



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Geometrías auxéticas con corte láser para textiles

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Textil

AUTOR/A: Pérez Ripoll, María

Tutor/a: Gisbert Paya, Jaime

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

ABSTRACT

La problemàtica del tallaje en la moda, hasta día de hoy, se ha solucionado a través de elásticos, oversize o cordonería. Sin embargo, las geometrías auxéticas junto con la tecnología de corte láser, nos ofrecen otro abanico de posibilidades para el abordaje de este problema.

A través de esta investigación, se han estudiado diferentes tipologías de geometrías auxéticas, sobre diversos soportes textiles, con el objetivo de conseguir prendas adaptables a diferentes formas, siluetas y estructuras.

Para ello se testean cuatro tipologías de geometrías cortadas a láser sobre diferentes textiles y se analiza su resistencia a la tracción, elongación y coeficiente de Poisson, con el objetivo de encontrar la combinación textil y geometrías idóneas.

La problemàtica del tallatge a la moda, fins avui, s'ha solucionat a través d'elàstics, oversize o cordonería. Tot i això, les geometries auxètiques juntament amb la tecnologia de tall làser, ens ofereixen un munt de possibilitats per a l'abordatge d'aquest problema.

A través d'aquesta investigació, s'han estudiat diferents tipologies de geometries auxètiques sobre diversos suports tèxtils, amb l'objectiu d'aconseguir peces adaptables a diferents formes, siluetes i estructures.

Per això es testegen quatre tipologies de geometries tallades a làser sobre diferents tèxtils i se n'analitza la resistència a la tracció, elongació i coeficient de Poisson, amb l'objectiu de trobar la combinació tèxtil i geometries idonis.

The problem of sizing in fashion, to this day, has been solved through elastics, oversize clothes or laces. However, auxetic geometries together with laser cutting technology offer us another range of possibilities to address this problem.

Through this research, different types of auxetic geometries have been studied on various textile supports, with the aim of achieving garments adaptable to different shapes, silhouettes and structures.

To do this, three types of laser-cut auxetic geometries on different textiles are tested and their tensile strength, elongation and Poisson's ratio are analyzed, with the aim of finding the ideal textile and geometries combination.

Palabras clave:

adaptabilidad, geometría, láser, auxetic fabric, negative Poisson's ratio

adaptabilitat, geometria, làser, auxetic fabric, negative Poisson's ratio

adaptability, geometry, laser, auxetic fabric, negative Poisson's ratio

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Objetivos | 2 |
| 3. Marco teórico | 3 |
| 3.1. Estado del arte | 3 |
| 3.2. Textiles auxéticos | 9 |
| 3.2.1. Coeficiente de Poisson | 9 |
| 3.2.2. Geometrías y estructuras auxéticas | 10 |
| 3.2.2.1. Estructuras reentrantes | 11 |
| 3.2.3. Tecnología disponibles | 18 |
| 3.2.2.1 Textiles de calada | 19 |
| 3.2.2.2 Textiles de punto | 22 |
| 3.2.2.3. No tejidos | 30 |
| 3.3. La problemática de las formas | 30 |
| 3.3.1. Body positive y body neutrality | 31 |
| 4. Parte experimental | 33 |
| 4.1. Equipos y materiales | 33 |
| 4.1.1. Equipos | 33 |
| 4.1.2. Textiles propuestos | 36 |
| 4.2. Procedimiento experimental | 41 |
| 4.2.1. Geometrías propuestas | 41 |
| 4.2.2. El corte láser | 44 |
| 4.2.3. Testeo de las muestras | 47 |
| 4.3. Caracterización de prototipos | 49 |
| 4.4. Resultados obtenidos | 52 |
| 4.4.1. Gráficas tensión/deformación de los tejidos sin geometrías | 53 |
| 4.4.2. Gráficas elongación/poissón según cada tejido | 55 |
| 4.4.3. Gráficas tensión/poissón según geometrías | 58 |
| 5. Conclusiones | 63 |
| 6. Prototipado | 64 |
| 7. Líneas futuras | 68 |
| 8. Bibliografía | 69 |
| ANEXOS | 73 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Ropa interior y calcetería con geometrías auxéticas..... | 3 |
| Figura 2: Ejemplos de geometrías auxéticas..... | 4 |
| Figura 3: Los zapatos auxéticos impresos en 3D..... | 4 |
| Figura 4: Imagen de la suela del modelo Nike RN Fly..... | 5 |
| Figura 5: Rodilleras para la práctica de ciclismo..... | 5 |
| Figura 6: Top y falda de punto de la marca AERON..... | 6 |
| Figura 7: Imagen de geometrías conseguidas a través de impresión 3D de Danit Peleg..... | 6 |
| Figura 8: Investigación de chaqueta técnica para la marca NorthFace..... | 7 |
| Figura 9: Ejemplo de diseño adaptable con impresión 3D..... | 7 |
| Figura 10: Andrea chin I designboom..... | 8 |
| Figura 11: Ilustración esquemática de lo que ocurre en un material ordinario cuando se le aplican fuerzas de tracción (A) o compresión (B)..... | 9 |
| Figura 12: Ilustración esquemática del comportamiento de un material auxético cuando está sometido a tracción..... | 10 |
| Figura 13: Estereofotografía de una espuma con estructura auxética (reentrante)..... | 10 |
| Figura 14: partes de una estructura quiral..... | 14 |
| Figura 15: Ejemplo de una geometría quiral en reposo y sometida a tracción..... | 16 |
| Figura 16: Imágenes del comportamiento auxético del no tejido A bajo dos tensiones distintas a compresión..... | 16 |
| Figura 17: Geometría representativa del patrón con alta concentración de esfuerzo en las puntas al ser sometido a tracción..... | 17 |
| Figura 18: geometría para la mejora de concentración de esfuerzos en los extremos..... | 17 |
| Figura 19: Distintas geometrías testeadas..... | 18 |
| Figura 20: Problemática con las geometrías rotatorias..... | 20 |
| Figura 21: Ejemplo de la consecución de una estructura reentrante en un tejido de calada... 20 | 20 |
| Figura 22: Ejemplos de estructuras de punto por trama con geometrías de tipo plegables.... 22 | 22 |
| Figura 23: Ejemplos de estructuras de punto por trama con geometrías rotatorias..... | 23 |
| Figura 24: Ejemplo de tejido de punto con geometrías rectangulares re-entrantes utilizado en el estudio..... | 25 |
| Figura 25: Definición del tejido con estructuras rotatoria de lazo hexagonal..... | 26 |
| Figura 26: ejemplo de textil de punto con estructuras auxéticas reentrantes..... | 27 |
| Figura 27: esquema de las direcciones de ensayo del textil..... | 28 |
| Figura 28: tabla con los coeficientes de poisson del tejido de punto por urdimbre..... | 28 |
| Figura 29: foto de un tejido spacer (izquierda) y esquema del ensayo a compresión (derecha)..... | 28 |
| Figura 30: Fotografías de las celdas hexagonales de cada uno de los textiles ensayados..... | 29 |
| Figura 31: Definición de las geometrías de cada una de los spacers ensayados..... | 29 |
| Figura 32: Polímero fabricado con electrospinning (A), polímero convencional (B)..... | 30 |
| Figura 33: Ejemplo la rueda de producción para la confección de un producto con tecnología láser..... | 32 |
| Figura 34: máquina láser utilizada para cortar las geometrías auxéticas sobre el material textil..... | 33 |
| Figura 35: Foto de tejido denim tratado con corte láser..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 36: características técnicas del dinamómetro..... | 35 |
| Figura 37: Foto del dinamómetro utilizado en los ensayos..... | 36 |
| Figura 38: Imagen de la regla de acero..... | 36 |
| Figura 39: Imagen a escala del tejido 1, derecho y revés del tejido 1 (de arriba a abajo)..... | 37 |
| Figura 40: Imagen a escala del tejido 3, derecho y revés del tejido 3 (de arriba a abajo)..... | 38 |
| Figura 41: Imagen a escala del tejido 4, derecho y revés del tejido 4 (de arriba a abajo)..... | 39 |
| Figura 42: Imagen a escala del tejido 4, derecho y revés del tejido 5 (de arriba a abajo)..... | 40 |
| Figura 43: progresión del desarrollo y dimensiones de la geometría reentrante, estrellada..... | 41 |
| Figura 44: progresión del desarrollo de la geometría reentrante punta de flecha..... | 42 |
| Figura 45: Dimensiones de la geometría reentrante punta de flecha..... | 42 |
| Figura 46: Desarrollo y medidas de la geometría 3..... | 43 |
| Figura. 47: Desarrollo y medidas de la geometría 4..... | 44 |
| Figura 48: Vista de las geometrías sobre el tejido 4 a potencias altas..... | 45 |
| Figura 49: Ejemplo de resultado de corte láser sobre el tejido 3 y con la geometría 1..... | 46 |
| Figura 50: Ejemplo de resultado de corte láser sobre el tejido 2 y con la geometría 3..... | 46 |
| Figura 51: Ejemplo de resultado de corte láser sobre el tejido 1 y con la geometría 2..... | 47 |
| Figura 52: Ejemplo de resultado de corte láser sobre el tejido 2 y con la geometría 3..... | 47 |
| Figura 53: ejemplos de las muestras con distintas geometrías T2_G3 (izquierda) T3_G1 (derecha) testeadas en el dinamómetro..... | 49 |
| Figura 54: ejemplos de la medición de estrechamiento de la muestra a una tensión determinada (T4_G2)..... | 50 |
| Figura 55: ejemplo de rotura de una sola de las geometrías (T4_G2)..... | 51 |
| Figura 56: patronaje y despiece para corte láser del Body..... | 64 |
| Figura 57: Prototipo sobre modelo 1..... | 65 |
| Figura 58: Prototipo sobre modelo 2..... | 66 |
| Figura 59: Detalle del prototipo modelo 1..... | 67 |
| Figura 60: Detalle del prototipo modelo 1..... | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Tabla resumen de estructuras reentrantes..... | 11 |
| Tabla 2: Tabla de estructuras reentrantes más complejas..... | 12 |
| Tabla 3: Tabla resumen de estructuras rotatorias..... | 14 |
| Tabla 4: Tabla resumen de estructuras quirales..... | 15 |
| Tabla 5: Tabla de prototipos realizados, con combinación de geometrías y tejidos..... | 45 |
| Tabla 6: Tabla de codificación de las geometrías..... | 48 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1: Conclusiones sobre las distintas geometrías..... | 18 |
| Gráfico 2: Resultados del coeficiente de Poisson cuando aplicamos tensión en sentido de la urdimbre (izquierda), de la trama (derecha)..... | 21 |
| Gráfico 3: Gráfica comparativa de los tres tejidos de punto por trama y geometría plegable ensayados..... | 23 |
| Gráfico 4: Comparativa entre el comportamiento experimental y el calculado..... | 24 |
| Gráfico 5: Gráfico de coeficiente de Poisson frente a tensión de las cuatro muestras del tejido 1..... | 26 |
| Gráfica 6: Resultados del coeficiente de Poisson de los spacers sometidos a un esfuerzo de tracción..... | 29 |
| Gráfica 7: Tensión deformación y estadísticas de la prueba del tejido 1 sin geometrías..... | 53 |
| Gráfico 8: Tensión deformación y estadísticas de la prueba del tejido 2 sin geometrías..... | 54 |
| Gráfico 9: gráfico de tensión deformación y estadísticas de la prueba del tejido 3 sin geometrías..... | 55 |
| Gráfico 10: gráfico de tensión deformación y estadísticas de la prueba del tejido 4 sin geometrías..... | 55 |
| Gráfico 11: Coeficiente de Poisson en relación elongación, según geometrías para el Tejido 1. | 56 |
| Gráfico 12: Coeficiente de Poisson en relación a la elongación, según geometrías para el Tejido 2..... | 57 |
| Gráfico 13: Coeficiente de Poisson en relación a la elongación, según geometrías para el Tejido 3..... | 57 |
| Gráfico 14: Coeficiente de Poisson en relación a la elongación, según geometrías para el Tejido 4..... | 58 |
| Gráfico 15: Análisis del comportamiento auxético de los diferentes textiles analizados sin el corte de las geometrías..... | 59 |
| Gráfico 16: Comparativa de la geometría 1 aplicada a distintos textiles..... | 60 |
| Gráfico 17: Comparativa de la geometría 2 aplicada a distintos textiles..... | 61 |
| Gráfico 18: Comparativa de la geometría 3 aplicada a distintos textiles..... | 61 |

