

## FIBRAS POLIMÉRICAS DE ALTA RESISTENCIA, UTILIZADAS EN LA FABRICACIÓN DE CASCOS Y CHALECOS DE PROTECCIÓN BALÍSTICA

**Fecha de recepción:** 28 de diciembre de 2022

**Fecha de aceptación:** 28 de febrero de 2023

Dr. Aquiles Sepúlveda Osses<sup>1</sup>  
Instituto de Investigaciones y Control  
Ejército de Chile

**Resumen:** *el presente artículo consiste en una revisión bibliográfica cuyo propósito es presentar aspectos básicos, en términos de estructura molecular y propiedades, de las fibras poliméricas de alta resistencia, fundadas en para-aramida (como el Kevlar®) y en polietileno de ultra alto peso molecular (ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE). Esas fibras se emplean en la fabricación de elementos de protección balística personal, particularmente cascos y chalecos; dichas aplicaciones se abordarán en un próximo artículo. Como referencia, se han adoptado los desarrollos realizados por el Ejército de EE.UU. respecto de estos elementos de protección. La información que se expone se relaciona estrechamente con fibras incorporadas en cascos y chalecos en uso, o en potencial uso, por parte del Ejército de Chile. Es de señalar que, a requerimiento institucional, el Instituto de Investigaciones y Control (IDIC), mediante su Laboratorio de Resistencia Balística, realiza el control de calidad de tales artículos; también tiene la responsabilidad legal de controlar los chalecos antibalas para seguridad privada.*

**Palabras clave:** *fibras, protección, balística, aramida, UHMWPE.*

## HIGH-RESISTANCE POLYMERIC FIBERS, USED IN THE MANUFACTURE OF HELMET AND BALLISTIC PROTECTION VESTS

**Abstract:** *this article consists of a bibliographical review whose purpose is to present basic aspects, in terms of molecular structure and properties, of high-resistance polymeric fibers, founded on para-aramid (such as Kevlar®) and ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). Those fibers are used in the manufacture of personal ballistic protection elements, particularly helmets and vests; the said applications will be covered in a next article. The developments made by the US Army regarding these elements of protection have been adopted as a reference. The information presented is closely related to fibers incorporated into helmets and vests in use, or in potential use, by the Chilean Army. It should be noted that, at institutional requirement, the Institute for Research and Control (IDIC), through its Ballistic Resistance Laboratory, performs the quality control of such elements; it also performs, by legal provision, the control of bulletproof vests for private security.*

**Key Words:** *fibers, protection, ballistics, aramide, UHMWPE.*

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil Mecánico por la Universidad de Chile y Doctor-Ingeniero en Metalurgia por la Universidad de París VI, Francia. Actualmente se desempeña como Asesor de Investigación e Ingeniería del Instituto de Investigaciones y Control (IDIC), y Profesor de la Academia Politécnica Militar y de la Universidad de Chile. [aquiles.sepulveda@idic.cl](mailto:aquiles.sepulveda@idic.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

En todas las edades, ha sido fundamental la protección de las distintas partes del cuerpo de personal participante en enfrentamientos, ya sean soldados o integrantes de las fuerzas de orden y seguridad, frente a diferentes amenazas específicas. Dichas partes corresponden a torso y cráneo, usualmente consideradas como primordiales a proteger, más zonas del cuello y de la pelvis, rostro y extremidades. El nivel de resguardo requerido debe ser compatible con que el sujeto protegido mantenga, a un buen nivel, su capacidad de ver, escuchar y comunicarse; lo anterior a costos razonables y bajo condiciones que permitan un accionar aceptablemente confortable, habida cuenta del medioambiente correspondiente. La satisfacción de tales características, dependen de las condiciones físicas humanas, y de los materiales y tecnologías disponibles en cada época. Cabe destacar que lo expuesto, con el agregado del armamento, satisfacen los tres parámetros claves de la supervivencia de un sistema de armas, en este caso, de un combatiente individual apropiadamente equipado: movilidad, protección y potencia de fuego.

Desde la Antigüedad, se emplearon corazas y cascos para proteger el torso y cráneo de los implicados en los enfrentamientos armados. Así, en la antigua Grecia y en la antigua China, estos implementos se fabricaron de cuero y metal, contra armas blancas, flechas y golpes. Más tarde, tanto en China como en Japón, se emplearon camisetas de varias capas de textiles de seda, para evitar la penetración de la flecha en el cuerpo; este uso temprano de fibras, en este caso, las de seda, facilitaba tanto el retiro del proyectil que había impactado y que fuera impedido de penetrar por el textil, como el tratamiento médico posterior. Al arribo de la pólvora, el nivel de amenaza aumentó significativamente; sin embargo, nótese que aún en las guerras del siglo XIX, como en la guerra de Secesión de EE.UU., las tropas no contaban con resguardo personal, salvo por excepción, debido a la carencia de materiales y de procesos de fabricación adecuados, compatibles con costo, peso y capacidad de protección. Llegado el siglo XX, particularmente en la Primera y Segunda Guerra Mundial, se emplearon cascos de acero, generalizadamente, y también chalecos, estos últimos especialmente para tripulantes de aeronaves, combinando textiles tradicionales y Nylon® con planchas de acero; el propósito era brindar protección contra balas de rebote, y fragmentos de artillería y granadas. Tales implementos resultaban bastante incómodos por su peso, retención de calor y mal ajuste; además, particularmente, los cascos dificultaban el uso de equipos de telecomunicaciones. Así, en la guerra de Vietnam, por ejemplo, era usual que los soldados norteamericanos que ingresaban a la selva tropical, no usasen sus cascos ni sus chalecos, basados estos últimos en las tecnologías recién mencionadas, en razón especialmente de las adversas condiciones de temperatura y humedad ambientales; lo anterior generó un alto número de bajas que se habría podido limitar con el empleo de los referidos elementos de resguardo personal.

En la primera mitad del S. XX, se inició el desarrollo de los materiales denominados polímeros sintéticos o plásticos, muchos de ellos constituidos por moléculas largas, con la característica común de relativamente baja densidad, interesantes propiedades mecánicas y resistencia a varios medios corrosivos; así, por ejemplo, aparecieron el poliéster y el nailon (una poliamida). Las fibras de Nylon®, producidas por Dupont (EUA), fueron fundamentales durante la Segunda Guerra Mundial, para la fabricación de cuerdas y paracaídas. Pero, la resistencia mecánica de estos primeros polímeros resultaba insuficiente para su aplicación eficiente respecto de la protección balística personal, aunque con Nylon® sí se elaboraron algunos elementos con tal propósito, especialmente para tripulantes de aeronaves.

En tal marco, durante la década de 1960, investigadores de Dupont descubrieron nuevas moléculas poliméricas, esta vez basadas en aramidas, con las que se fabricaron fibras empleando una tecnología de extrusión (*spinning*, en inglés), similar a la antes utilizada para el Nylon®, ver figura 1. Entre ellas, se cuenta el producto comercializado como Kevlar®, el que corresponde químicamente a una molécula de para-aramida. En el subpunto 2.2 se explican las denominaciones químicas de aramida y para-aramida. Estas fibras se caracterizan por presentar, junto a una baja densidad, una alta resistencia, tanto mecánica como a varios medios corrosivos, y una buena resistencia al fuego. Más tarde, otras empresas desarrollaron productos similares al Kevlar®, también bajo marcas registradas, tales como Twaron® (Teijin, Países Bajos) y Tapan® (Yayho, China).

