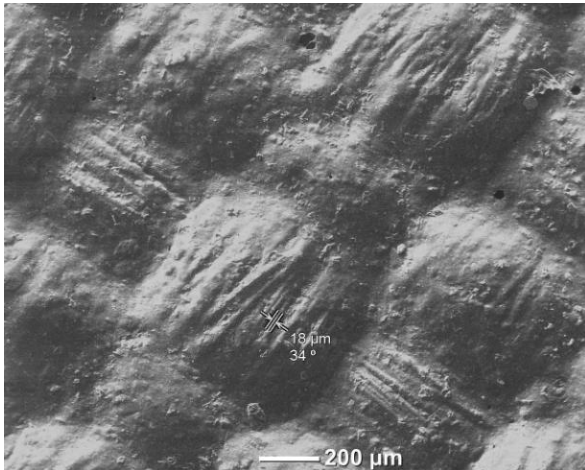


Fig.30. Lona protectora para el área de los codos y hombros.



Fig.31. Malla transpirable para el área de los costados, las axilas y la columna vertebral.

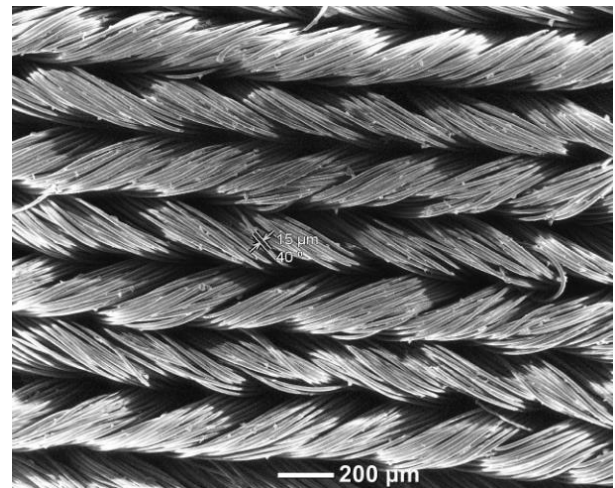


Fig.32. Tela elástica para el área inferior de los brazos, de codos a muñecas.

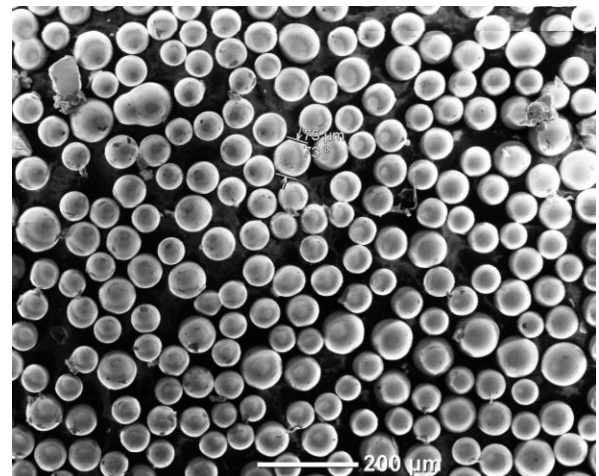


Fig.33. Tela reflectiva para el área del pecho y la parte central de la espalda (recubrimiento).

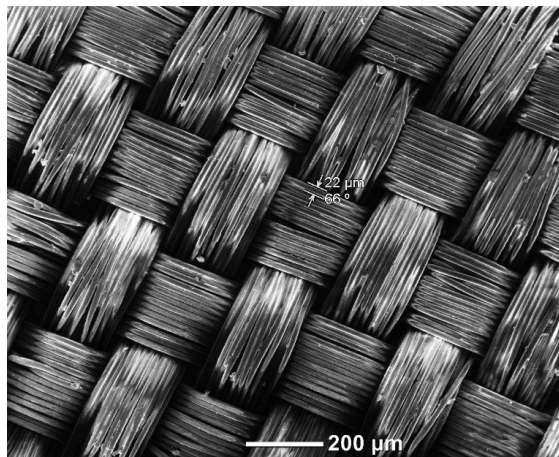


Fig.34. Tela reflectiva para el área del pecho y la parte central de la espalda (tejido).