1. Introducción

Desde que empezó la revolución industrial e intensificado con la aparición del fast fashion, se han confeccionado las prendas de forma estandarizada, siguiendo un tallaje acorde a las proporciones y tamaños más comunes, por motivos de economía de escala.

En el otro extremo siempre ha existido la confección a medida de prendas para un individuo en concreto. Sin embargo, esta forma de confeccionar está en desuso y solo se utiliza en la moda para ocasiones especiales por su elevado precio.

Pero sabemos que la morfología humana no es homogénea, incluso dentro de una misma talla, dos personas pueden tener distintas formas y por lo tanto diferentes necesidades en torno a las prendas.

Si a eso le añadimos lo que indica tanto la prescriptora de tendencias *Lidewij Edelkoort*, como los artículos de *textilworld* o *fashionunited* sobre personalización, donde se afirma que el cliente busca: personalización, adaptabilidad a todas las formas y texturas, nos encontramos con un problema que el mundo de la moda debe y puede resolver. (Terra, 2021), (Burneman, 2021), (Esch, 2021).

La combinación de tecnología de corte láser y geometrías auxéticas ofrece una solución ideal para abordar esta problemática. La tecnología láser nos brinda la capacidad de personalización, satisfaciendo la creciente demanda del mercado. Por otro lado, las geometrías auxéticas nos permiten adaptarnos a las diversas formas del cuerpo de manera efectiva.

2. Objetivos

El **objetivo principal** del Trabajo Fin de Máster consiste en aplicar cortes de diferentes geometrías sobre distintos soportes textiles, mediante la tecnología de corte láser, para mejorar el comportamiento auxético de los mismos.

Los **objetivos secundarios** del proyecto, son los siguientes:

- Explorar diversas opciones de textiles que sean apropiados para soportar las geometrías auxéticas cortadas mediante láser.
- Analizar la mejora del comportamiento auxético de un textil al introducir geometrías auxéticas con corte láser sobre el mismo.
- Encontrar la combinación óptima entre tejido y corte estructura auxética.
- Construir un prototipo de indumentaria utilizando la geometría auxética más efectiva con el fin de demostrar y afinar el concepto de adaptabilidad al cuerpo humano.

3. Marco teórico

3.1. Estado del arte

La búsqueda de adaptabilidad en las prendas es crítica en diferentes ámbitos de la moda: ropa interior, calzado y tejidos técnicos para deporte son las que más innovación han aportado a los diseños.

Aunque el trabajo se centra en el corte láser para la obtención de estas geometrías, la tecnología de impresión 3D, es una técnica que se ha encontrado interesante vigilar y en la que se han obtenido muchos ejemplos de adaptabilidad en distintos productos.

Ropa interior

En la marca Woldford encontramos patrones geométricos que ayudan a la adaptabilidad de las prendas al cuerpo:

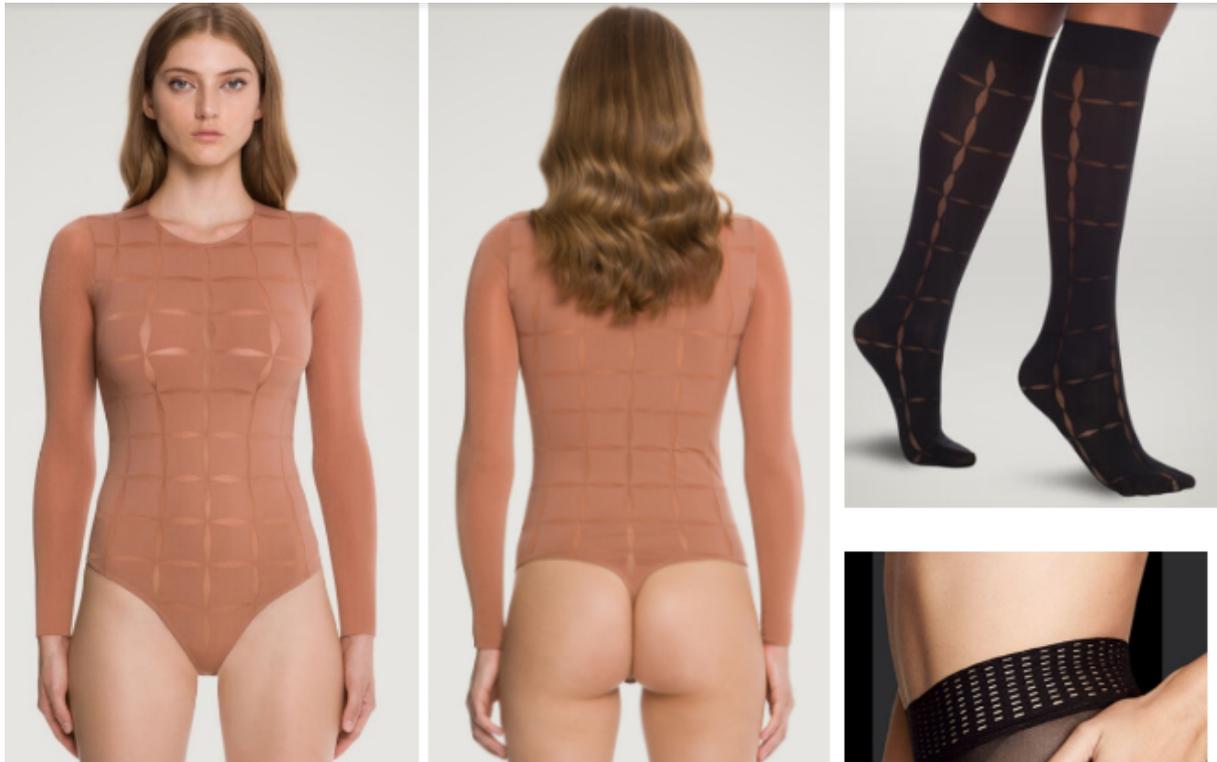


Figura 1: Ropa interior y calcetería con geometrías auxéticas.
Nota: Iconic legwear, s.f.