Un tipo diferente de fibra sintética relevante aplicada para protección balística es el polietileno de ultra alto peso molecular, frecuentemente aludido como UHMWPE, acrónimo de su denominación en inglés *Ultra-High Molecular Weight Polyethylene*. El polietileno (PE) es el material con el cual se fabrican productos habituales, como bolsas para la basura y para compras en el supermercado; sin embargo, para dar lugar a fibras con aplicaciones balísticas, se aplican sofisticados y costosos procesos, los que incluyen el antes referido *spinning* y material polimérico de alta pureza. De esta manera, en las fibras de UHMWPE se logra un ordenamiento especial de moléculas muy largas y, en consecuencia, particularmente propiedades mecánicas superiores acompañadas de una baja densidad. Este material fue descubierto en 1963 en los laboratorios de DMS (Países Bajos); casi veinte años después fueron comercializadas fibras de UHMWPE, tales como Dyneema® (DSM) y Spectra® (Honeywell, antes Sigma, EE.UU.). Para estas aplicaciones, el UHMWPE frecuentemente se emplea en combinación con capas de otros materiales (incluyendo para-aramidas) que aporten una mayor rigidez al conjunto.

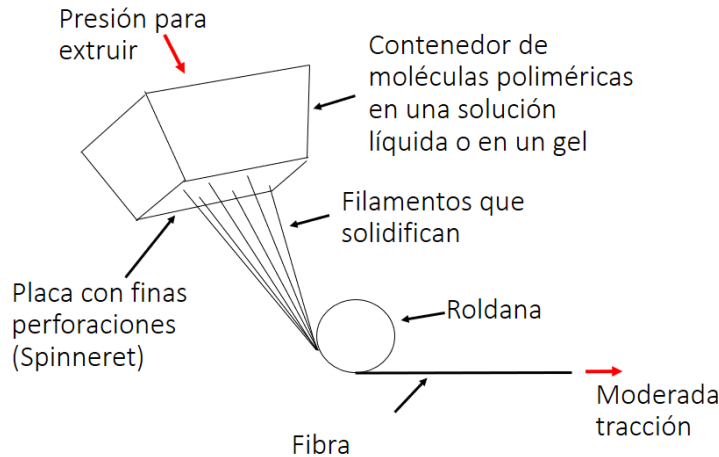


Figura N° 1: Esquema del proceso de fabricación de una fibra, a partir de moléculas poliméricas en una solución líquida o gel; ellas son empujadas para que pasen por centenares de perforaciones de una placa. A la salida de la placa, se tienen múltiples filamentos sólidos que conformarán una fibra. (Elaboración propia).

Para lo antes expuesto en el punto 1, se pueden consultar, por ejemplo, las siguientes referencias: Abtew (2019), Kulkarni (2013), Zheng (2016), Scott (2009) y Dupont (2017).

Algunas precisiones de interés son las siguientes (Abtew (2019), Dupont (2017) y Li (2022)):

- a) Para cada marca registrada, tanto de aramida como de UHMWPE, existen varios grados de la fibra respectiva, orientados a aplicaciones más específicas, por sus diferentes propiedades. Por ejemplo, el Ejército de EE.UU. hizo fabricar sus primeros cascos de fibras con Kevlar K49® y, más tarde, otros con Kevlar K129®.
- b) Para la fabricación de cascos y chalecos, las referidas fibras se emplean en forma de láminas delgadas y con algo de flexibilidad, para permitir la adaptación a una forma final no plana; se ha de disponer varias láminas, superponiéndolas y, en ciertas aplicaciones, uniéndolas mediante pegamentos apropiados. En el caso de la para-aramida, tales láminas se forman en telares, como tejidos de fibras. Por otra parte, en el caso de las fibras de UHMWPE, por la mayor tendencia de estas a resbalar entre sí, se fabrican láminas ubicando paralelamente las fibras, en una sola capa, y uniendo las fibras de una capa mediante pegamentos; normalmente, se apilan varias láminas, disponiéndolas alternadamente, según la dirección de sus fibras (por ejemplo, a 0 y 90°).
- c) Las láminas de fibras también se utilizan para resguardar vehículos, donde se requiere protección y bajo peso: vehículos terrestres de transporte de personal, helicópteros, embarcaciones livianas, etc.

El presente artículo consiste en una revisión bibliográfica cuyo propósito es presentar aspectos básicos, en términos de estructura molecular y propiedades, de las fibras poliméricas de alta resistencia, basadas en para-aramida y polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE). Estas fibras se emplean en la fabricación de elementos de protección balística personal, particularmente cascos y chalecos. Aquí se ha adoptado como referencia los desarrollos realizados por el Ejército de EUA. respecto de estos artículos de protección. La información que se expone se relaciona estrechamente con fibras de alta resistencia incorporadas en cascos y chalecos en uso, o en potencial uso, por parte del Ejército de Chile, figura N° 2. Será motivo de publicaciones posteriores lo tocante a las aplicaciones de las citadas fibras en cascos y chalecos balísticos, empleando fibras incluso integradas a un material compuesto, junto con resinas poliméricas y placas cerámicas.

Es de señalar que, a requerimiento institucional, el Instituto de Investigaciones y Control (IDIC), mediante su Laboratorio de Resistencia Balística, controla la calidad de cascos y chalecos de protección balística a ser empleados por el personal del Ejército de Chile. También lo hace para el sector de seguridad civil, en relación con chalecos antibalas, según lo dispuesto por el Decreto N° 867, Ministerio del Interior y Seguridad Pública (2018).



Figura N° 2: Casco y chaleco fabricados con fibras poliméricas de alta resistencia, en servicio en el Ejército de Chile. El chaleco incluye, en su interior, placas de compuestos cerámicos. (Laboratorio de Resistencia Balística, IDIC).

## **2. FIBRAS DE PARA-ARAMIDA Y DE UHMWPE**

### **2.1 Consideraciones básicas de estructura, procesos y propiedades de materiales**

Las propiedades de un material, por ejemplo, mecánicas, térmicas o eléctricas, corresponden a las respuestas del primero ante la aplicación de estímulos externos, tales como fuerza, calor o campo eléctrico, respectivamente. En seguida, las propiedades de ese material dependen de su estructura, la que se asocia al tipo de átomos presentes (composición) y a cómo ellos están ubicados espacialmente, mediante los enlaces correspondientes. De manera que las propiedades dependen no solo del tipo de átomos presentes, sino que también de cómo estos se ordenan a diversas escalas (atómica, macroscópica, etc.); tal orden no es necesariamente perfecto, de modo que han de considerarse distintos grados de desorden y combinaciones de distintas formas de orden, e incluso la presencia de defectos. En lo que sigue, el análisis se limitará a materia sólida.

