

¿Estás vistiendo un metamaterial?

Explorando la física de los tejidos de punto

Denís Arribas Blanco*

Con alrededor de un siglo de historia, la física de los tejidos de punto ha desarrollado un amplio corpus de conocimiento y prometedoras aplicaciones que demuestran la trascendencia de la investigación en la física de los objetos cotidianos.

Las propiedades de los tejidos de punto llevan décadas despertando el interés de físicos e investigadores. Esta creciente atención se debe en gran medida a la capacidad de los tejidos de punto de estirarse hasta varias veces su longitud original a pesar de que el hilo del que están hechos es apenas extensible. En este artículo se presentan las principales aportaciones de las investigaciones que desde comienzos del siglo xx han tratado de dar explicación a esta característica, que ha llevado a los tejidos de punto a ser considerados metamateriales mecánicos. Asimismo, se mencionan sus principales aplicaciones en áreas tan diversas como la medicina o la aeronáutica.

Introducción

Es hora de que los físicos se pongan a calcetar.

Pedro Reis,

Profesor de Ingeniería Mecánica

En marzo de 2019 cientos de investigadores se reunieron en Boston en uno de los encuentros de físicos más importantes del mundo, organizado por la American Physical Society (APS). La sesión titulada “Fabrics, Knits, and Knots” fue íntegramente dedicada a la física de los tejidos y textiles, y los tejidos de punto fueron uno de los principales temas de interés¹. Pero, ¿qué tienen estos tejidos que los hace tan especiales?

Los tejidos de punto pueden estirarse hasta varias veces su longitud, pese a que el hilo del que estén hechos sea apenas extensible. Esta aparente paradoja ha llevado a los investigadores a considerar los tejidos de punto como metamateriales. Las propiedades macroscópicas de un metamaterial están determinadas por su estructura interna y no por la composición química de sus constituyentes básicos [1]. Esta estructura se puede modificar artificialmente para diseñar materiales con una amplia gama de propiedades emergentes que sus componentes no poseen individualmente. Por lo

tanto, los tejidos de punto son considerados metamateriales mecánicos, ya que la distribución y geometría de los puntos de calceta y los bucles de hilo son los responsables de la elasticidad del tejido en su conjunto.

Aunque el interés por este tipo de tejidos pueda parecer reciente, los primeros trabajos científicos sobre el tema se remontan al menos a la década de 1920. Este artículo se propone explorar la física de los tejidos de punto con el objetivo de determinar las características de su estructura interna que dan lugar a su elasticidad emergente. Asimismo, se abordarán las principales aplicaciones de la investigación en este campo.

La física de los tejidos de punto

Descripción de un tejido de punto liso

Una de las principales características de un tejido de punto es que su estructura está constituida por bucles entrelazados [2]. Así, las prendas de punto más simples están hechas, en su mayoría, de un único hilo que se cruza sobre sí mismo varias veces hasta formar una estructura periódica en la que el hilo se dobla formando bucles [3, 4].

Casi todas las investigaciones realizadas hasta la fecha se han centrado en un tipo particular de patrón de tejido conocido como punto liso o punto jersey, que se muestra en la Figura 1. Esta es la estructura de punto con la topología más simple, ya que cada puntada corresponde a una **única** celda en la matriz de bucles entrelazados. Por lo tanto, el patrón de punto liso es muy conveniente para el estudio y elaboración de modelos físico-matemáticos que describan el tejido [3, 5].

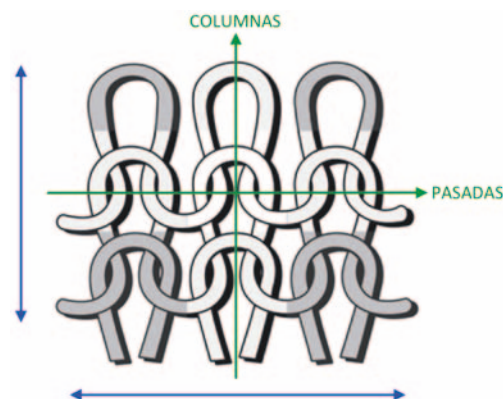


Figura 1. Diagrama de un tejido de punto liso que muestra las direcciones de las pasadas y las columnas (adaptado de [6]).