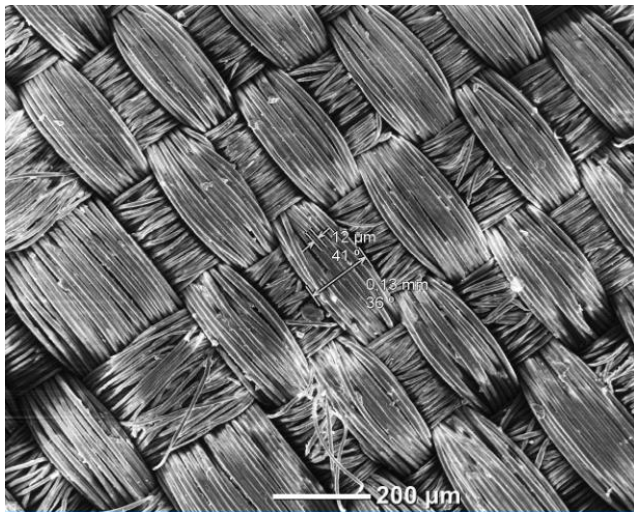


Fig.35. Tela rompiewientos para la estructura de la chaqueta.

Después de seleccionar la estructura con mayor absorción de energía, se procede a realizar la simulación por medio del programa ANSYS, con el fin de comprobar las propiedades mecánicas del material y poder realizar un detallado análisis de la estructura interna al exponerse a condiciones de compresión. Después de ingresar las constantes elásticas del material se procede a realizar las simulaciones correspondientes al ensayo de tensión y compresión [27]. Del estudio de tensión del material se obtuvo: deformación total (Fig.36) y estrés o fatiga equivalente (Fig.37) con base a los resultados de ANSYS y lo observado de la zona de ruptura de las probetas, se tiene que debido a que la estructura interna está distribuida de manera uniforme y como se observa en la Fig.38 al generar la estructura tridimensional por medio de la impresora 3D, se crean zonas parecidas a los regiones denominadas en la industria del calzado “con cámara de aire”, que permiten amortiguar el impacto, además de generar una mayor absorción de energía en relación a las demás estructuras, debido a la fabricación aditiva que

permite la creación de configuraciones tridimensionales [28]. En cuanto la simulación el material a compresión se aplicó una fuerza de 250 N sobre una placa de acero estructural con el fin de aplicar la dispersión de la energía hacia el material termoplástico como se observa en la Fig.39, al aplicar la compresión al material (Fig.39 y Fig.40) se observa la aplicación de forma de resorte donde al utilizar un material termoplástico que tienda a recuperar su forma inicial y una estructura que permita almacenar energía, como se observa en la transición de la Fig.39 a Fig.41 donde inicialmente la estructura estaba extendida y consecuentemente se comprime generando zonas donde el material almacena energía como se muestra en la Fig.41, para luego liberarla al exterior disminuyendo el impacto al otro extremo de la protección [29].

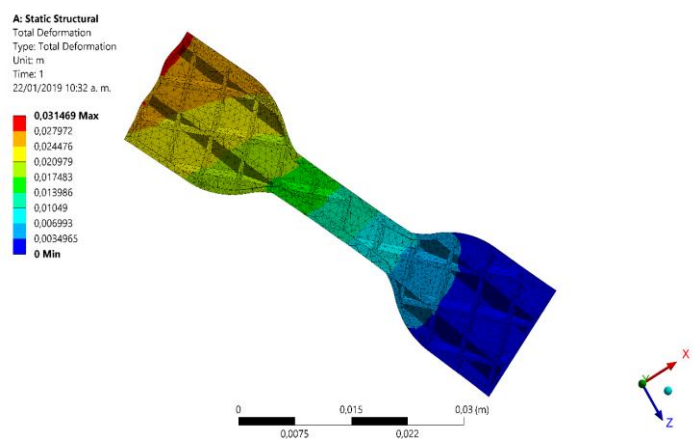


Fig.36. Simulación deformación total.