A modo ilustrativo, considérese el grafito y el diamante, dos materiales que exhiben propiedades muy diferentes, aunque ambos están constituidos por átomos de carbono; pues bien, la diferencia entre las propiedades de uno y otro de estos materiales se debe a la diferencia en los tipos de enlaces interatómicos presentes y en el ordenamiento espacial de estos átomos. Un tercer factor a considerar, además de la estructura y las propiedades, es el proceso de formación o de síntesis del sólido; en el caso de materiales naturales, este correspondería a las condiciones geológicas que llevaron a la formación de, por ejemplo, una roca de granito, en tanto que cuando se trate de materiales generados con la intervención de un ser humano, estos consistirán en los procedimientos de laboratorio o industriales involucrados. Para una composición dada, dichos procesos afectan la estructura (orden atómico) y, por tanto, las propiedades; justamente, esta es la trilogía básica de la Ciencia de los Materiales, dada por la interrelación de los factores estructura, procesos y propiedades de los materiales.

Para efectos del presente artículo, como ya se indicó, los materiales bajo estudio son las fibras de moléculas poliméricas largas de para-aramida y de UHMWPE, en la perspectiva de la fabricación de elementos de protección balística. En lo que resta de este punto 2 se exponen, primero, las características estructurales esenciales de los citados tipos de moléculas, en seguida, los principios básicos de cómo, para cada uno de ellas, se fabrican fibras de alta resistencia, finalmente, se hace referencia a algunas propiedades relevantes de estas fibras.

Se precisa que no se abordará la síntesis química de las moléculas de polietileno y de para-aramida, lo cual se entiende que se realiza según los principios y procedimientos propios de la química de polímeros.

## 2.2 Estructura química de las moléculas individuales

Una molécula polimérica se puede describir como una cadena (secuencia lineal) de numerosísimos eslabones atómicos idénticos, denominados meros. A la molécula de polietileno corresponde el mero más sencillo,  $C_2H_4$ , ver figura 3. Dicha molécula, de fórmula  $(C_2H_4)_n$ , presenta un diámetro de unos pocos átomos y, típicamente, miles de átomos de longitud; en la anterior fórmula, el subíndice  $n$  representa un número entero muy grande. Cabe destacar que en el material polietileno corriente (usual), las moléculas pueden presentar una importante curvatura y flexibilidad, lo cual se explica porque los enlaces covalentes simples entre pares de átomos de carbono, C-C, admiten una rotación en torno al eje del respectivo enlace. De hecho, el polietileno usual, como aquel de las bolsas para la basura, presenta regiones con moléculas curvas y desordenadas, y otras con moléculas rectas y ordenadas paralelamente. En oposición al caso anterior, dos características esenciales de las moléculas de UHMWPE en fibras, (Li (2022), Scott (2005) y van der Werff (2016)), son que:

1. Dado su extremadamente alto peso molecular (promedio), la longitud de estas moléculas es unas 10 veces mayor que la del polietileno corriente.
2. Debido al especial procedimiento de fabricación de una fibra de este material, las numerosas moléculas de UHMWPE que integran una fibra están alineadas según la dirección de la misma.

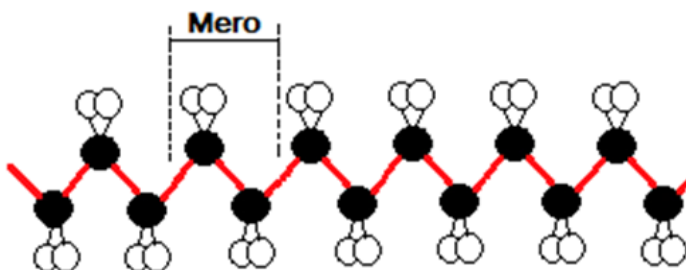


Figura N° 3: Molécula del polietileno de fórmula  $(C_2H_4)_n$ , donde se ha destacado el mero correspondiente,  $(C_2H_4)$ . En la figura, las esferas negras representan átomos de C y las blancas átomos de H. Las barras negras y rojas corresponden a enlaces covalentes simples. Como la molécula es tridimensional, se ha de entender que los átomos de C están en el plano del papel, en tanto que, para cada pareja de átomos de H, uno de esos átomos está bajo el papel y el otro sobre el papel. (Elaboración propia).

Por otra parte, en la figura N° 4 se muestra la estructura química del mero que integra una molécula de para-aramida, indicando los grupos aromáticos y amidas presentes; dada la presencia de estos grupos, para referirse estructuralmente al Kevlar® y sus similares, usualmente se emplea la denominación genérica aramida, resultante de la contracción de los vocablos aromático y amida. Cada hexágono allí ilustrado representa a un anillo de benceno, con átomos de carbono en los vértices del hexágono, y con enlaces covalentes simples y

dobles entre carbonos, en resonancia. Dado que los grupos amida se unen al hexágono del benceno en vértices opuestos de tal figura, este caso corresponde más precisamente a una para-aramida. Una molécula de para-aramida, en atención a la distribución espacial de sus enlaces internos covalentes, se mantiene básicamente recta; ello a diferencia de, como ya se mencionó, el caso de una molécula de polietileno, la que sí es posible que presente curvatura.

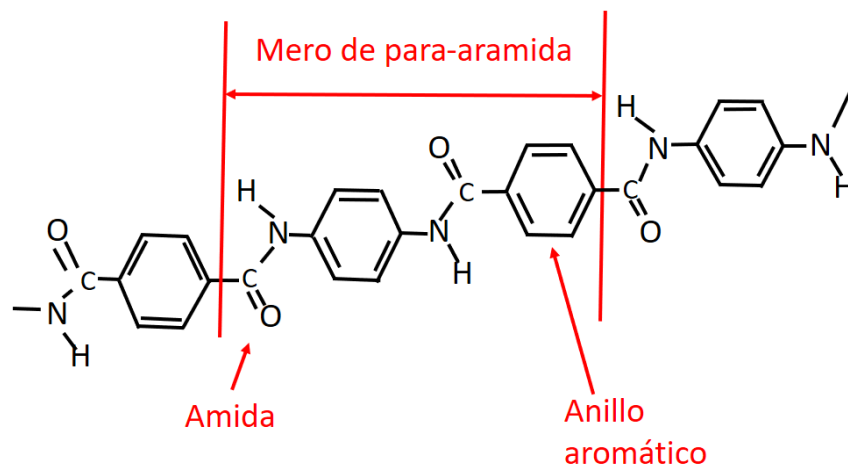
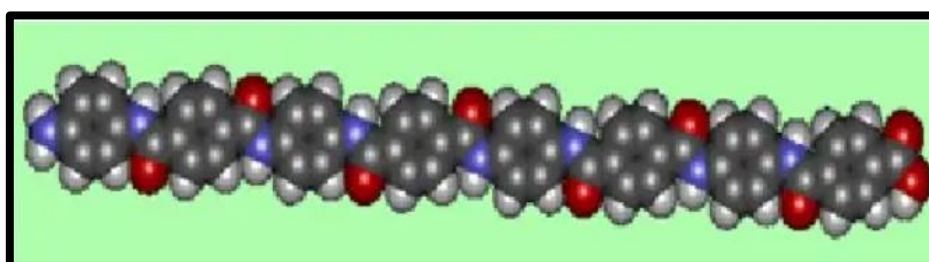


Figura N° 4: El mero de una molécula larga de para-aramida. Los segmentos en negro representan los enlaces covalentes dentro de la molécula. (Adaptada de una figura de Hakoo (2018)).