* Medalla de Oro en la XXIX Olimpiada Española de Física (2018).

1 American Physical Society, “Fabrics, Knits, and Knots”, en APS March Meeting 2019, Boston, MA, EE. UU., pp. 1704-1707 (2019). [Online]. Disponible desde: <https://bit.ly/3klZX0f>.

Un tejido de punto liso tiene dos direcciones principales. Las filas de bucles se conocen como tramas o pasadas ("courses", en inglés) y corren paralelas al ancho de la tela. Por el contrario, las columnas ("wales", en inglés) de bucles corren paralelas a la longitud de la tela [7].

Configuración de equilibrio de un tejido de punto

Las primeras investigaciones se centraron principalmente en aspectos prácticos útiles para la industria textil. Su principal objetivo era ayudar a estandarizar el proceso de fabricación a través de la predicción cuantitativa de las propiedades del tejido final. Para ello, varios autores desarrollaron modelos geométricos que describían la forma de los bucles formados por el hilo en la configuración de equilibrio del tejido. En esta configuración, también conocida como estado relajado, la tela está libre de tensiones externas. Comprender la geometría de un solo bucle se consideraba suficiente para deducir las propiedades de todo el tejido en el estado relajado. Esto permitió a los investigadores determinar las relaciones entre las propiedades del hilo, las características del proceso de tejido y las propiedades dimensionales y de peso del tejido resultante [6]. Ejemplos de estas propiedades incluyen el ancho, el largo, la densidad de puntadas y el peso por unidad de área de la tela.

Chamberlain [8] elaboró en 1926 el primer modelo de la geometría de un bucle de punto liso, que fue ampliado por Peirce [9] en 1947. Aunque este modelo sirvió para despertar el interés en los tejidos de punto dentro de la comunidad científica, estudios posteriores pronto demostraron que resultaba insatisfactorio [4, 5, 10, 11] y se propusieron nuevos modelos [5, 10, 11]. A pesar de las limitaciones de estos primeros estudios, como fue la elección de una geometría arbitraria para los bucles, a menudo se demostró que sus predicciones concordaban con los resultados experimentales en un grado relativamente bueno. Dos conclusiones importantes se pueden extraer del análisis de estos modelos:

1. La longitud de hilo por puntada l , es decir, la cantidad de hilo utilizada para tejer un solo bucle, es un parámetro clave para deducir las propiedades dimensionales de un tejido de punto.
2. La geometría de los bucles en la configuración de equilibrio del tejido es aquella que minimiza la energía potencial elástica de la tela en su conjunto.

Con respecto a la primera conclusión, estudios tanto experimentales [4] como teóricos [5, 11] encontraron que las propiedades dimensionales y de peso de un tejido de punto dependen únicamente de l . Por ejemplo, la densidad de puntadas N (número de puntadas por unidad de área de la tela) es proporcional a l^{-2} , como se muestra en la Figura 2. Además, l resulta ser independiente de las propiedades de las fibras que componen el hilo, de la estructura del propio hilo, de las características del proceso de tejido y de las tensiones externas a

las que se vea sometido el tejido [4, 5]. Esta es la razón por la que en la Figura 2 se sitúan sobre la misma curva los datos correspondientes a tipos muy diferentes de tejidos de punto.

Por las razones anteriormente descritas y debido a que se puede medir durante el proceso de tejido mediante dispositivos específicamente diseñados para ello, l constituye una medida muy útil de la calidad del tejido [5].

En cuanto a la segunda conclusión, Munden [5] señaló que el estado natural de un hilo que no está sometido a fuerzas externas es estar derecho. Por lo tanto, un hilo que se dobla formando un bucle tenderá a enderezarse. Sin embargo, cuando el hilo forma parte de un tejido de punto, las fuerzas de reacción que actúan en los puntos de contacto entre bucles vecinos impiden que el hilo vuelva a su estado original. Para que un bucle concreto se enderezase, los bucles vecinos tendrían que incrementar su propio grado de curvatura. En consecuencia, la forma de equilibrio que toman los bucles cuando el tejido se relaja es la que minimiza la flexión total de los bucles dentro de todo el tejido [5]. Esto corresponde a minimizar la energía potencial elástica del tejido.