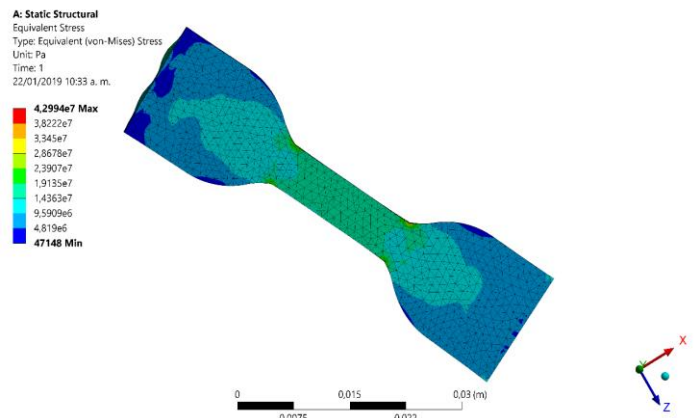


Fig.37. Simulación de estrés equivalente.

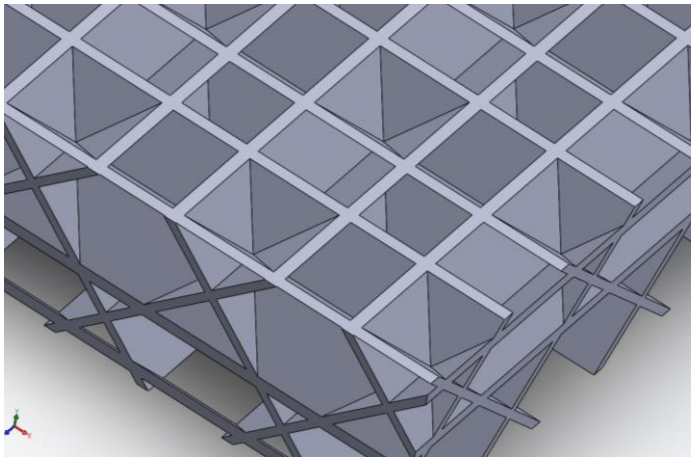


Fig.38. Estructura interna del material en diferencias finitas.

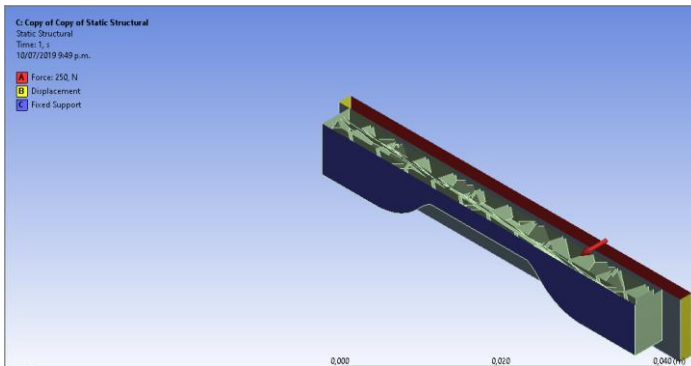


Fig.39. Soportes y fuerzas en simulación de compresión.



Fig.40. Placa y material antes de aplicar la compresión.

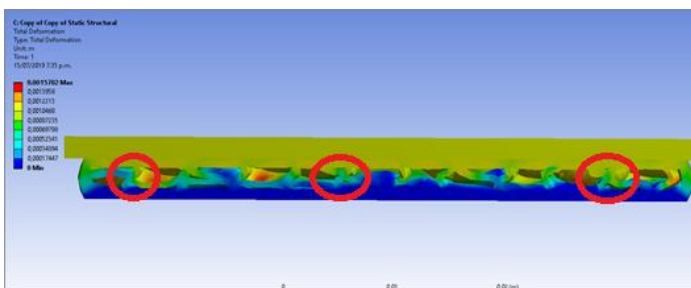


Fig.41. probeta después de aplicar compresión, con zonas donde se absorbe energía.