Código de colores para los tipos de átomos:	
Azul:	Nitrógeno
Rojo:	Oxígeno
Gris:	Hidrógeno
Negro:	Carbono

Figura N° 5: Representación tridimensional de la molécula polimérica del Kevlar®, ilustrando a los átomos como esferas coloreadas. (Reproducción autorizada, desde Kabir (2013)), por la revista International Journal of Textile Science.

### 2.3 Enlaces entre las moléculas largas dispuestas en fibras de alta resistencia

En un material polimérico de moléculas largas de para-aramida o UHMWPE, se distingue entre los enlaces presentes al interior de cada molécula (enlaces intramoleculares), los que son enlaces fuertes de tipo covalente, como los ya abordados en el subpunto 2.2, respecto de



los enlaces que unen una molécula con otra (enlaces intermoleculares), más débiles que los anteriores. A continuación, se tratarán estos últimos.

Al estar cercana una molécula a otra, ellas pueden unirse entre sí mediante un enlace secundario o molecular, consistente en un dipolo eléctrico: siendo cada molécula eléctricamente neutra, la parte positiva de una de ellas se une electrostáticamente con la parte negativa de la otra. Desde una perspectiva química, en atención a que las moléculas de para-aramidas son polares, el enlace secundario allí presente corresponde a dipolos permanentes, estrictamente de puente hidrógeno; por otra parte, dado que el polietileno es una molécula apolar, el enlace intermolecular es del tipo dipolo fluctuante, también denominado inducido o instantáneo, siendo este tipo de enlace más débil que aquel de puente hidrógeno.

Cada uno de estos dos tipos de enlace de dipolo es relativamente débil respecto de la intensidad de cada uno de los enlaces covalente intramoleculares; sin embargo, cuando dos moléculas largas exhiben varios puntos de contacto, esto es, varios dipolos de enlace individuales establecidos, entonces el enlace total entre ellas se hará más fuerte. En particular, cuando dos moléculas vecinas son rectas y paralelas, se incrementa la intensidad del enlace total entre ellas; este incremento es aún mayor cuando la longitud de las moléculas es mayor. Tanto las moléculas de para-aramida como las de UHMWPE, por el método de fabricación de las fibras de alta resistencia basadas en ellas, ver punto siguiente, se presentan, mayoritariamente, como moléculas rectas y paralelas, orientadas a lo largo de las fibras respectivas, lo que se expone más adelante bajo el título 2.4.1; lo señalado, sumado a características específicas de estas moléculas, se relaciona estrechamente con las propiedades mecánicas superiores de estas fibras respecto de aquellas basadas en otros polímeros.

## **2.4 Fabricación de fibras**

En lo que sigue, se expone esquemáticamente el procedimiento para fabricar fibras continuas (esto es, muy largas) de para-aramida y de UHMWPE, a partir de las correspondientes moléculas poliméricas; para ello se requiere una alta tecnología, procedimientos sofisticados, y costosas y complejas instalaciones. Como ya se indicó, los procesos de fabricación de un material afectan la microestructura y, por tanto, las propiedades de este. Después de la obtención de las fibras, procesos complementarios permitirán la elaboración de productos, ya sea intermedios o finales, tales como tejidos textiles, láminas de fibras paralelas embebidas en una resina polimérica, cuerdas, etc.

### **2.4.1 Fabricación de fibras de para-aramida**

Para la fabricación de las fibras de Kevlar®, a partir de moléculas de para-aramida, según la referencia Dupont (2017), se aplica un proceso con muchas similitudes con aquel

previamente empleado en Dupont para formar las fibras de Nylon®, también un polímero de moléculas largas. Cabe indicar que varias de las superiores propiedades del Kevlar®, respecto de aquellas del nailon, tienen su origen en que, desde la perspectiva de su orden atómico interno, en el primer caso las moléculas son rectas en tanto que en el segundo pueden ser curvas.

En el referido proceso, las moléculas rectas de para-aramida disueltas en una solución líquida, inicialmente orientadas al azar, se someten a una etapa de extrusión (*spinning*, en inglés). En esta extrusión, el referido fluido es forzado a pasar por hasta centenas de orificios dispuestos en una placa, ver figura 1; ellos presentan un diámetro microscópico, por lo que se reduce drásticamente la sección transversal del fluido, similarmente a lo que ocurre con el agua al pasar por la regadera de una ducha. Como resultado de lo anterior, las moléculas tienden a ordenarse en la dirección del flujo, ver figura 6; a la salida, el material es enfriado y limpiado. Posterior a la extrusión, las fibras son sometidas a distintos grados de estirado en frío (*drawing*) para incrementar el ordenamiento paralelo de las fibras. Así, se obtienen fibras con sus moléculas dispuestas mayoritariamente en la dirección de las primeras, ver figura 7. Estas fibras pueden tener kilómetros de longitud; en tal caso, ellas pueden ser enrolladas, por ejemplo, en un huso.

Ya en la fibra, la unión lateral entre moléculas rectas y ahora predominantemente paralelas, se distribuye a lo largo de estas. Esa unión intermolecular se hace mediante numerosísimos enlaces de puente de hidrógeno, una forma de dipolo permanente, ver figura 8; este tipo de unión es significativamente más intensa que aquella que presentan moléculas de mayor curvatura, como las de nailon. En el más numeroso y, por ende, más intenso enlace intermolecular lateral a lo largo de las moléculas, reside la explicación básica del superior comportamiento mecánico y resistencia a la inflamación de las fibras de Kevlar®, respecto de aquellas de Nylon®.

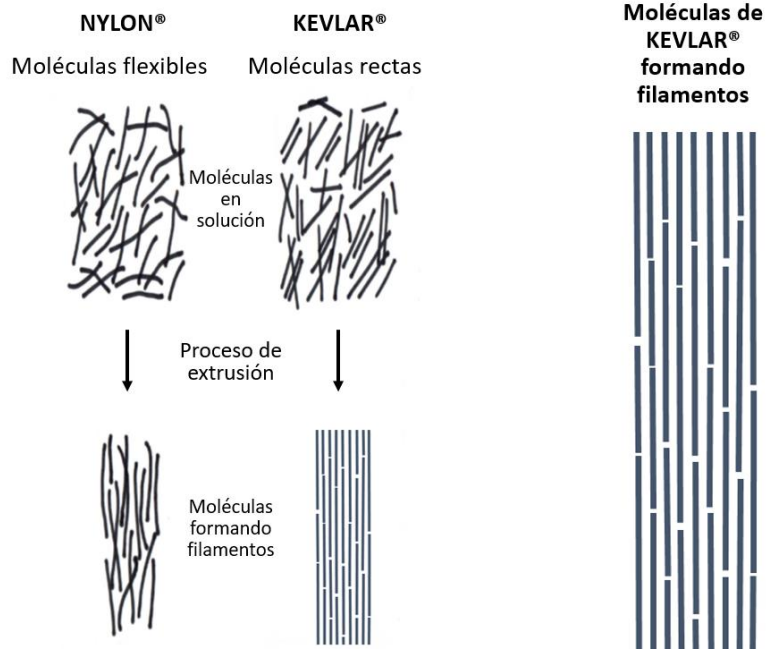


Figura N° 6

Figura N° 7

Figura N° 6: Esquema del efecto del proceso de extrusión sobre la orientación de las moléculas largas de Kevlar® (para-aramida) y de Nylon® (una poliamida) en fibras producida por extrusión. En el caso de las fibras de Kevlar®, dado que estas son rectas, su grado de paralelismo, aunque no total, es mayor que en el caso de las moléculas de Nylon®. (Adaptada de una figura de Dupont (2017)).