La capacidad del tejido para volver a su estado relajado después de que cesen las tensiones ejercidas sobre él depende de la elasticidad del hilo y de la magnitud de las fuerzas de fricción entre bucles [5]. El hilo utilizado habitualmente para tejer no es muy elástico, mientras que las regiones de contacto entre bucles son puntos de alta fricción. Esta es la causa del comportamiento histerético que presentan algunos tejidos de punto. Esto es, el tejido tiende a mantener su estado deformado incluso después de que las fuerzas que lo provocaron desaparezcan [12].

Las consideraciones anteriores relativas a la minimización de la energía elástica fueron tomadas en cuenta por investigaciones posteriores para idear modelos más elaborados sobre el estado relajado de un tejido de punto. En lugar de centrarse única-

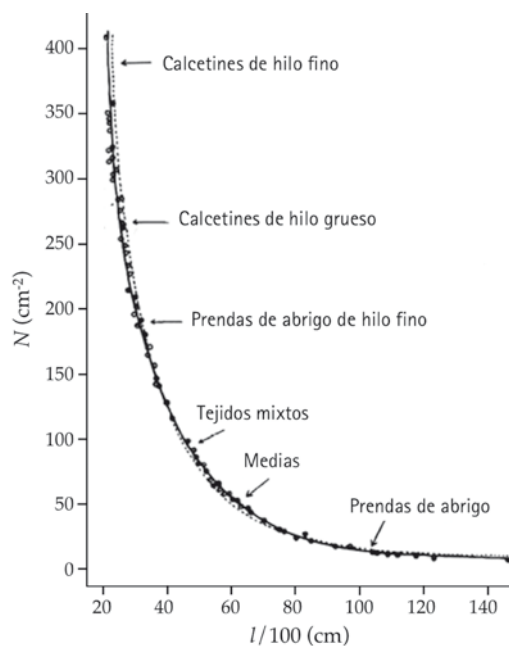


Figura 2. Densidad de puntadas en función de la longitud de hilo por puntada para varios tejidos de punto liso en su estado relajado (adaptado de [4]).

mente en la geometría de los bucles del tejido, estas investigaciones desarrollaron modelos mecánicos que consideraron las fuerzas y los momentos de fuerza que actúan sobre los bucles. De esta manera, Shanahan y Postle [13] demostraron que existe una configuración de energía elástica mínima que es en gran medida independiente de las propiedades del hilo y de lo ceñido que sea el tejido. Sin embargo, encontraron que el mínimo de energía es muy poco profundo, por lo que resulta muy probable encontrar un tejido no tensado cuya estructura sea ligeramente diferente de la que corresponde al estado de mínima energía. Esto explica las importantes discrepancias entre los diferentes estudios experimentales que midieron las propiedades dimensionales de los tejidos de punto en estado relajado. Choi y Lo [14] llegaron a las mismas conclusiones empleando un modelo diferente, basado en un análisis geométrico de los bucles junto a la minimización de su energía total.

Propiedades de carga-extensión de los tejidos de punto

Desarrollar una teoría de los tejidos de punto completa requeriría describir la respuesta mecánica del tejido a las fuerzas externas, conocidas como cargas. Esto conduciría en última instancia a determinar el mecanismo responsable de la extensibilidad de un tejido de punto [3]. Por lo tanto, se llevaron a cabo algunas investigaciones cuyo objetivo principal fue examinar y predecir las propiedades de carga-extensión de los tejidos de punto [2, 3, 12, 15, 16]. Intentaron encontrar la magnitud de la carga que debe aplicarse a la tela para producir una determinada extensión a lo largo de un eje en concreto.