Por último, y después de encontrar las especificaciones del material, escoger los materiales a trabajar en la prenda y realizar los análisis pertinentes, se procede a generar el diseño de la protección en el software CAD. Teniendo en cuenta las medidas

del hombro y del codo se crean sus respectivos diseños en forma de elipse con 36.28 cm de perímetro para el codo Fig.43 y para el hombro 47.2 cm de perímetro Fig.42. En ambos diseños se tuvo en cuenta el borde donde va a ser cocido a la chaqueta y se tiene un diseño modular donde es posible doblar el codo y el hombro fácilmente. En el sistema modular a cuadros viene incluido la estructura interna cúbica para permitir una mayor absorción de energía.

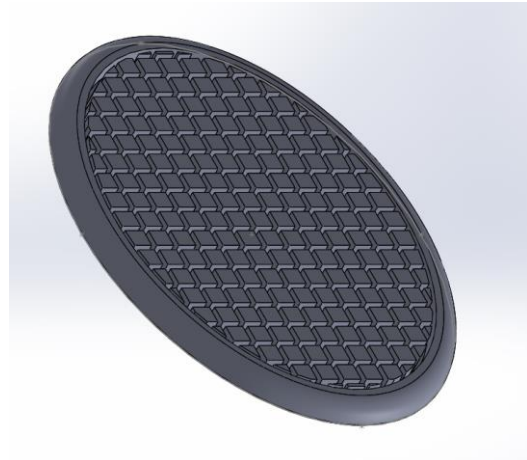


Fig.42. Diseño CAD de la codera.

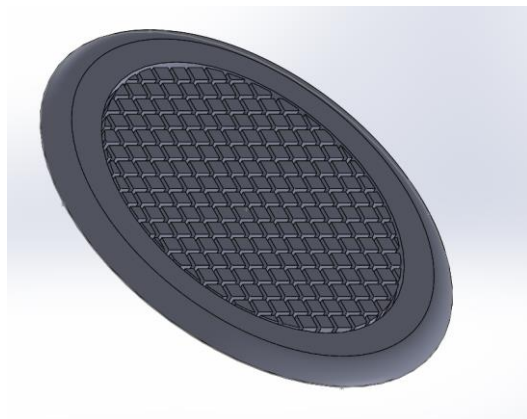


Fig.43. Diseño CAD hombrera.

Los polímeros se caracterizan por tener propiedades tales como elasticidad, compresión, dureza, flexibilidad, suavidad, fragilidad, fortaleza, entre otros. Con el objetivo de analizar las propiedades y estructuras de los plásticos o polímeros que son las moléculas con cadenas más largas pueden enredarse entre ellas y mantenerse unidas; implicando que estas moléculas tienen puntos de fusión más altos. Los polímeros que no tienen cadenas laterales en sus moléculas tienen mayor densidad pues una mayor cantidad de moléculas se pueden empaquetar en el mismo espacio.

Al haber cadenas laterales, les es imposible deslizarse a las cadenas de polímero pues existe mayor interacción entre las cadenas. Ahora bien, si se coloca una capa de plastificante sobre el polímero esto hará que las moléculas se deslicen entre ellas con mayor facilidad, haciendo que el polímero sea más flexible; al no aplicar el plastificante, el polímero se hace más resistente

y rígido, pues las cadenas se alinean en filas, aferrándose entre sí con más fuerza.