Calzado

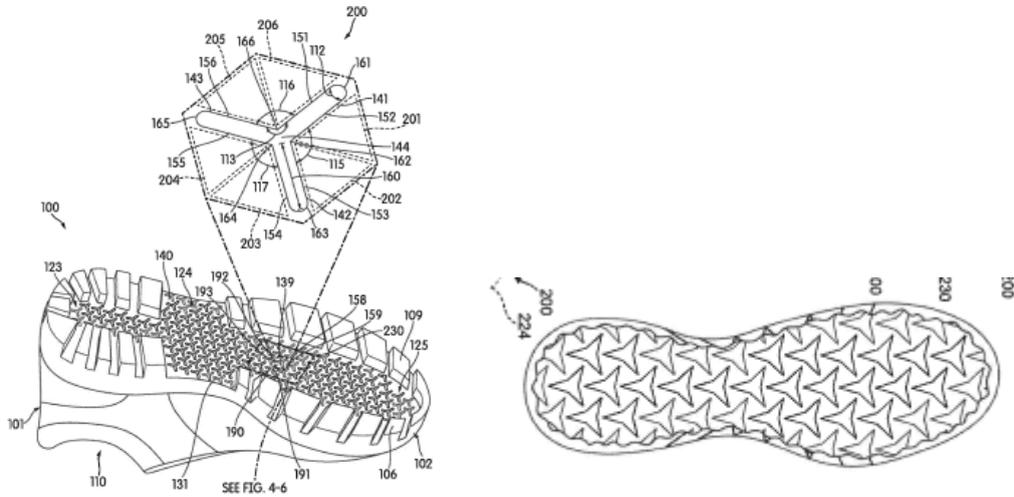


Figura 2: Ejemplos de geometrías auxéticas.
Nota: Wright, 2019



Figura 3: Los zapatos auxéticos impresos en 3D
Nota: Los zapatos auxéticos impresos en 3D por Wertel Oberfell se adaptan continuamente a la forma del pie | Floornature. (s. f.)

Otros ejemplos serían todos los modelos de Nike Free. Además, según INESCOP, en 2015 Nike ya patenta un tipo de suela con geometrías auxéticas, patente que está también referenciada en el mismo en espacenet, ya desde 2015. (Boletín 51 vigilancia tecnológica Inescop, 2015) (Auxetic Soles With Corresponding Inner or Outer Liners, 2015).

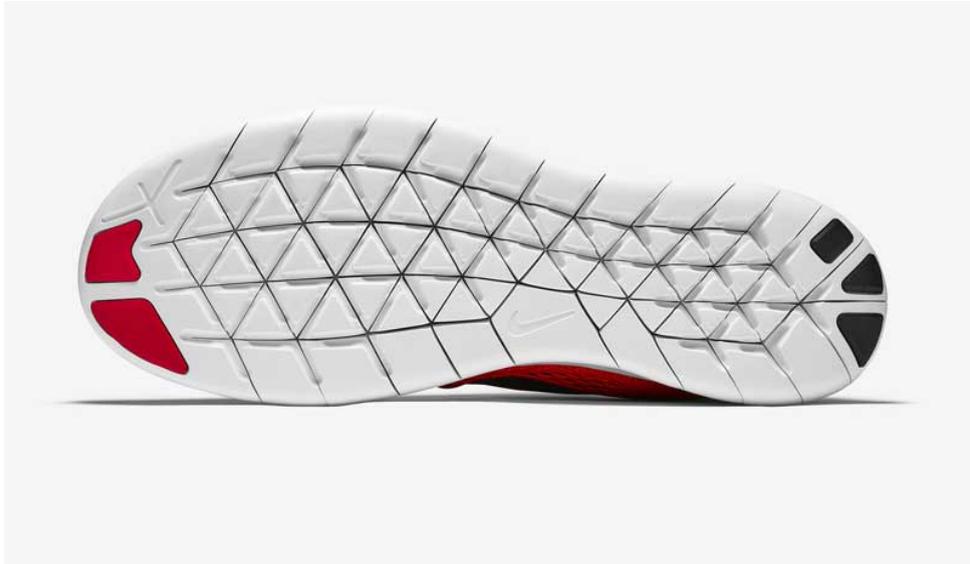


Figura 4: Imagen de la suela del modelo Nike RN Fly.
Nota: Nike Free RN Flyknit “Dynamic Movement para mujer”, s.f.

Ropa deportiva y accesorios:



Figura 5: Rodilleras para la práctica de ciclismo.
Nota: Formas auxéticas para un pedalear perfectamente, s.f.

Otras marcas de moda:



Figura 6: Top y falda de punto de la marca AERON.
Nota: AERON, s.f.

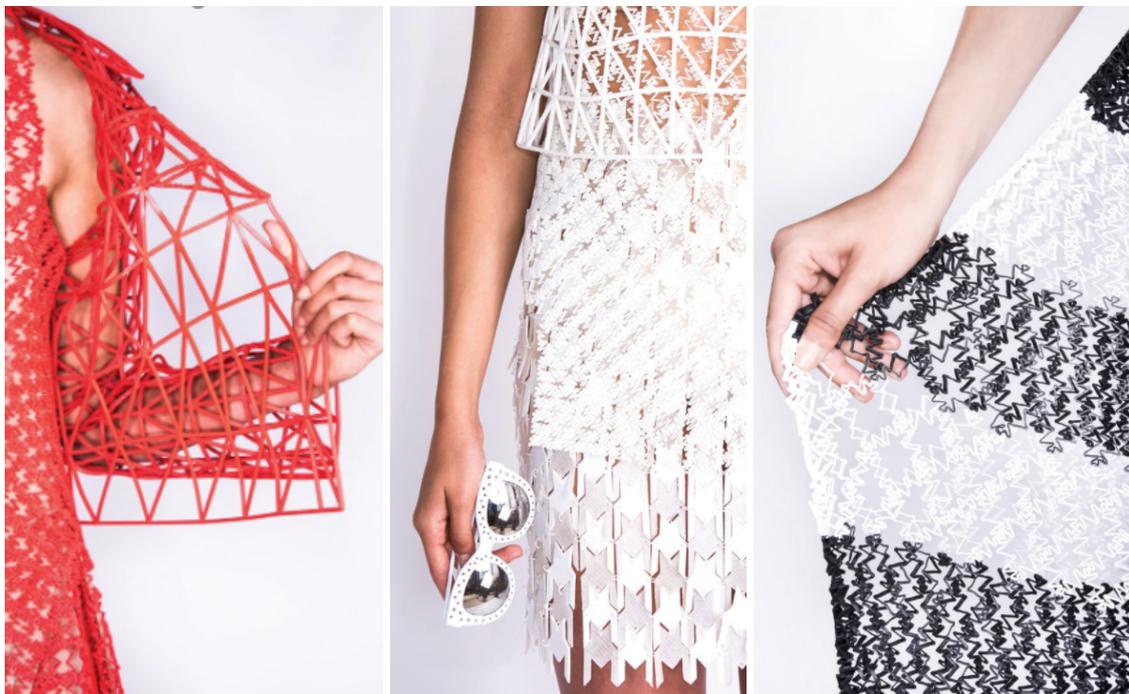


Figura 7: Imagen de geometrías conseguidas a través de impresión 3D de Danit Peleg.
Nota: Santi, 2021.



Figura 8: Investigación de chaqueta técnica para la marca NorthFace.
Nota: Post, 2019

Diseños premiados:

Proyecto Loom. Segundo premio en 3D Printed Forms and Products Design Award in 2019. Vestido adaptable gracias a geometrías auxéticas.



Figura 9: Ejemplo de diseño adaptable con impresión 3D.
Nota: A' Design Award & Competition, s.f.

Lexus design award (designboom), cuyo tema fue “Senses”. Aunque la idea ganadora no se centraba en la adaptabilidad, sino que el objetivo era abordar los problemas que enfrentan las personas con autismo al vestirse, usar, jugar o estimular sus sentidos. Aparecen estas geometrías en algunos de los diseños. Evitando así, cremalleras, botones y otras fornituras menos adaptables.



Figura 10: Andrea chin I designboom.
Nota: Andrea chin I designboom, 2015.

3.2. Textiles auxéticos

3.2.1. Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson es un parámetro característico de cada uno de los materiales. Se define como el cociente entre acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada, dividido en el alargamiento longitudinal producido.

$$\nu = - (\epsilon_{\text{trans}} / \epsilon_{\text{long}})$$

$$\nu = - \frac{\epsilon_{\text{trans.}}}{\epsilon_{\text{long.}}}$$

Normalmente, cuando un material ordinario está sometido a fuerzas de tracción en una dirección, lo que ocurre es que en la dirección perpendicular se contrae y por el contrario cuando lo sometemos a compresión, en la dirección perpendicular a la que se le aplica la fuerza, se expande. Resultando un coeficiente de Poisson positivo (entre 0-0,5 aproximadamente). Fig. 11.

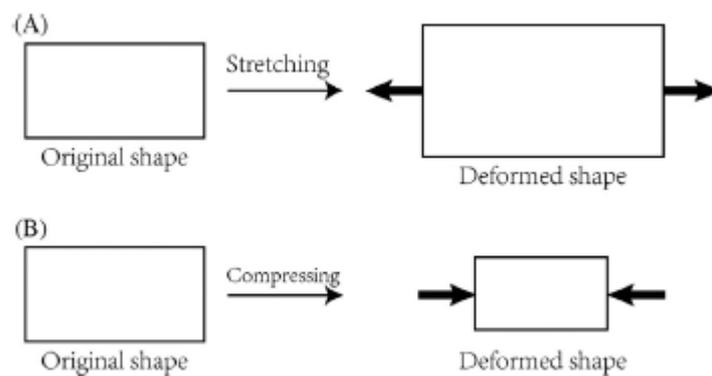


Figura 11: Ilustración esquemática de lo que ocurre en un material ordinario cuando se le aplican fuerzas de tracción (A) o compresión (B).