Ya en 1953 se proporcionaron curvas de carga-extensión obtenidas experimentalmente para tejidos de punto liso estirados en la dirección de las pasadas y de las columnas hasta el punto de rotura del tejido [4]. Popper [2] propuso uno de los primeros modelos teóricos con el objetivo de predecir las propiedades de carga-extensión de un tejido de punto, de manera muy similar a las investigaciones anteriores sobre la configuración de equilibrio. Así, consideró la geometría de un bucle de punto liso que se estira paralelamente a las pasadas y columnas, suponiendo que todos los bucles de la tela se deforman exactamente de la misma manera. Es por ello que una de las limitaciones de este y otros estudios [15, 16] es que solo son válidos si la deformación del tejido es homogénea.

Un modelo muy reciente de las características de carga-extensión de un tejido de punto liso que es estirado uniaxialmente fue desarrollado por Poincloux *et al.* en 2018 [3]. Este modelo no hace ninguna suposición sobre la geometría del bucle, sino que se basa en consideraciones fundamentales sobre la topología de la malla que sirvieron para imponer ciertas restricciones al comportamiento del tejido de las que se dedujeron varias de sus propiedades. Los investigadores destacaron tres aspectos esenciales:

A. Restricciones topológicas

Desde un punto de vista topológico, un tejido de punto es un objeto geométrico que se deforma continuamente cuando es estirado por fuerzas externas. Los autores señalaron que esta deformación no puede cambiar el número total y la posición relativa de las puntadas dentro de la malla. El número total de puntadas debe conservarse si el tejido no se rompe. Además, aunque se permite que el hilo se deslice de una puntada a otra, las puntadas en sí mismas no pueden intercambiar posiciones. Al expresar estas limitaciones topológicas matemáticamente e incorporarlas a su modelo, los investigadores pudieron describir la cinemática de un tejido de punto liso en dos dimensiones.

B. Minimización de la energía elástica

La energía potencial elástica total del tejido es la suma de tres términos. Estos corresponden al estiramiento o tracción, torsión y flexión del hilo. Sin embargo, el grado de torsión del hilo no cambia durante un estiramiento bidimensional de la malla. Además, para cargas bajas, el hilo en sí apenas se estira conforme se estira el tejido, como ya habían señalado investigaciones anteriores [4, 15, 16]. Por lo tanto, la energía de torsión puede despreciarse dado que su valor es constante, así como la energía de tracción, pues su magnitud es extremadamente pequeña.

C. Conservación de la longitud del hilo

La última restricción incorporada al modelo fue que la longitud total del hilo en el tejido debía conservarse en todo momento. Esta condición se deduce del hecho de que el hilo apenas se estira al estirar la malla.

Estos principios permitieron a los investigadores obtener las ecuaciones que describen la mecánica del tejido en condiciones de carga. Consideraron la flexión de los bucles formados por el hilo como el único mecanismo de deformación del tejido y, consecuentemente, su análisis se basó en la minimización de la energía de flexión. Para probar su modelo realizaron un experimento con una malla tejida con hilo de nailon. El modelo fue capaz de predecir con precisión la curva de carga-extensión para estiramientos de hasta el 100 % de la longitud original del tejido, como se muestra en la Figura 3 (a). De manera similar, se calculó el campo de desplazamientos esperado que describe las posiciones de las puntadas en el tejido deformado, y se mostró que coincidía con el campo de desplazamientos observado experimentalmente (Figura 3 (b)).

Se encontró que el modelo tenía un alto poder predictivo tanto para deformaciones homogéneas como no homogéneas. Sin embargo, los investigadores destacaron algunas limitaciones. En primer lugar, solo es válido si el diámetro del hilo es muy pequeño en comparación con el tamaño de la puntada, por lo que no puede describir correctamente los tejidos de punto ceñidos. En segundo lugar, no puede predecir el comportamiento no lineal de la curva de carga-extensión al alcanzarse extensiones elevadas. Dado

que el propio hilo comienza a estirarse con cargas muy grandes, debería tenerse en cuenta la energía de tracción. Finalmente, el modelo trata el tejido como un objeto bidimensional, por lo que no puede describir efectos que son necesariamente tridimensionales, como el combado de la malla sobre sus bordes que se puede apreciar en la Figura 3 (a).