De acuerdo con lo explicado anteriormente, se tuvo en cuenta para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales generados. Para resistencia a la tensión se recomienda utilizar moldes de temperaturas altas, usar alta velocidad de inyección, evitar altas temperaturas de derretimiento y tener en cuenta que la presión de inyección tiene pequeños efectos; para alargamiento a la tracción se recomienda usar moldes de temperaturas más calientes y evitar altas temperaturas de derretimiento; para módulo de flexión usar moldes de temperatura más altas, usar alta velocidad de inyección y tener en cuenta que la presión de inyección tiene solamente efectos moderados; para el encogimiento o contracción se deben usar moldes fríos para reducir el encogimiento y usar alta presión de inyección; y por último, suele realizarse un proceso de “molido” del material, el cual se mezcla uniformemente con el material virgen. Es recomendable un 20% de molido, aunque hay momentos en los cuales no es permitido; sin embargo, esta aplicación puede probarse más a fondo, siendo este un proceso seco, limpio y uniforme en su mezcla. [30]

De otro lado, existen tres tipos principales de métodos para cambiar las propiedades de mezclas entre polímeros con el fin de optimizar interacciones intermoleculares. Los métodos son: mezclas termodinámicas entre polímeros, interacciones intermoleculares entre dos polímeros, habilidad para comportarse como un tensioactivo polimérico que puede adherirse a una mezcla polimérica, con el fin de cambiar la dispersión y adhesión entre dos componentes en una fase separada de mezcla polimérica. [31]

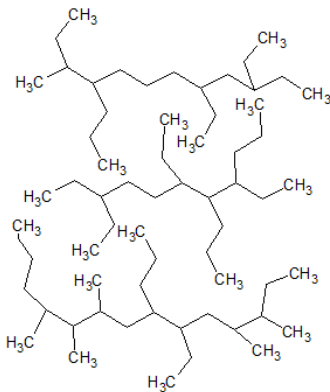


Fig.44. Estructura general polimérica.

En la Fig.44 expuesta con anterioridad, se evidencia la estructura química general para los polímeros, compuestas de Carbonos e Hidrógenos en sus cadenas.

La versatilidad resulta de la estructura del TPU, la cual resulta debido a una alta resiliencia, compresión, resistencia al impacto, abrasión, desgarres, temperaturas e incluso hidrocarburos. Este material brinda flexibilidad al no utilizar plastificantes, como también una amplia dureza y alto nivel de

elasticidad. Su rango de propiedades físicas permite que el TPU se utilice como goma dura y como termoplástico de ingeniería blanda. Este material puede ser esterilizado, soldado, procesado fácilmente, pintado, impreso, troquelado, cortado, entre otros.

#### IV. CONCLUSIONES

El uso de las nuevas tecnologías de manufactura aditiva, permiten el diseño de nuevos modelos geométricos de ingeniería que las técnicas de manufactura habituales no permiten, debido a su complejidad. Al utilizar un material de poliuretano termoplástico e implementar varias estructuras internas diferentes, se puede llegar a un funcionamiento parecido a un resorte, el cual almacena energía para luego disiparla en el medio; la estructura interna cúbica fue la que mayor cantidad de energía absorbe de las demás y se puede observar con las simulaciones de ANSYS las zonas de inflexión.

La clasificación de los tipos de rotura se presentan en todo tipo de materiales; para el caso de los polímeros evaluados poseen una fractura dúctil, en los análisis realizados anteriormente, ocurren fracturas en su mayoría por formación de micro vacíos, orientados en dirección del desgarre; adicionalmente, la fractura por deformación superficial, en la cual, las dos superficies desgarradas se deslizan una sobre la otra a causa de la presión, dando como resultado una superficie relativamente lisa, dependiendo de la estructura interna analizada.

Con respecto al material textil, se tuvo en cuenta dos características básicas; que sea lo suficientemente fuerte con el fin de soportar el impacto inicial y posteriormente proteja el material termoplástico de abrasión, al rozar con el pavimento, y de igual manera, que sea liviano con el fin de permitirle al usuario la libertad de movimientos y comodidad en el deporte.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por la Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada bajo el contrato ING 3123 con validez 2020-2021.