Nota: Hu, 2019

Por el contrario, los materiales auxéticos tienen un coeficiente de Poisson negativo y se comportan al contrario. Si se aplica tracción en una dirección, la sección perpendicular del material aumenta y viceversa. Ver figura 12.

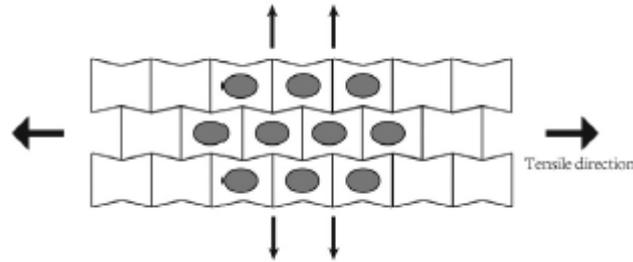


Figura 12: Ilustración esquemática del comportamiento de un material auxético cuando está sometido a tracción.

Nota: Hu, 2019.

3.2.2. Geometrías y estructuras auxéticas

Aunque los materiales auxéticos existen en la naturaleza, no es hasta 1987 cuando se despierta interés en este tipo de productos y es cuando Lakes presenta una espuma que con coeficiente de Poisson negativo, y se demuestra que los materiales auxéticos se originan a partir de sus estructuras geométricas especiales. (Lakes, 2018)

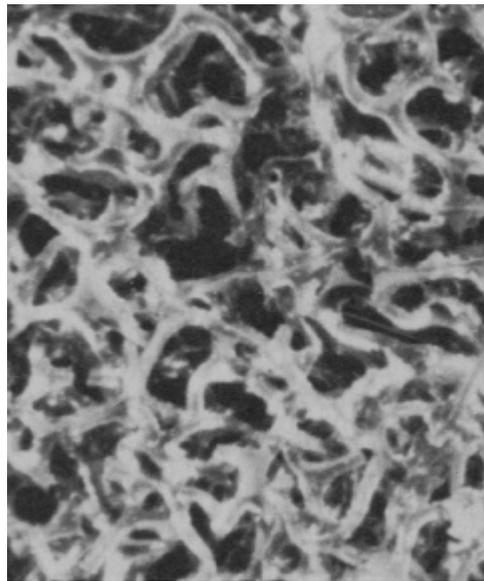


Figura 13: Estereofotografía de una espuma con estructura auxética (reentrante)

Nota: Lakes, 1987.

La forma en que una estructura se deforma dando lugar a una relación de Poisson negativa es el mecanismo auxético.

Por lo tanto, los materiales auxéticos se pueden clasificar por sus geometrías o por su deformación mecanismos.

3.2.2.1. Estructuras reentrantes

Según el libro "Auxetic Textiles", la palabra reentrante, se refiere a aquellas geometrías "dirigidas hacia dentro", o aquellas que tienen ángulos negativos. Las celdas reentrantes, si se utilizan con patrones repetitivos (celdas anidadas), pueden formar estructuras auxéticas tanto en 2D como en 3D. (Hu, 2019).

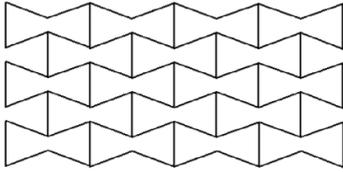
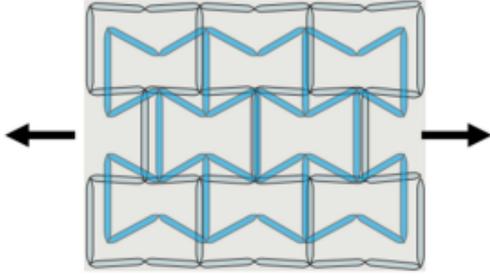
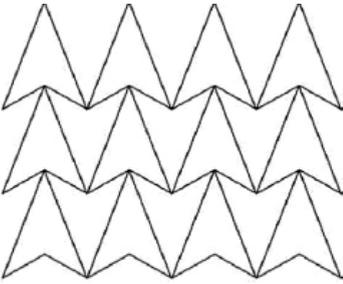
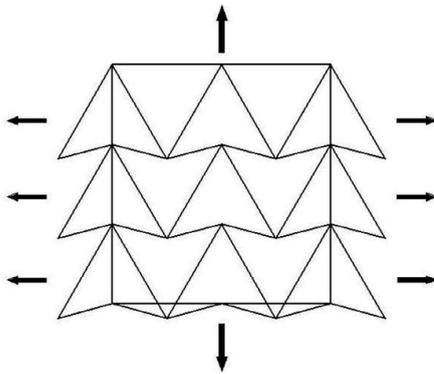
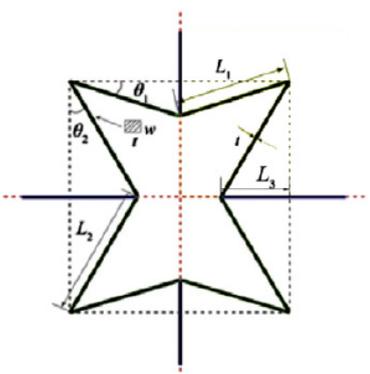
| Tipología | Reposo | Extensión |
|--------------------------------|---|--|
| Hexagonales |  |  |
| Triangulares (forma de flecha) |  |  |
| Estrelladas |  |  |

Tabla 1: Tabla resumen de estructuras reentrantes

Nota: Hu, 2019

Otras estructuras auxéticas reentrantes

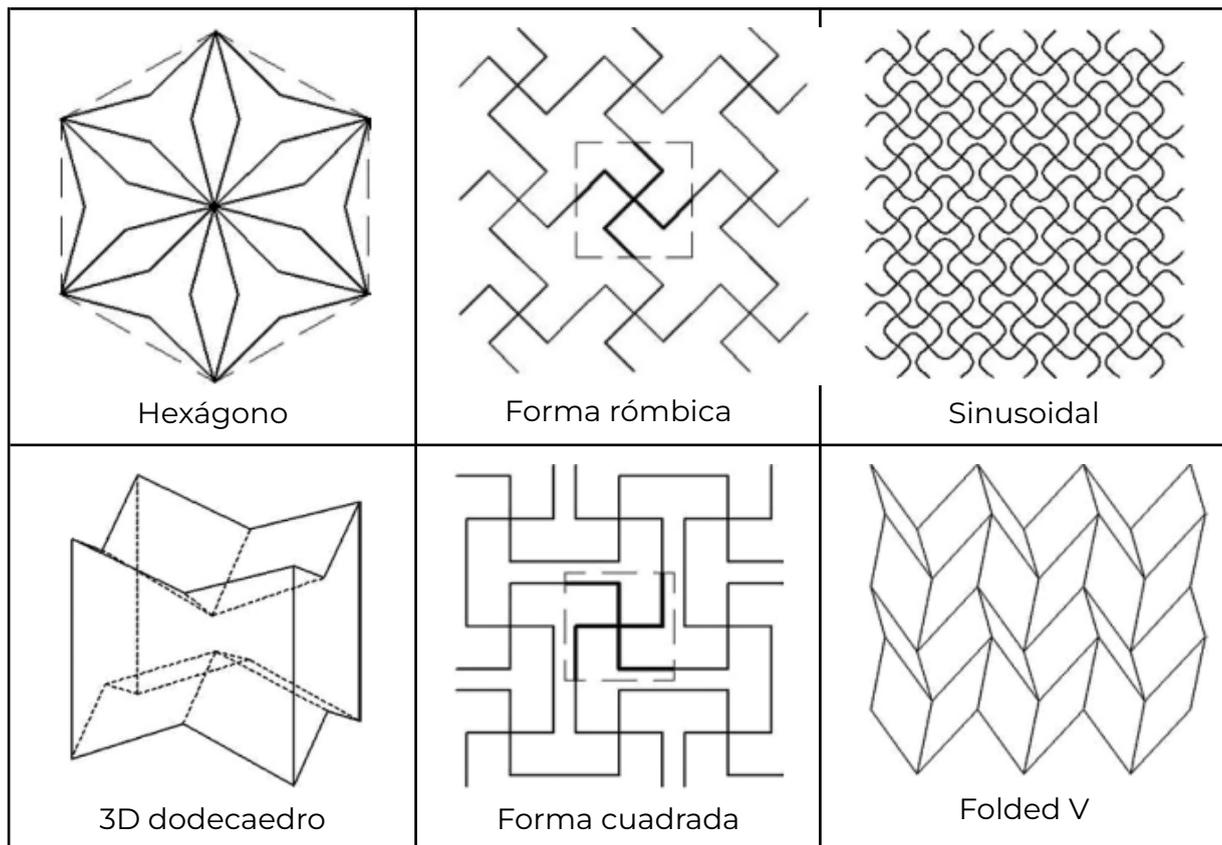
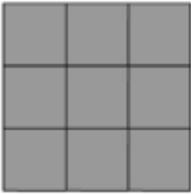
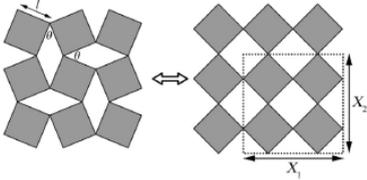