A pesar de las limitaciones expuestas, la pregunta de por qué los tejidos de punto son tan extensibles puede finalmente ser respondida. Las principales razones físicas de esta elevada extensibilidad son dos:

1. El hilo puede deslizarse de una puntada a las adyacentes, pudiendo moverse con gran libertad dentro de la tela.
2. El grado de flexión de los bucles formados por el hilo aumenta a medida que se estira la tela, mientras que la longitud del hilo en sí apenas se ve afectada.

Aplicaciones

Las primeras aplicaciones de los tejidos de punto ajenas a su uso como vestimentas surgieron hace ya varias décadas. Por ejemplo, Popper [2] señaló en 1961 que las telas de punto estaban siendo empleadas en refuerzos para mangueras de jardín. Además, algunos trajes espaciales contaban ya entonces con capas con una estructura muy similar a la de un tejido de punto. Hoy en día, es posible diseñar materiales inteligentes basados en hilos que se pueden programar para alterar sus propiedades mecánicas de acuerdo con diversas necesidades específicas. Esta sección describirá tres áreas fundamentales de aplicación de los tejidos de punto.

A. Industria e ingeniería

Los tejidos de punto tienen por sí mismos propiedades muy útiles en el campo de la industria. Además de su alta elasticidad y capacidad para cambiar de forma, son baratos, ligeros y sencillos de fabricar. Se puede lograr una mayor eficiencia elaborando los tejidos a partir de fibras de alto rendimiento hechas con materiales como vidrio, carbono, aramida o cerámica [7, 15]. Sin embargo, muchas de las aplicaciones industriales de los tejidos de punto surgen de su capacidad para formar compuestos con otros materiales que mejoran sus propiedades. Algunos ejemplos destacados incluyen resinas termoplásticas y termoestables [15] e incrustaciones de otros hilos o fibras [16].

Los compuestos de tejidos poseen grandes propiedades de absorción de energía y una alta resistencia a los impactos [7]. Esto ha llevado a su uso como refuerzos para muy diferentes tipos de estructuras que van desde cascos para ciclismo hasta componentes de aeronaves (Figura 4). Asimismo, se emplean en el sector del transporte para fabricar refuerzos mecánicos permeables y como sustituto de componentes metálicos en automóviles, trenes y

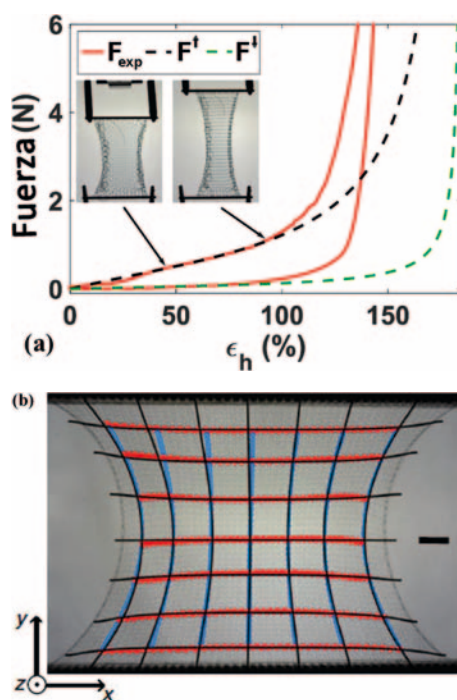


Figura 3. (a) Carga en función del cambio porcentual en la longitud de un tejido de punto liso estirado en la dirección de las columnas. Líneas continuas: curvas experimentales de carga-extensión para las fases de carga y descarga. Líneas punteadas: curvas de mejor ajuste a los datos. (b) Medidas del campo de desplazamientos de las puntadas a lo largo de las pasadas (líneas rojas) y las columnas (líneas azules) para una extensión del tejido del 11 %. Líneas negras: predicciones teóricas (adaptado de [3]).

autobuses para brindar protección mecánica². En la industria civil, se incluyen como parte de muros de hormigón y en la industria aeroespacial se utilizan para diseñar diversos tipos de carenados [7].