#### REFERENCIAS

- [1] Cada día muere un ciclista en Colombia, según Medicina Legal. Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/cada-dia-muere-un-ciclista-en-colombia-segun-medicina-legal-articulo-874556>
- [2] Sigue aumentando el índice por muertos en las vías. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/bogota/por-que-estan-aumentando-las-muertes-de-ciclistas-en-bogota-327718>
- [3] B. Liu, B. Zhang, X. Wang, X. Chen, G. Gu, “The preparation and properties of polyimide films modified by octa(aminopropylsilsequioxane)”, *Journal of Saudi Chemical Society*, Vol. 23, Issue 7, 2019, pp. 856-863, ISSN 1319 6103, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2019.02.002>
- [4] L. McKeen, S. Plastics, Editor(s): L. McKeen, “The Effect of Sterilization on Plastics and Elastomers (Third Edition)”, *In Plastics Design Library*, William Andrew Publishing, 2012, pp 85-132, ISBN 9781455725984, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-2598-4.00004-6>
- [5] M. Biron, Editor(s): Michel Biron, “The Plastics Industry: Economic Overview”, *Thermoplastics and Thermoplastic Composites (Second*

- Edition*), In *Plastics Design Library*, William Andrew Publishing, 2013, pp. 31-131, ISBN 9781455778980
- [6] A.S. de León, A. Domínguez-Calvo, S.I. Molina, "Materials with enhanced adhesive properties based on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)/thermoplastic polyurethane (TPU) blends for fused filament fabrication (FFF)", *Materials & Design*, Vol. 182, 2019, 108044, ISSN 0264-8275, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108044>
- [7] A. Hamidi, Y. Tadesse, "Single step 3D printing of bioinspired structures via metal reinforced thermoplastic and highly stretchable elastomer", *Composite Structures*, Vol. 210, 2019, pp. 250-261, ISSN 0263-8223, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.019>
- [8] A. D. Valino, J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, J. Messman, R. C. Advincula, "Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites", *Progress in Polymer Science*, Vol. 98, 2019, 101162, ISSN 0079-6700, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.101162>
- [9] Nurul Fazita, M. R., Abdul Khalil, H. P. S., Nor Amira Izzati, A., & Rizal, S. (2019). *Effects of strain rate on failure mechanisms and energy absorption in polymer composites. Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 51-78. DOI:10.1016/b978-0-08-102293-1.00003-6
- [10] Thomas R. Kiefhaber, "Closed tendon injuries in the hand", *Operative Techniques in Sports Medicine*, Vol. 4, Issue 4, 1996, pp. 227-241, ISSN 1060-1872
- [11] S. H.J. Andrews, J. B. Rattner, N. G. Shrive, J. L. Ronsky, "Swelling significantly affects the material properties of the menisci in compression", *Journal of Biomechanics*, Vol. 48, Issue 8, 2015, pp. 1485-1489
- [12] M. Freutel, N.B. Scholz, A.M. Seitz, A. Ignatius, L. Dürselen, "Mechanical properties and morphological analysis of the transitional zone between meniscal body and ligamentous meniscal attachments", *Journal of Biomechanics*, Vol. 48, Issue 8, 2015, pp. 1350-1355
- [13] J. McCann, Editor(s): R.A. Chapman, Editor(s): R.A. Chapman, "Smart protective textiles for older people", *Smart Textiles for Protection*, Woodhead Publishing, 2013, pp. 244-275, ISBN 9780857090560.
- [14] J. McCann, Editor(s): R.A. Chapman, In Woodhead Publishing Series in Textiles, "Smart protective textiles for older people", *Smart Textiles for Protection*, Woodhead Publishing, 2013, Pages 244-275, ISBN 9780857090560
- [15] S. Mondal, Editor(s): N. Pan, G. Sun, In Woodhead Publishing Series in Textiles, "Thermo-regulating textiles with phase-change materials, Functional Textiles for Improved Performance, Protection and Health", *Woodhead Publishing*, 2011, pp. 163-183, ISBN 9781845697235.
- [16] A. Yu, K.L. Yick, "Compressive and stretch fit garments", Elsevier LTDA, 2018
- [17] T. Sonsalla, A. L. Moore, A. D. Radadia, L. Weiss, "Printer orientation effects and performance of novel 3-D printable acrylonitrile butadiene styrene (ABS) composite filaments for thermal enhancement", *Polymer Testing*, Vol. 80, 2019, 106125, ISSN 0142-9418.