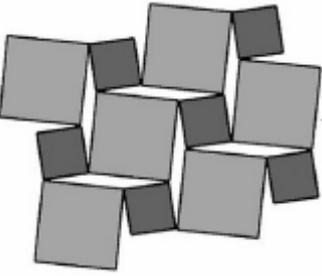
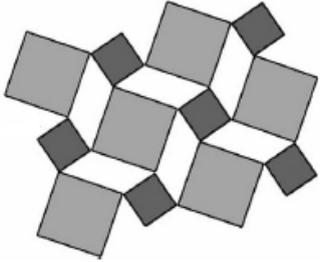
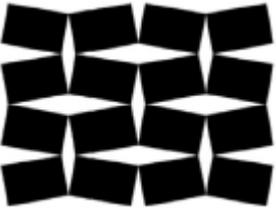
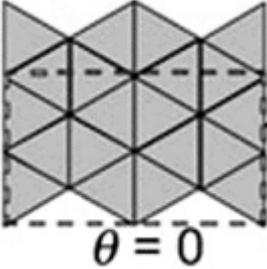
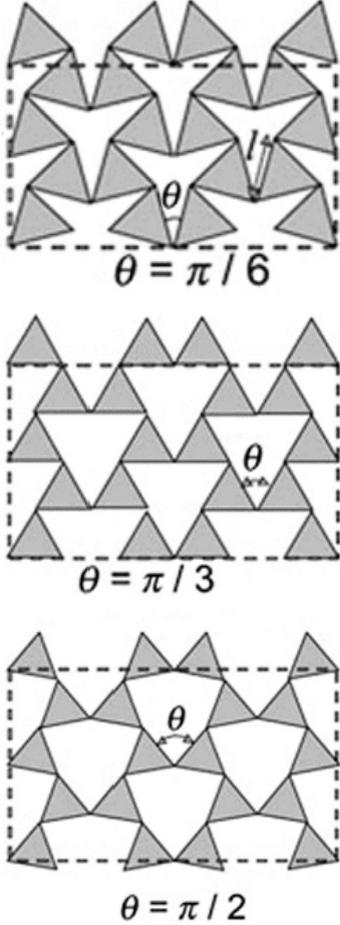
Tabla 2: Tabla de estructuras reentrantes más complejas

Nota: Kelkar, 2020.

Estructuras rotatorias

Es una estructura giratoria idealizada que contiene polígonos rígidos conectados a través de otros simples. Cuando estas geometrías o estructuras se encuentran bajo tensión, se expanden o se contraen dependiendo de se someten a tracción o a compresión. (Hu, 2019)

| Tipología | Reposo | Bajo tracción |
|----------------------|---|---|
| Cuadrados rotatorios |  |  |

| | | |
|---|---|---|
| <p>Cuadrados rotatorios irregulares</p> |  |  |
| <p>Rectángulos rotatorios</p> |  |  |
| <p>Triángulos rotatorios</p> |  <p>$\theta = 0$</p> |  <p>$\theta = \pi / 6$</p> <p>$\theta = \pi / 3$</p> <p>$\theta = \pi / 2$</p> |

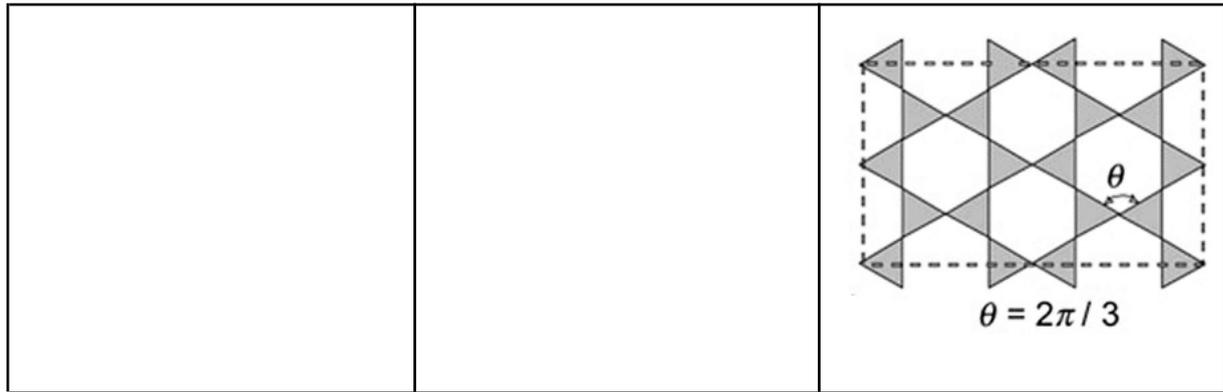


Tabla 3: Tabla resumen de estructuras rotatorias
Nota: Hu, 2019

Estructuras quirales

Son otro tipo de estructuras periódicas, que comprenden un nodo central con ligamentos adjuntos, que están dispuestos de manera que la celda unitaria exhibe una simetría rotacional y repetitiva. Ver figura 14.

En geometría de 2D, cada figura que posee un eje de simetría es aquiral, al contrario que el término quiral, que denotará asimetría de un objeto.

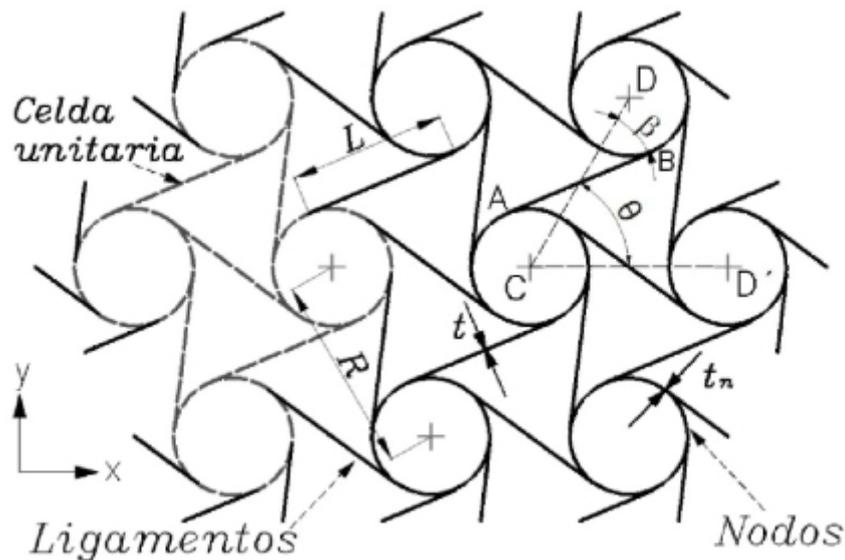


Figura 14: partes de una estructura quiral
Nota: Hu, 2019.

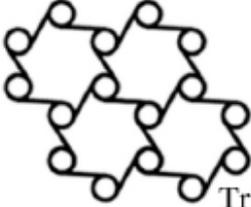
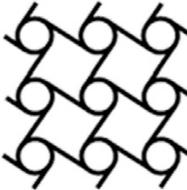
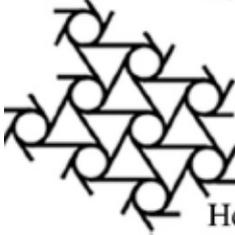
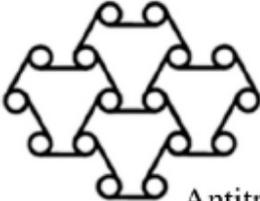
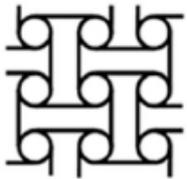
| Tipología | Reposo |
|----------------|--|
| Tri-quirales |  <p>Trichirals</p> |
| Tetra-quirales |  <p>Tetrachirals</p> |
| Hexa-quirales |  <p>Hexachirals</p> |
| aquirales |  <p>Antitrichirals</p> |
| atetrachirals |  <p>Antitetrachirals</p> |

Tabla 4: Tabla resumen de estructuras quirales

Nota: Hu, 2019.

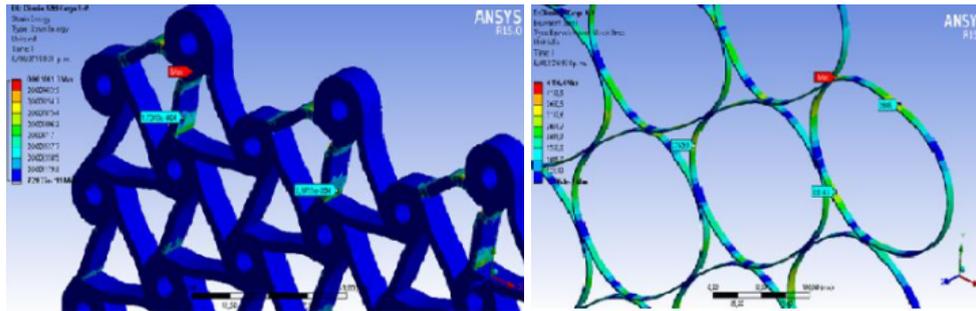


Figura 15: Ejemplo de una geometría quiral en reposo y sometida a tracción.
Nota: Baron Cangrejo, D.A.

Estructuras plegadas

En el caso de textiles de calada, se fabrican creando combinaciones de tejidos sueltos y apretados, es decir, combinando contracciones y elongaciones de los hilos, con el uso de elásticos y no elásticos que tienen diferentes propiedades de estiramiento.

Otras estructuras

En la figura 16 se observa una silicona que ha sido sometida a un esfuerzo de compresión. En la figura 1b, vemos como el patrón de círculos, cambia a elipses reduciendo de manera homogénea tanto el ancho, como el alto de la muestra.