B. Medicina

Recientemente han surgido diversas aplicaciones biomédicas de los tejidos de punto debido a su capacidad para imitar ciertas características de las estructuras biológicas. Los compuestos de tejidos biocompatibles pueden utilizarse para reemplazar tejidos biológicos³ y para fabricar prótesis médicas [7]. Como ejemplo, Haines *et al.* [17] destacaron que antes de que los compuestos de tejidos fuesen considerados para la fabricación de fibras musculares artificiales, la mayoría de materiales se mostraban ineficaces a la hora de imitar las propiedades de tracción de los músculos.

C. Animación

La investigación sobre la física de los tejidos de punto también ha encontrado algunas aplicaciones en el campo de la animación. Dado que las ecuaciones que rigen el comportamiento de estos tejidos aún no son bien conocidas, los tejidos representados en los juegos de ordenador suelen simularse mediante modelos simples basados en muelles. Una mejor comprensión del comportamiento de este tipo de tejidos permitiría la introducción de ecuaciones más precisas en las simulaciones para hacerlas más realistas³. Ya se han realizado algunos avances en esta dirección. Por ejemplo, un grupo de investigadores de la Universidad de Cornell desarrolló una herramienta

² S. Poincloux y F. Lechenault, *La physique du tricot* (París, Francia, 2018). (Video online: <https://youtu.be/R5nG-F9jP2U>).

³ American Physical Society, "Mathematical Rules Underlie the Ancient Art of Knitting", *ScienceDaily* (<https://bit.ly/3aKkOqT>).

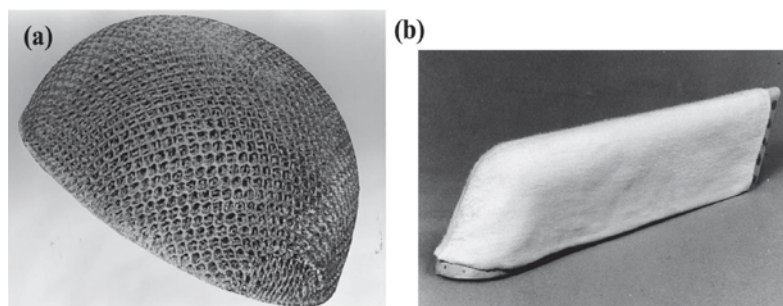


Figura 4. Armazones tejidos para (a) un casco de ciclismo y (b) el carenado de la punta del timón de una aeronave (reproducido de [7]).

que puede simular telas de punto con un nivel de detalle que alcanza la escala del propio hilo [18].

Retos de futuro

A pesar del extenso corpus de conocimiento desarrollado en torno a los tejidos de punto durante casi un siglo, todavía existen muchos desafíos que futuras investigaciones deberán abordar. Nuevas líneas de investigación tienen como objetivo describir el comportamiento tridimensional de los tejidos de punto, ya que muchos de los modelos existentes de la estructura de punto liso son bidimensionales. Esto es algo que Elisabetta Matsumoto y sus estudiantes están investigando en el Instituto de Tecnología de Georgia. Su equipo está tratando además de desarrollar enfoques más matemáticos basados en la teoría de nudos para poder describir cualquier patrón de punto, dado que casi todas las investigaciones hasta la fecha se han centrado en el punto liso⁴.

Conclusión

Las investigaciones han demostrado que los tejidos de punto tienen propiedades fascinantes que los han llevado a ser considerados como metamateriales. Su alta extensibilidad, adaptabilidad y capacidad para formar compuestos con una amplia gama de materiales son algunas de las características que explican sus aplicaciones en la industria, la medicina y la animación. Aunque este artículo se ha centrado principalmente en los atributos mecánicos de los tejidos de punto, hay muchos otros que podrían explorarse, como su porosidad, permeabilidad y propiedades térmicas y de transferencia de calor. Es ciertamente fascinante pensar en cómo actividades cotidianas como tejer involucran numerosos aspectos interesantes de la física y cómo la física puede, a su vez, ayudar a desentrañar los misterios que esconden estas tecnologías ancestrales pero no plenamente comprendidas.