- [18] R. Goutham, T.R. Veena, Babagowda, K.R. Srinivasa Prasad, "Study on mechanical properties of recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) blended with virgin Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) using Taguchi method", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, Issue 11, Part 3, 2018, pp. 24836-24845, ISSN 2214-7853.
- [19] S. Akbari, A. H. Sakhaei, S. Panjwani, K. Kowsari, A. Serjouei, Qi Ge, "Multimaterial 3D Printed Soft Actuators Powered by Shape Memory Alloy Wires", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 290, 2019, pp. 177-189, ISSN 0924-4247
- [20] S. R. G. Bates, I. R. Farrow, & Trask, R. S. *3D printed* "Polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption", *Materials & Design*, 112, 172-183, 2016. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.062
- [21] Y. Liu, H. Wang, W. Zhao, M. Zhang, H. Qin, & Y. Xie, "Flexible, Stretchable Sensors for Wearable Health Monitoring: Sensing Mechanisms, Materials, Fabrication Strategies and Features", *Sensors*, 18(2), 645, 2018. DOI:10.3390/s18020645
- [22] F. Naddeo, A. Naddeo, N. Cappetti, Novel "load adaptive algorithm based" procedure for 3D printing of lattice-based components showing parametric curved micro-beams, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 115, 2017, pp. 51-59, ISSN 1359-8368
- [23] C. Wang, A. Roy, Z. Chen, & Silberschmidt, V. V., "Braided textile composites for sports protection: Energy absorption and delamination in impact modelling", *Materials & Design*, 136, 258-269, 2017. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.006
- [24] Nasim, M., Brasca, M., Khosroshahi, S. F., & Galvanetto, U. (2017). "Understanding the impact properties of polymeric sandwich structures used for motorcyclists' back protectors". *Polymer Testing*, 61, pp. 249-257, 2017. Doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.05.025
- [25] M. R. Nurul Fazita, H. P. S. Abdul Khalil, A. Nor Amira Izzati, & S. "Rizal, Effects of strain rate on failure mechanisms and energy absorption in polymer composites", *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 2019
- [26] A. Hernández, H. & E. Mora, "Mecánica de fractura y análisis de falla", *Universidad Nacional de Colombia*, Bogotá, Colección Sede (8), 2002
- [27] V. Harshitha, S. Srinivasa Rao, "Design and analysis of ISO standard bolt and nut in FDM 3D printer using PLA and ABS materials", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 19, Part 2, 2019, pp. 583-588, ISSN 2214-7853
- [28] P. M.C. Carneiro, P. V. Gamboa, C. Baudín, A. P. Silva, "Modelling of elastic modulus of a biphasic ceramic microstructure using 3D representative volume elements", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 40, Issue 3, 2020, pp. 901-910, ISSN 0955-2219
- [29] S. Abhishek, M. K. Yashwant, S. Agrawal, "Computed tomography-based 3D modeling and analysis of human knee joint", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, Issue 11, Part 3, 2018, pp. 24194-24201, ISSN 2214-7853
- [30] Tips to improve mechanical properties. Disponible en: <https://www.rtpcompany.com/technical-info/molding-guidelines/tips-to-improve-mechanical-properties/>
- [31] Polymers for 3D printing and Customized additive manufacturing. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5553103/>



**Sara Alejandra Hernández Reina** is Mechatronics engineer of the Universidad Militar Nueva Granada. She is a part of the investigation in VOLTA group and works on themes like analysis of materials and fuel cells.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9435-3960>.



**Álvaro Nicolas Casas Quintero** is is Mechatronics engineer of the Universidad Militar Nueva Granada. He is a part of the investigation in VOLTA group and works on themes like analysis of materials and fuel cells.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1697-3574>.



**Willian Aperador Chaparro**, has a PhD. in Engineering, he is titular professor on Mechatronic Engineering Program at Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9006-0020>.