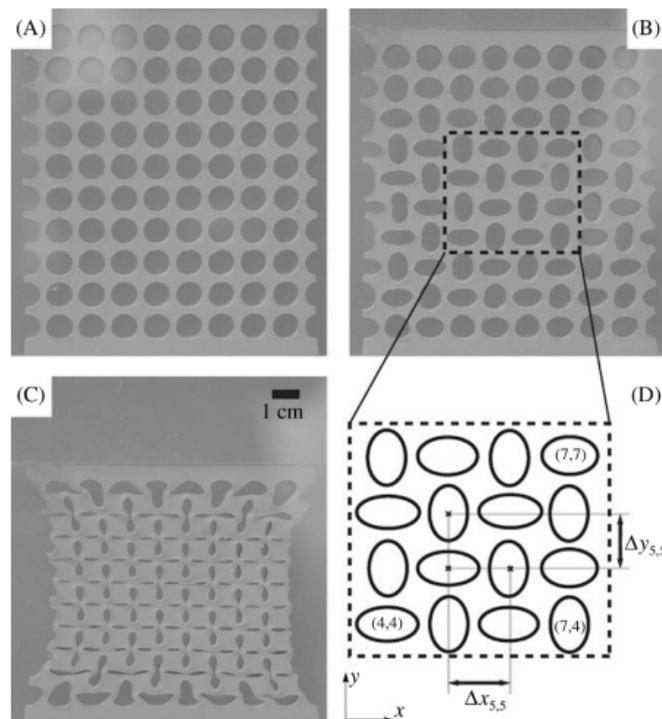


Figura 16: Imágenes del comportamiento auxético del no tejido A bajo dos tensiones distintas a compresión.

Nota: Bertoldi, 2010.

Estas geometrías, son similares a las que presenta el artículo de Barillas, también a las vistas anteriormente en los referentes de las marcas de moda Woldford y Aeron. Desgraciadamente, estas geometrías tienen alta concentración de esfuerzo en sus puntas, lo que hace que no trabajen bien a tracción (Barillas, 2020).

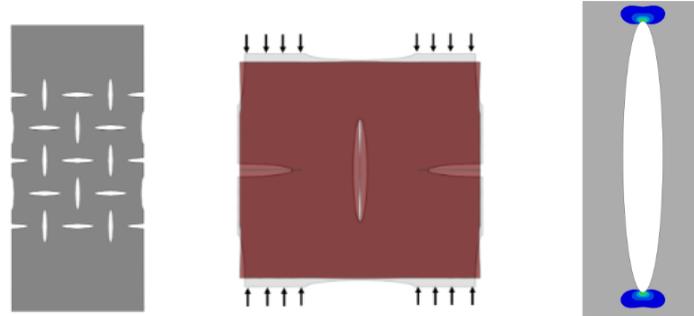


Figura 17: Geometría representativa del patrón con alta concentración de esfuerzo en las puntas al ser sometido a tracción

Nota: Barillas, 2020.

Una de las soluciones propuesta en el artículo es crear en estas geometrías lo que llama un “stop hole”. Éste método consiste en mejorar las geometrías a través de la realización de agujeros (círculos en los extremos de la geometría), que reducen la concentración de esfuerzos. Inspirado en la solución o prevención de grietas en los fuselajes de los aviones. (ver figura 18)



Figura 18: geometría para la mejora de concentración de esfuerzos en los extremos.

Nota: Barillas, 2020.

En el artículo se testean distintas formas para los extremos:

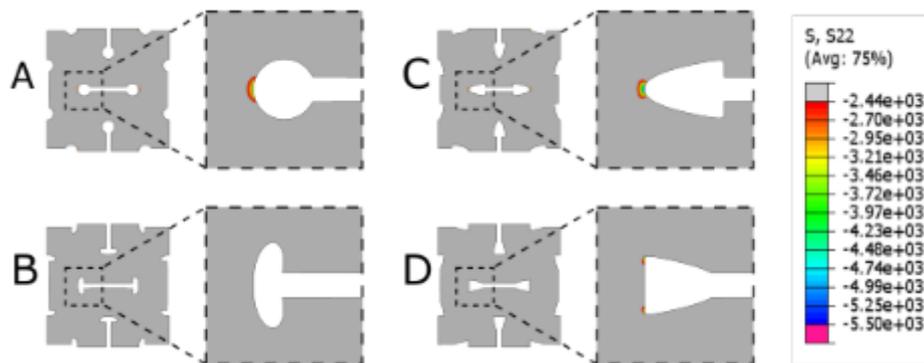


Figura 19: Distintas geometrías testeadas

Nota: Barillas, 2020.

y concluye que:

- La geometría D tiene un comportamiento más auxético que el resto, conforme aumenta el área de la geometría de las puntas (porosity).
- La geometría B es la que reduce hasta un 72% los esfuerzos en los extremos.

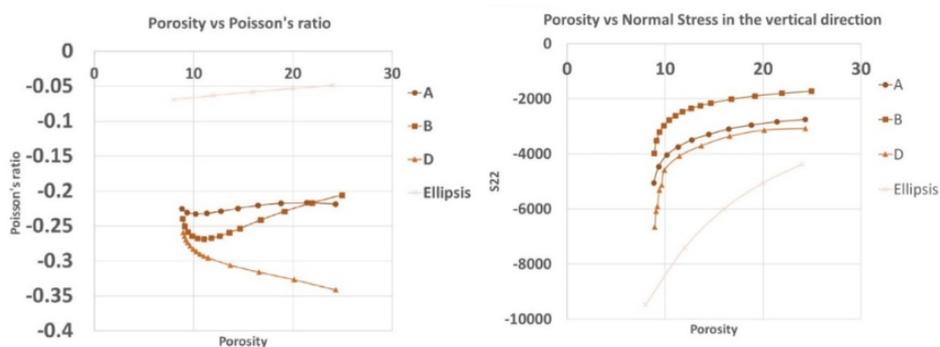


Gráfico 1: Conclusiones sobre las distintas geometrías

Nota: Barillas, 2020.

3.2.3. Tecnología disponibles

Podemos encontrar textiles auxéticos de todos los géneros: punto, calada, no tejidos e incluso composites. Sin embargo, el género de punto es el más utilizado e investigado (Hu, 2019). A pesar de ello, en el marco teórico de nuestra investigación abordaremos también la literatura existente sobre textiles auxético, tanto en el género de calada como en el no tejido.

3.2.2.1 Textiles de calada

Los textiles auxéticos que se confeccionan con hilos convencionales, deben tener dos propiedades importantes: elasticidad e incorporar el efecto de las geometrías auxéticas. La primera nos va a facilitar la deformación de las geometrías que le impongamos y la segunda característica es la que nos va a permitir la adaptabilidad a las formas que estamos buscando.

Según Zulifqa (2018), podemos conseguir un textil auxético utilizando el género de calada tanto si la elasticidad es solo en una dirección (uni-elástico). En este caso, el hilo elástico debe ser la trama. Como si lo es en ambas (bi-elástico), es decir, en este último caso tanto la urdimbre como la trama tendrían propiedades elásticas.

Uni-elástico

Los hilos que poseen esta propiedad, actúan como resorte de retorno y los no elásticos, se utilizan como estabilizadores.

Zulifqar estudia el comportamiento auxético de tejidos unielásticos de calada comparando distintos tipos de geometrías: folded, reentrante y rotatoria y concluyendo que:

Las estructuras plegadas funcionan bien. Sin embargo, en el caso de la geometría rotatoria, se concluye que en el caso del rectángulo, el efecto auxético, no se puede lograr (Zulifqar, 2018):

- La ausencia de elasticidad en el sentido de la urdimbre hace que las celdas cambien de forma sólo en dirección de la trama
- Se obtienen unidades rectangulares irregulares
- La libre rotación de las unidades rectangulares en realidad está restringida debido a la diferencia de elasticidad de la urdimbre y la trama.

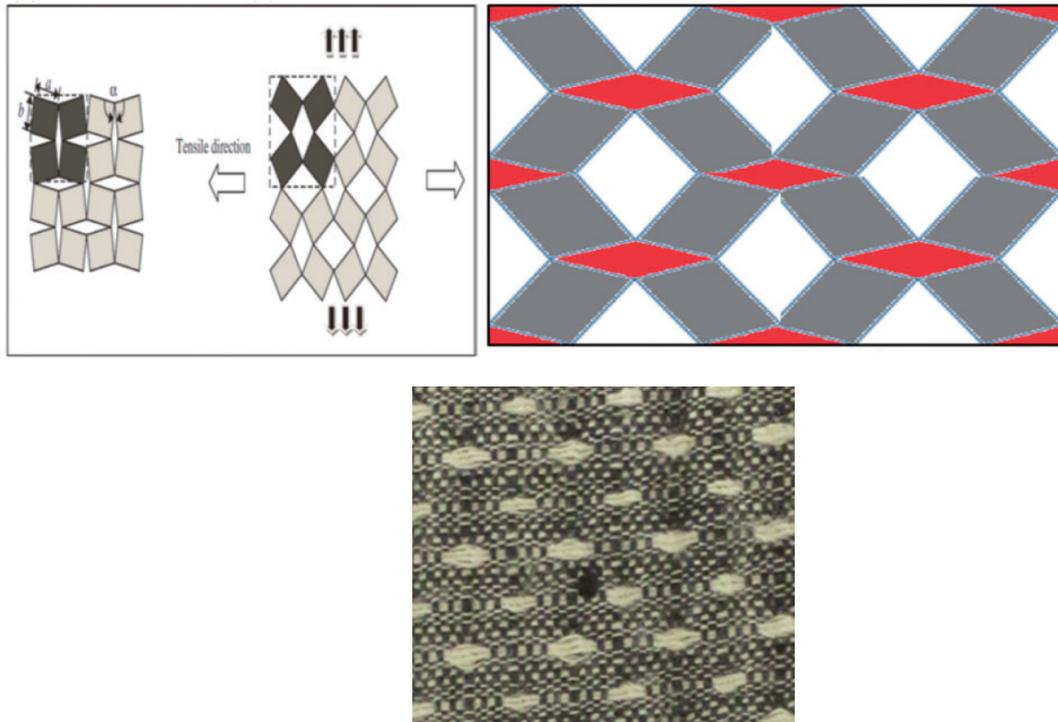


Figura 20: Problemática con las geometrías rotatorias

Nota: Zulifqar, 2018.