Figura N° 7: El esquema ilustra que, en una fibra de para-aramida, como el Kevlar®, con las moléculas rectas y alineadas, se tiene una gran longitud de contacto entre moléculas vecinas. Esto permite que los enlaces intermoleculares totales sean más intensos, respecto de cuando las moléculas presentan curvatura. Cada molécula tiene unos pocos átomos de diámetro y miles de átomos de longitud. (Elaboración propia).

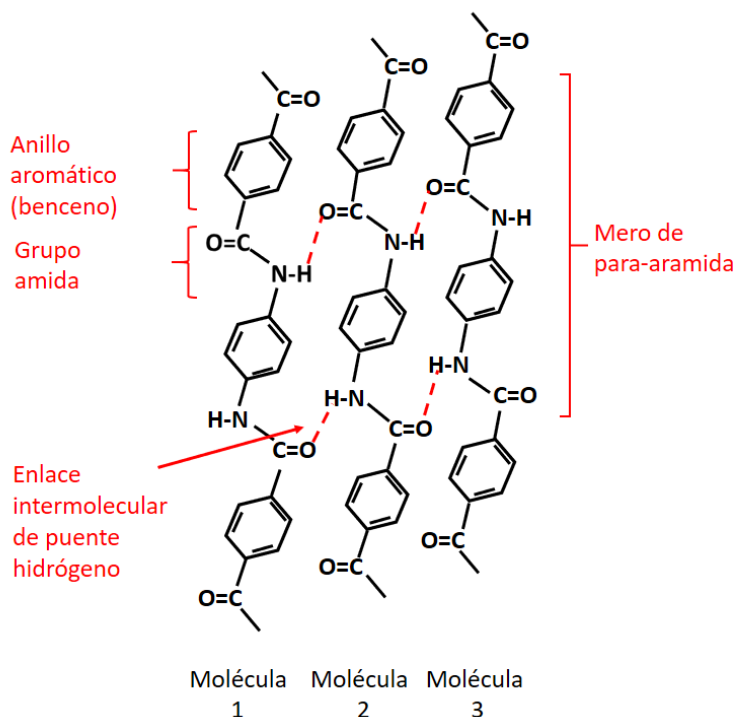


Figura N° 8: Ilustración de tres moléculas de para-aramida orientadas paralelamente según el eje vertical. Las líneas segmentadas representan los enlaces laterales intramoleculares de puente hidrógeno; por otra parte, todos los enlaces dentro de las moléculas son de tipo covalente. (Adaptada de una figura de Dupont (2017)).

#### 2.4.2 Fabricación de fibras de UHMWPE

El polietileno (PE) es uno de los polímeros sintéticos más ampliamente usados en nuestra sociedad, desde 1939. Para sus aplicaciones rutinarias, mediante la aplicación de variados procesos, estas moléculas dan lugar a diferentes tipos de materiales, tales como polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE); dichos tipos se emplean, por ejemplo, en bolsas de supermercado, botellas de bebidas, carcasas de electrodomésticos, etc., bajo formas geométricas usualmente macizas, diferentes de fibras. En todos estos casos, las moléculas largas del polietileno presentan zonas donde ellas aparecen rectas y paralelas, en tanto que, en otras zonas, ellas se exhiben curvatura y desorden; esto depende del proceso específico de fabricación y se relaciona con que dicha curvatura es permitida por los enlaces simples covalente C-C presentes a lo largo de las moléculas, ver figura 3, por rotación en torno al eje de ellos.

Por otra parte, las fibras del tipo de polietileno de nuestro presente interés, el UHMWPE (polietileno de ultra alto peso molecular), un material más reciente, presentan una estructura atómica y propiedades diferentes. Para la fabricación de este tipo de fibras, se aplica un

proceso específico para inducir un especial ordenamiento de moléculas extremadamente largas, con algunas similitudes respecto de aquel empleado para las de para-aramida, como el Kevlar®. Este material fue descubierto en la década del 60, en los laboratorios de DMS (Países Bajos); desarrollos posteriores permitieron, un par de décadas más tarde, su producción a escala industrial bajo marcas registradas como Dyneema® (DMS) y Spectra® (originalmente Allied Signal, hoy Honeywell).

Para la fabricación de estas fibras, las moléculas de UHMWPE se mantienen en suspensión en un solvente, conservando la integridad de estas últimas; después, se aplica un proceso de extrusión en caliente (*spinning*), con bastante similitud respecto de aquel aplicado para las fibras de nailon y aramida, ver figura 1. Con el paso forzado de la solución por los finos orificios presentes en la matriz de la extrusora (*spinneret*), se forman filamentos que, luego de ser enfriados y limpiados, conforman una fibra. En ella, las moléculas de polietileno tienden a adoptar la dirección de la fibra; sin embargo, estas aún conservan un grado de curvatura considerado demasiado elevado. En seguida, esas fibras se someten a un estiramiento mediante un proceso de trefilación (*drawing*); como resultado, las moléculas se estiran y, en su mayoría, se ordenan paralelamente según el eje de la fibra.

## 2.5 Propiedades de las fibras de para-aramida y de UHMWPE

En este punto, se presentan propiedades relevantes de las fibras de para-aramida y de UHMWPE, a saber: densidad, propiedades mecánicas, sensibilidad a la radiación ultravioleta (UV) y estabilidad térmica. Cabe precisar que el comportamiento de un casco o chaleco balístico de fibras, no solo depende de las propiedades de las fibras mismas que lo puedan componer, sino que también de otros factores, relacionados con el diseño y proceso de fabricación del artículo en referencia. Por ejemplo, al emplear fibras de para-aramida bajo forma de telas tejidas, han de considerarse factores tales como: trama textil de ese tejido, pegamento empleado entre las múltiples capas que se deben emplear, y corte de las telas para adaptarlas a la forma de la carcasa de un casco o de los senos femeninos en un chaleco.