Referencias

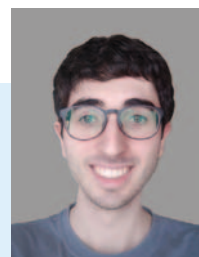
- [1] Y. LIU y X. ZHANG, "Metamaterials", *Encyclopedia Britannica* (Chicago, 2016.)
- [2] P. POPPER, "The Theoretical Behavior of a Knitted Fabric Subjected to Biaxial Stresses", *Dir. Mater. Pro-*

cess., Aeronaut. Syst. Div., EE. UU., Rep. WADD TR 60-897 (1961).

- [3] S. POINCLoux, M. ADDA-BEDIA y F. LECHENAULT, "Geometry and Elasticity of a Knitted Fabric", *Phys. Rev. X* 8, 021075 (2018).
- [4] J. C. H. HURD y P. J. DOYLE, "Fundamental Aspects of the Design of Knitted Fabrics", *J. Text. Inst. Proc.* 44, P561-P568 (1953).
- [5] D. L. MUNDEN, "The Geometry and Dimensional Properties of Plain-Knitted Fabrics", *J. Text. Inst. Trans.* 50, T448-T471 (1959).
- [6] K. SHAKER, M. UMAIR, W. ASHRAF y Y. NAWAB, "Fabric manufacturing," en *Textile Engineering*, (Y. Nawab, Ed., Berlín, Alemania, De Gruyter, cap. 4, pp. 47-82, 2016).
- [7] K. H. LEONG, S. RAMAKRISHNA, Z. M. HUANG y G. A. BIBO, "The Potential of Knitting for Engineering Composites—A Review", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.* 31, 197-220 (2000).
- [8] J. CHAMBERLAIN, *Hosiery Yarns and Fabrics 2* (City of Leicester College of Technology, Leicester, 1926).
- [9] F. T. PEIRCE, "Geometrical Principles Applicable to the Design of Functional Fabrics", *Text. Res. J.* 17, 123-147 (1947).
- [10] G. A. V. LEAF y A. GLASKIN, "The Geometry of a Plain Knitted Loop", *J. Text. Inst. Trans.* 46, T587-T605 (1955).
- [11] G. A. V. LEAF, "Models of the Plain-Knitted Loop", *J. Text. Inst. Trans.* 51, T49-T58 (1960).
- [12] G. DUSSERE, "Modelling the Hysteretic Wale-wise Stretching Behaviour of Technical Plain Knits", *Eur. J. Mech. A/Solids* 51, 160-171 (2015).
- [13] W. J. SHANAHAN y R. POSTLE, "A Theoretical Analysis of the Plain-Knitted Structure", *Text. Res. J.* 40, 656-665 (1970).
- [14] K. F. CHOI y T. Y. LO, "An Energy Model of Plain Knitted Fabric", *Text. Res. J.* 73, 739-748 (2003).
- [15] H. HONG, M. D. DE ARAUJO, R. FANGUEIRO y O. CIOBANU, "Theoretical Analysis of Load-Extension Properties of Plain Weft Knits Made from High Performance Yarns for Composite Reinforcement", *Text. Res. J.* 72, 991-996 (2002).
- [16] G. DUSSERE, L. BALEA y G. BERNHART, "Elastic Properties Prediction of a Knitted Composite with Inlaid Yarns Subjected to Stretching: A Coupled Semi-analytical Model", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.* 64, 185-193 (2014).
- [17] C. S. HAINES, N. LI, G. M. SPINKS, A. E. ALIEV, J. DI y R. H. BAUGHMAN, "New Twist on Artificial Muscles", *Proc. Nat. Acad. Sci.* 113, 11.709-11.716 (2016).
- [18] J. M. KALDOR, D. L. JAMES y S. MARSCNER, "Simulating Knitted Cloth at the Yarn Level", *ACM Trans. Graph.* 27 (2008).

Denís Arribas Blanco

Estudiante del Grado con Máster (MSci) de Física con Física Teórica en el Department of Physics, Imperial College London



⁴ Ver nota a pie núm. 3 en la página anterior.