Bi-elásticos

La primera pregunta que surge, es cómo se consiguen esta tipología de geometrías en tejidos de calada bielásticos.

La siguiente imagen lo explica de manera muy visual:

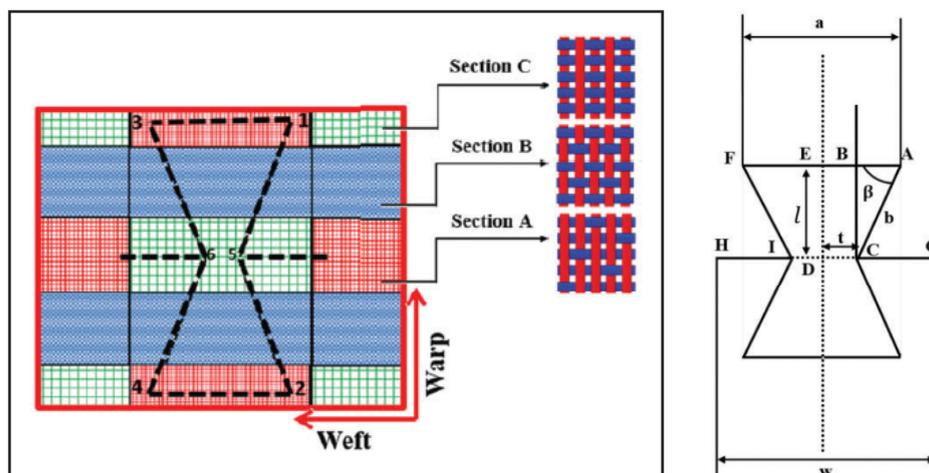


Figura 21: Ejemplo de la consecución de una estructura reentrante en un tejido de calada

Nota: Zulifqar, 2019.

Al contrario que en el caso anterior, el uni-elásticos, las estructuras auxéticas si cumplen su función, tienen comportamiento auxético como puede verse en la siguiente gráfica.

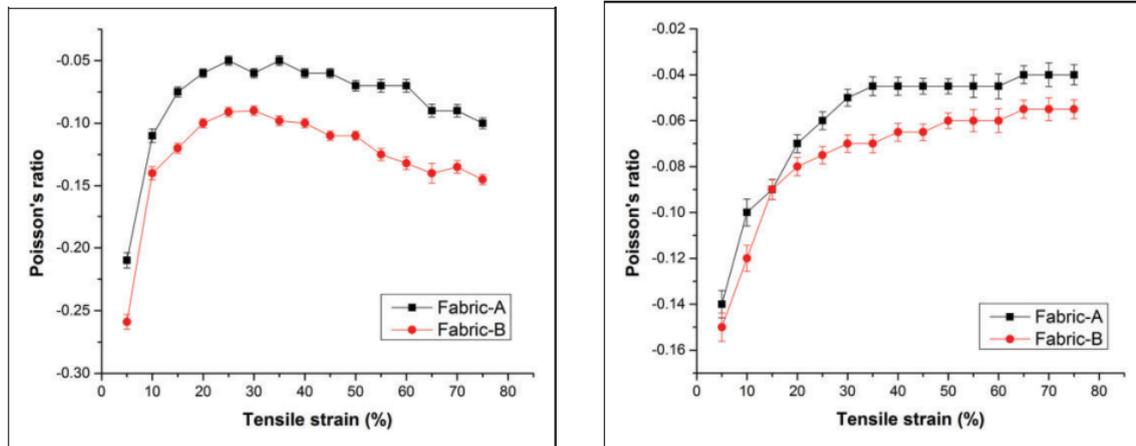


Gráfico 2: Resultados del coeficiente de Poisson cuando aplicamos tensión en sentido de la urdimbre (izquierda), de la trama (derecha).

Nota: Zulifqar, 2019.

En el tejido A se han utilizado hilos no elásticos en la sección A y B (ver figura 21) e hilos elásticos en la sección C, mientras que en el tejido B se utilizan solo hilos elásticos en las tres secciones del tejido.

Como vemos también en la gráfica, el comportamiento auxético del tejido B es mejor que el del tejido A, ya que el coeficiente de Poisson es siempre más negativo.

Puntos a tener en cuenta a la hora de diseñar la experimentación del proyecto:

- El comportamiento auxético del textil estudiado en el artículo es distinto si se ensaya en la dirección de la urdimbre, que si se ensaya en la dirección de la trama.
- La geometría utilizada influye en gran medida en el comportamiento a tracción del tejido. Ya que si aumentamos β , el efecto auxético también aumenta.

3.2.2.2 Textiles de punto

Los textiles de punto son los que más potencial para la utilización de geometrías auxéticas, en tanto en cuanto podemos variar su estructura fácilmente, tienen alta adaptabilidad y alta productividad. Y pueden obtenerse textiles auxéticos tanto con la tecnología de punto por trama, como la de punto por urdimbre

Punto por trama

Ejemplo de estructuras plegables:

Al ser una estructura en 3D, cuando se estira, cada plano del paralelogramo que forma la geometría tridimensional cambia su posición vertical o inclinada con respecto a la superficie de la estructura, lo que hace que aumente en dirección horizontal. Por lo que el comportamiento auxético se logra sin cambiar la forma y el tamaño de los paralelogramos.

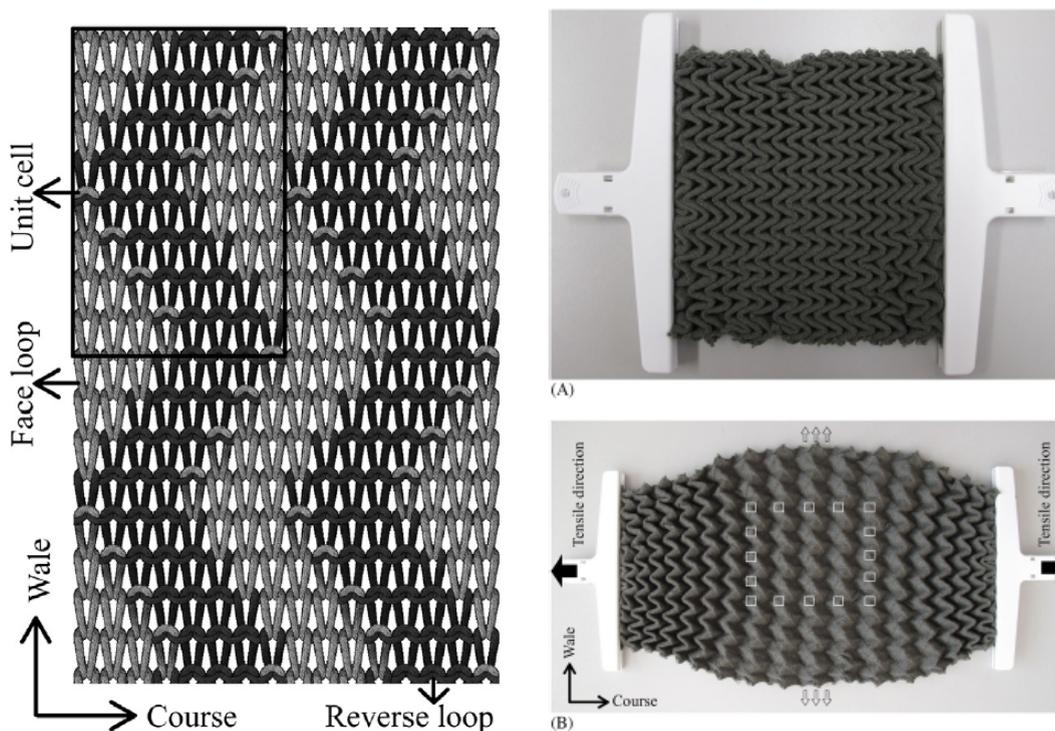


Figura 22: Ejemplos de estructuras de punto por trama con geometrías de tipo plegables.

Nota: Hu, 2019.

En la siguiente gráfica puede verse que el mejor tejido auxético es C12-W12 (curso cuadrado) que los otros dos casos y que en todos los casos, las propiedades auxéticas disminuyen con el aumento de la tensión axial.

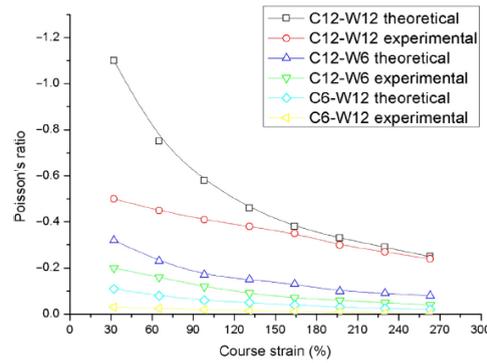


Gráfico 3: Gráfica comparativa de los tres tejidos de punto por trama y geometría plegable ensayados

Nota: Hu, 2019.