Respecto de las propiedades mecánicas, son de gran importancia aquellas determinadas mediante un ensayo de tracción; de hecho, tales son las propiedades estimadas como básicas en la literatura especializada. De esta manera, dada la disposición de las fibras en los cascos de interés diseñados a la fecha, el efecto de un proyectil sobre ellas se puede asimilar, en una primera aproximación, al choque de una pelota sobre la malla de un arco de fútbol, especialmente para las primeras etapas del impacto; en tal caso, se visualiza que la principal carga sobre cada hilo de esa malla corresponde a esfuerzos de tracción. El efecto de un proyectil balístico sobre la carcasa de un casco de fibra es más complejo, debido, entre otros factores: cercanía entre sí de las fibras en cada tela; presencia de pegamentos entre las capas

de fibras; y curvatura que adoptan las fibras cuando el proyectil ha penetrado profundamente en un área estrecha.

El resultado directo de un ensayo de tracción es una curva esfuerzo ( $\sigma$ ) versus deformación ( $\varepsilon$ ) de la probeta considerada la que, en este caso, es una fibra del polímero que, en la zona de prueba, presenta un área inicial  $A_0$  y una longitud de inicial  $L_0$ . El esfuerzo  $\sigma$  y la deformación  $\varepsilon$  se definen, según una convención de ingeniería, como el cociente entre la fuerza  $F$  instantánea y  $A_0$ , con  $\sigma = F/A_0$ , y como el cociente entre el alargamiento  $\Delta L$  y  $L_0$ , con  $\varepsilon = \Delta L/L_0$ , respectivamente. En la figura 9 se muestra un esquema del tipo de curva  $\sigma$  versus  $\varepsilon$ , que se obtiene en tracción para las presentes fibras. La recta allí observada corresponde a un comportamiento elástico lineal; lo de elástico se refiere a que, al retirar la fuerza, el material recupera sus dimensiones iniciales, de modo que la deformación es reversible; en tanto que lo de lineal se relaciona con que la deformación,  $\varepsilon$ , es proporcional al esfuerzo aplicado,  $\sigma$ . La referida linealidad se cumple más estrictamente para las fibras de aramida que para las de UHMWPE, según resultados experimentales publicados (Wang (2012), Bencomo-Cisneros (2012) y van der Werff (2016)). Esa curva culmina en un punto final asociado a la falla por fractura, de coordenadas ( $\sigma_f$ ,  $\varepsilon_f$ ). De tal curva genérica se desprenden las siguientes propiedades:

- Módulo elástico o módulo de elasticidad,  $E$ : es una constante del material que expresa la relación lineal entre el esfuerzo,  $\sigma$ , y la deformación,  $\varepsilon$ , en el rango elástico, según  $\sigma = E \varepsilon$  (ley de Hooke). Así,  $E$  se asocia a la pendiente de la recta del gráfico  $\sigma$  vs  $\varepsilon$ . Mientras mayor sea el valor de  $E$ , mayor será la rigidez elástica del material, lo que es deseable en una aplicación de protección balística.
- Resistencia a la fractura,  $\sigma_f$ : es el esfuerzo con el cual el material falla por fractura, de manera que es el máximo esfuerzo que el material puede soportar.
- Deformación a la fractura,  $\varepsilon_f$ : es la deformación a la cual el material falla por fractura, de manera que es la máxima deformación que el material puede admitir bajo carga. Como toda deformación,  $\varepsilon_f$  es una magnitud adimensional; por ejemplo,  $\varepsilon_f = 0,04$  corresponde a un 4 % de deformación respecto de la longitud inicial,  $L_0$ .

Una característica importantísima y general de las fibras poliméricas es que su densidad,  $\rho$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ], es relativamente baja, en relación con aquella de materiales estructurales clásicos, como el acero. La densidad del Kevlar® y del UHMWE Dyneema® son cercanas a 1,44 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] y a 0,97 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ], respectivamente, Kulkarni (2013) y Li (2022); tales valores de densidad son bastante inferiores a la del acero, la que es cercana a 7,9 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]. Ahora bien, para el material de un casco destinado a resistir un esfuerzo dado se requiere que su resistencia a la tracción,  $\sigma_f$ , sea la mayor posible y, conjuntamente, que su densidad,  $\rho$ , sea la menor posible. La combinación de estas dos características se expresa mediante una propiedad denominada resistencia a la tracción específica,  $\sigma_{fesp}$ , definida como el cociente  $\sigma_{fesp} = \sigma_f/\rho$ . De modo que, para una aplicación como la mencionada, considerando las

propiedades  $\sigma_f$  y  $\rho$ , será preferible un material con elevado valor de  $\sigma_{fesp}$ . Para el propósito de comparar materiales entre sí, también resultará conveniente, para proporcionar una mayor rigidez al artículo a fabricar, que el módulo elástico específico, definido como  $E_{esp} = E/\rho$ , sea lo mayor posible.

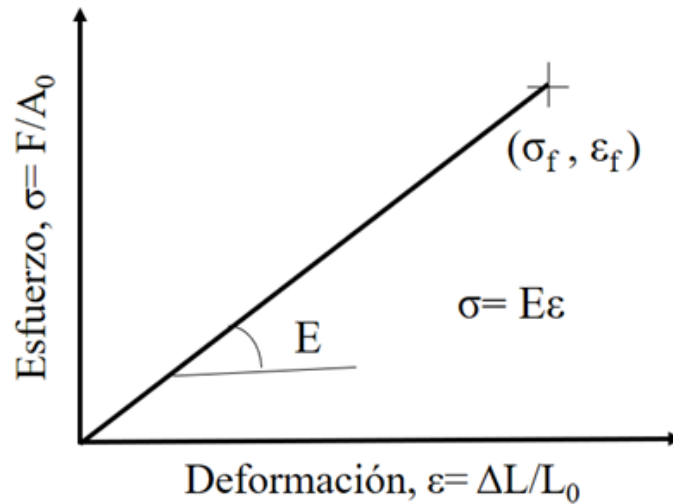


Figura N° 9: Esquema de la curva de tracción, esfuerzo versus deformación, de una fibra polimérica de alta resistencia. (Elaboración propia).

En la tabla N° 1 de la referencia Li (2022), se presentan valores de densidad y de propiedades mecánicas a la tracción de fibras de para-aramida y de UHMWPE; los datos allí publicados fueron recopilados de diferentes fuentes y van acompañados de cálculos originales. Del análisis de esa información se desprende que los valores de las propiedades específicas  $E_{esp}$  y  $\sigma_{fesp}$  son mayores (más favorables) para el UHMWPE que para la para-aramida. Tal comportamiento es un factor muy relevante para explicar porque los primeros cascos de fibras distribuidos en el Ejército de EUA, que incluyen fibras de aramida, como el PASGT (Personnel Armor System for Ground Troops, 1983) y el MICH (Modular Integrated Communications Helmet, 2001), hayan sido reemplazados por cascos que incluyen fibras de UHMWPE, como el FAST (Future Assault Shell Technology, 2009) y el ECH (Enhanced Combat Helmet, 2012), ver Li (2022). El casco PASGT reemplazó ventajosamente al casco M1, fabricado en acero Hadfield y usado desde la Segunda Guerra Mundial, Kulkarni (2013); en esta referencia también se encuentra una recapitulación de propiedades mecánicas en tracción de variadas fibras de alta resistencia.

Si bien las fibras de UHMWPE han mostrado, en los dos últimos decenios, una eficiencia balística superior respecto de la para-aramida, es importante destacar que aún hay situaciones en las cuales estas últimas son preferibles; por ejemplo, las aramidas muestran una bastante

mayor estabilidad térmica en un amplio rango de temperaturas, particularmente a temperaturas por sobre la del ambiente, ver Dyneema (2008), Dupont (2017) y Zheng (2016).

A una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, el Kevlar®, una para-aramida, se descompone (por descarbonización) a temperaturas superiores a 427 °C, sin fundirse, en presencia de aire, según información de Dupont (2017). Para el Kevlar® y otras fibras sintéticas, al aumentar la temperatura, disminuyen  $E$ ,  $\sigma_f$  y  $\epsilon_f$ ; esto debe considerarse cuando se emplea Kevlar® por sobre los 149 °C. Al disminuir la temperatura hasta -196 °C, el Kevlar® no presenta fragilidad o degradación. Además, este material es inherentemente resistente a las llamas; aunque puede ser quemado, frecuentemente la combustión cesa al retirar la fuente de ignición. Dependiendo de las condiciones de la combustión, se pueden generar pequeñas cantidades de gases tóxicos, como el cianuro de hidrógeno.

Para fabricar artículos con una resistencia mayor a altas temperaturas y llamas, cabe considerar las fibras de Nomex®, otro producto de Dupont, una meta-aramida; en ciertos casos, se aplican combinaciones de fibras de para-aramida y de meta-aramida. Las aplicaciones corresponden, por ejemplo, a artículos para bomberos y para pilotos de aviones de combate y de autos de Fórmula 1.

Por otra parte, las fibras de UHMWPE presentan una temperatura de fusión ubicada en el rango desde 144 °C a 152 °C y sus propiedades mecánicas disminuyen al aumentar la temperatura; por tales razones, en general, estas fibras no se emplean a temperaturas superiores a 80-100 °C por períodos prolongados, Tam (2016). Dicha baja temperatura de fusión se explica porque las moléculas poliméricas paralelas de estas fibras, están unidas entre sí por enlaces relativamente débiles, de dipolo eléctrico instantáneo (van der Waals), propio de moléculas apolares. Por otra parte, los enlaces intermoleculares de las para-aramidas son más intensos, al corresponder a puente hidrógeno, un tipo de dipolo eléctrico permanente, lo que es un factor para que presenten temperaturas de descomposición mayores.

Debido a su estructura molecular, la cual no incluye grupos químicamente activos, las fibras de UHMWPE son resistentes a muchos productos químicos, a la radiación ultravioleta y a microorganismos, ver Forster (2015) y las fichas técnicas de productos Dyneema, Dyneema (2008) y Dyneema (2016). Estas fibras no absorben agua fácilmente, de modo que no hay mayor interacción con la piel, dando la sensación de fibras resbaladizas, y son resistentes a la humedad. Un estudio presentado en Forster (2015) concluyó que la resistencia a la fractura de UHMWPE a 43 °C disminuye en un 9 % después de casi 2 años; por otra parte, a 65 °C, la disminución es de 8 % y 30 %, después de 1 mes y de casi 2 años, respectivamente.

Una falla muy publicitada de un chaleco balístico basado en la fibra de alta resistencia HBO, poli (p-fenileno, 2,6-benzobisoxazol), ocurrida el año 2003 en una situación de servicio, promovió la necesidad de comprender mejor la estabilidad a largo plazo de otras fibras



empleadas para protección balística corporal bajo condiciones de temperatura elevada, Forster (2015). De hecho, productos de protección personal basados en HBO, bajo la denominación comercial Zylon®, fueron retirados del mercado.

Como muchos otros materiales poliméricos, el Kevlar® es sensible a la luz ultravioleta (UV), una radiación electromagnética que incluye dañinas longitudes de onda en el rango 300-450 nm, Dupont (2017). Estas longitudes están incluidas en la radiación solar, de modo que la reciben los objetos expuestos a la intemperie durante el día. En el caso de recintos cerrados, se recomienda mantener este material lejos de las fuentes de luz artificial y de las ventanas de vidrio, esto es, a más de unos 30 cm. Las fibras desprotegidas de Kevlar® inicialmente cambian su color desde amarillo a café; el solo cambio de color no necesariamente ya implica un deterioro en las propiedades mecánicas de ellas. La degradación ocurre solo en presencia de oxígeno y no es acelerada por la presencia de humedad o de contaminantes atmosféricos. Por otra parte, bajo esta radiación, las fibras exteriores son afectadas de manera tal que se genera una capa externa auto-protectora. Otra forma de protección superficial es mediante recubrimientos que contengan pigmentos absorbentes de dicha radiación, o que bien incluyan un tipo de fibra que no sea afectada por los rayos UV. Es reconocido que el UHMWPE resiste mejor la radiación UV que la para-aramida; según una ficha técnica publicada por Dyneema (2016), la pérdida porcentual de resistencia debido a la exposición a radiación UV durante 700 h, según norma ISO 4892-2, es de 25 % para UHMW producido por DSM y de 74 %, para para-aramida, respectivamente.

### **3. CONCLUSIONES**

Se ha presentado una revisión bibliográfica sobre antecedentes de fibras poliméricas largas desarrolladas en EE.UU. y otros países industrializados, en la perspectiva de su utilización en dispositivos de protección balística, particularmente en cascos y chalecos, aunque también, por ejemplo, para la protección de vehículos livianos. Con estas fibras, a partir de la guerra de Vietnam, el Ejército de Estados Unidos ha desarrollado y puesto en servicio cascos y chalecos de protección personal empleando estas fibras; versiones similares a los referidos tipos de elementos de protección han entrado en servicio en el Ejército de Chile, así como en varios otros ejércitos. A requerimiento del Ejército de Chile, el Instituto de Investigaciones y Control (IDIC), mediante su Laboratorio de Resistencia Balística, realiza el control de calidad de tales artículos para la institución; también tiene la responsabilidad legal del control de chalecos antibalas para seguridad privada.

Los tópicos abordados en este texto han sido: fabricación de fibras continuas a partir de las moléculas poliméricas correspondientes; relaciones generales entre la estructura de dichas fibras y las propiedades de estas; y propiedades de tales fibras en la perspectiva de las aplicaciones mencionadas.

Las conclusiones más relevantes son:

- 1) Las fibras principales corresponden, químicamente, a moléculas largas de para-aramida y de polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE, por sus siglas en inglés). Estas fibras son producidas bajo patente, por distintos fabricantes; entre ellas se pueden mencionar: Kevlar® (Dupont, EUA) y Twarin® (Teijin, Países Bajos), en el caso de para-aramida, y Dyneema® (DSM, Países Bajos) y Spectra® (Sigma, EE.UU.), en el caso de UHMWPE. Por ejemplo, para los cascos PASGT y MICH se empleó para-aramida, en tanto que para los más recientes cascos FAST y ECH se utilizó UHMWPE, todos cascos de EUA.
- 2) Las moléculas de para-aramida, constituidas por grupos alternados de amida y para-benceno, presentan la característica esencial de ser rectas. Por otra parte, respecto del polietileno (PE,  $(C_2H_4)_n$ ), cuando se trata del tipo UHMWPE, el que sea de ultra alto peso molecular hace que este exhiba una longitud molecular promedio que es mucho mayor que aquella de los polietilenos habituales; la estructura flexible de las moléculas de polietileno permite, de no mediar procesos especiales, que estas puedan presentar curvatura y flexibilidad.
- 3) A partir de las moléculas poliméricas largas pertinentes, los dos tipos de fibras se fabrican mediante un proceso de extrusión (*spinnig*, en inglés), que permite generar múltiples finos filamentos que, en conjunto, dan lugar a una fibra o hebra muy larga, la que se enrolla en husos. En cada fibra obtenida por extrusión, las moléculas tienden a orientarse parcialmente en forma paralela a la dirección de la fibra correspondiente. Tal proceso de extrusión es complementado con un estiramiento en frío de las fibras, lo que contribuye a incrementar el alineamiento de las moléculas, mejorando así la resistencia de tales fibras. En efecto, cuando dicha orientación preferente se logra, moléculas vecinas y paralelas pueden unirse lateralmente en forma eficiente, lo cual es un factor estructural esencial para ventajosas propiedades mecánicas de estas fibras. Si bien los enlaces laterales individuales entre moléculas paralelas son más intensos en el caso de las para-aramidas que del UHMWPE, esto se compensa por la mayor extensión del contacto entre las moléculas del UHMWPE, debido a la mayor longitud de estas últimas. Otra ventaja de las fibras de UHMWPE, para aplicaciones balísticas, es que ellas son menos densas que aquellas de para-aramida.
- 4) Respecto de las propiedades más destacadas a considerar, cabe señalar:
  - a) Para aplicaciones, por ejemplo, en elementos de protección personal o de vehículos livianos, al comparar el comportamiento de materiales estructurales (que deben resistir esfuerzos), conviene que las propiedades

mecánicas, como la resistencia a la tracción y el módulo de Young, sean lo más elevadas posibles, junto con una densidad la menor posible. En este marco, el UHMWPE presenta ventajas sobre la para-aramida y, cabe agregar, ambos tipos de fibras las presentan sobre el acero.

- b) Una debilidad general de los polímeros es que, dado el efecto desestabilizador de la luz ultravioleta (UV) sobre su estructura molecular, se genera un deterioro particularmente de las propiedades mecánicas por efecto de una exposición en el tiempo a la radiación solar. Ahora bien, tal efecto negativo es bastante menor en el UHMWPE que en la para-aramida.
- c) En los últimos años, el UHMWPE, en atención a sus ventajas, en términos de densidad, propiedades mecánicas y resistencia a la luz UV, ha tendido a desplazar a la para-aramida en ciertos ámbitos de la protección balística. Sin embargo, un factor relevante a considerar es el comportamiento de estas fibras a diferentes temperaturas: la para-aramida mantiene, en forma ventajosa, su comportamiento propio de la temperatura ambiente en un rango más amplio de temperaturas que el UHMWPE.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABTEW, M. A., BOUSSU, F., BRUNIAUX, P., LOGHIN, C., and CRISTIAN, I. (2019). *Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses*, Composite Structures, Vol. 223, 1 sept., 11096-6.
- BENCOMO-CISNEROS, J.A., TEJEDA-OCHOA, A., GARCÍA-ESTRADA, J. A., HERRERA-RAMÍREZ, C.A., HURTADO-MACÍAS, A., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, R., and HERRERA-RAMÍREZ, J.M. (2012), *Characterization of Kevlar-29 fibers by tensile tests and nanoindentation*, Journal of Alloys and Compounds 536S (2012) S456–S459.
- DUPONT (2017), *Kevlar® Aramid Fiber Technical Guide*.
- DYNEEMA (2008). *Ultraviolet exposure of UHMWPE fiber from DSM Dyneema® high-strength, high modulus polyethylene fiber*, 01-01-2008, Ref. CIS YA100.
- DYNEEMA (2016). *Ultraviolet exposure of UHMWPE fiber from DSM Dyneema*, 01-01-2016, Ref. CIS YA102.
- FOSTER, A.L., FORSTER, A.M., CHIN, J.W., PENG, J.-S., CHIN, J.W., PENG, J.-S., LIN, C.-C., PETIT, S., KANG, K.-L., PAULTER, N., RILEY, M.A., RICE, K.D., and ALSHEIKHLY, M. (2015). *Long-term stability of UHMWPE fibers*, Polymer Degradation and Stability, 114, 45-51.
- HAKOO, A. (2019). *Aramid fibre – a modified form of polyamide Nylon*, Textile School, <https://www.textileschool.com/3270/aramid-fibre-a-modified-form-of-polyamide-nylon/>, 2019, página electrónica consultada el 05-05-2023.
- KABIR, R.B., and FERDOUS, N. (2014). *Kevlar-The Super Tough Fiber*, International Journal of Textile Science 2012, 1(6): 78-83. (Para la figura 5, la autorización respecto de su uso está otorgada por defecto en la página electrónica de la revista, con esta correcta cita).
- KULKARNI, S.G., GAO, X.-L., HORNER, S.E., ZHENG, J.Q., and DAVID, N.V. (2013). *Ballistic helmets – Their design, materials, and performance against traumatic brain injury*. Composite Structures, 101, 313-331.

LI, Y., FAN, H., and GAO, X.-L. (2022). *Ballistic helmets: Recent advances in materials, protection mechanisms, performance, and head injury mitigation*, Composites Part B: Engineering, Vol. 238, 1 June, 109890.

MINISTERIO DEL INTERIOR Y SEGURIDAD PÚBLICA (2018), Decreto 867, “Dicta reglamento sobre nuevos estándares para personas, personal y empresas que reciben servicios o realizan actividades de seguridad privada, y modifica decretos que indica”, Ministerio del Interior y Seguridad Pública; Promulgación: 13-JUN-2017; Publicación: 17-MAR-2018; Decreto 298.

SCOTT, R.A. (2005). *Military Protection*, in: Textiles for protection, edited by Scott, R.A., Woodhead Publishing Series in Textiles, 2005, 597-621.

TAM, T., and BHATNAGAR, A. (2016). *High-performance ballistic fibers and tapes*, in: Lightweight Ballistic Composites, Elsevier, 2016.

VAN DER WERFF, H, VAN DER WERFF, U., and HEISSERER, U. (2016). *High-performance ballistic fibers: Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE)*, Computational Materials Science 185 (2020) 109957.

WANG, B., MAO, Z., LI, D., ZHANG, K., ZHOU C., REN, M., and LI, T. (2020). *Multiscale insights into the stretching behavior of Kevlar fiber*, Computational Materials Science 185, 109957.

ZHENG, J.Q., and WALSH, S.M. (2016). *Materials, manufacturing and enablers for future soldier protection*, in: Lightweight Ballistic Composites, Elsevier