Ejemplo de estructuras rotatorias:

En el ejemplo posterior, cada rectángulo se teje secuencialmente en dirección a la pasada y la desconexión entre ellos se realiza dejando puntos sin tomar. Es decir, algunas agujas trabajan para formar la malla y otras no lo harán, para formar las geometrías deseadas.

En la última y la primera pasada de cada uno de los rectángulos, se ha utilizado un hilo elástico de alta resistencia, para evitar que se deshaga.

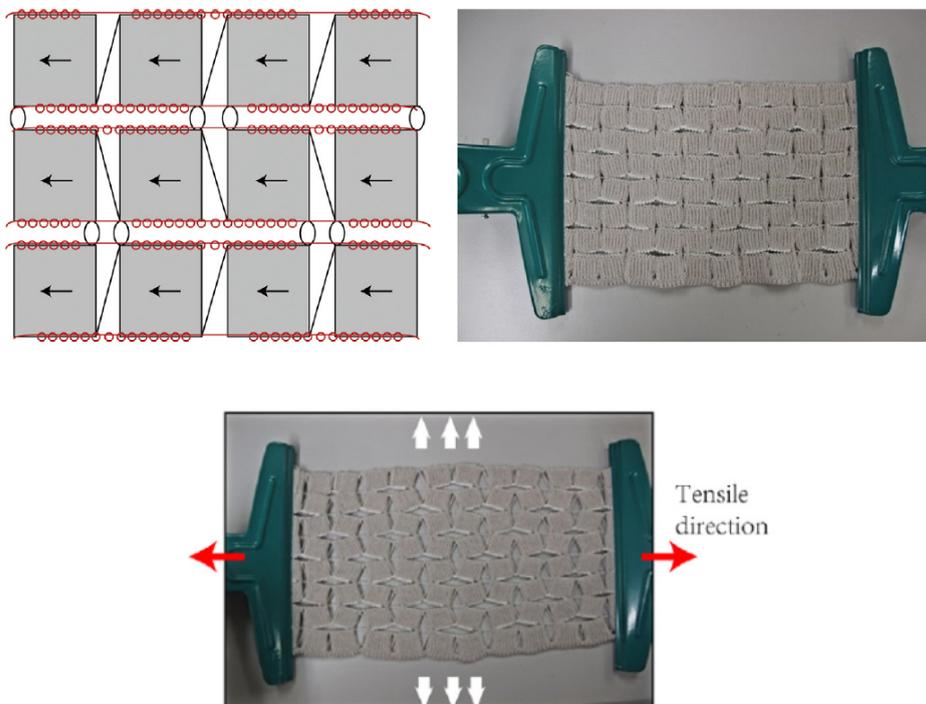


Figura 23: Ejemplos de estructuras de punto por trama con geometrías rotatorias

Nota: Hu, 2019.

Los resultados experimentales demuestran que el tejido del ejemplo solo muestra características auxéticas cuando se tracciona en la dirección de la pasada, aunque en el cálculo teórico lo hiciera en ambos casos.

En la se comparan los resultados calculados y medidos experimentalmente. Sorprendentemente, difieren en dos puntos. Primero, el efecto auxético del textil medido experimentalmente es mucho menor que en el calculado y segundo, en el caso experimental, disminuye conforme aumenta la tensión y en el calculado ocurre todo lo contrario.

Esto se debe a que en el modelo teórico, el rectángulo se ha supuesto rígido y sin embargo, el modelo experimental tiene hilos elásticos y el rectángulo cambia de forma conforme se somete a esfuerzos axiales.

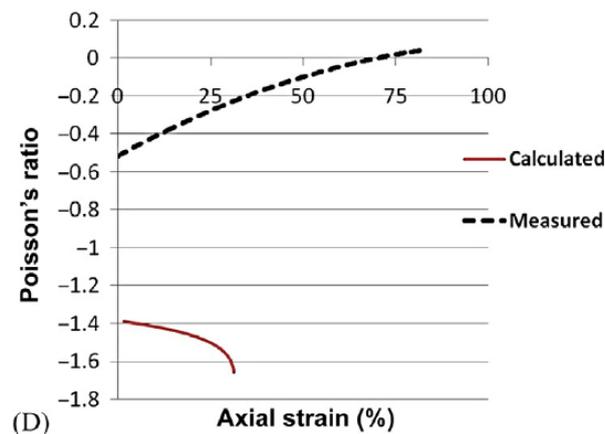


Gráfico 4: Comparativa entre el comportamiento experimental y el calculado

Nota: Hu, 2019.

Ejemplo de reentrantes:

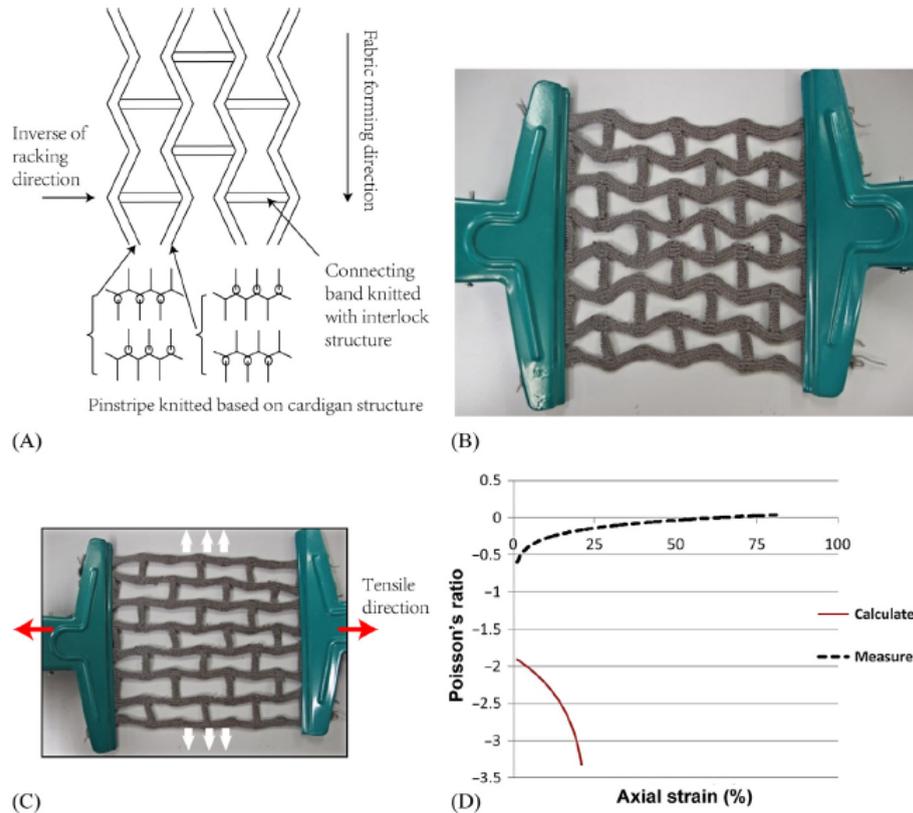


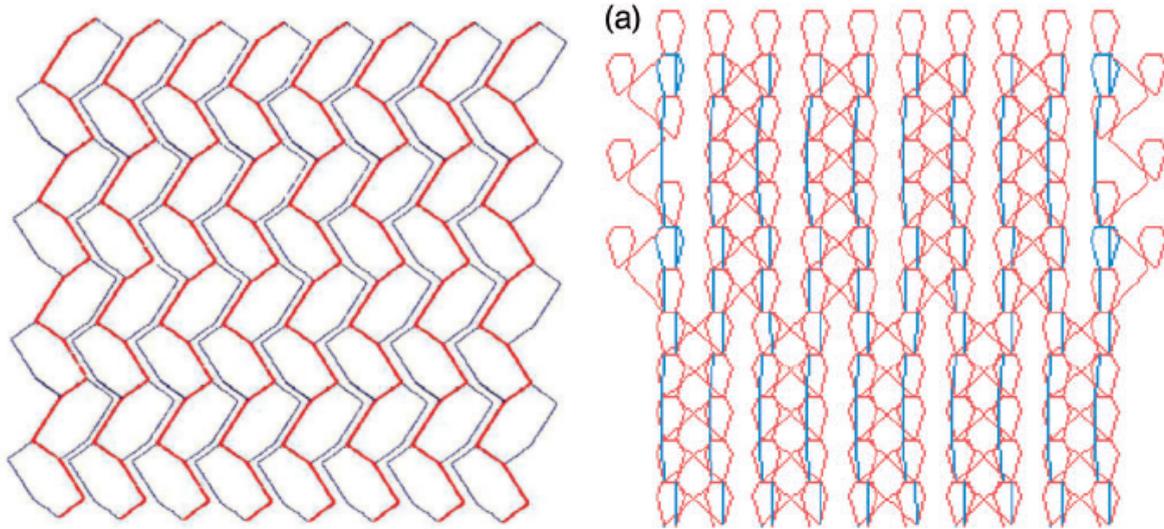
Figura 24: Ejemplo de tejido de punto con geometrías rectangulares re-entrantes utilizado en el estudio.

Nota: Hu, 2019.

En este caso el hilo utilizado no presenta características elásticas, es un hilo acrílico 24/2 Nm. En la figura 28 A, puede verse cómo ha sido fabricado el tejido, la B y C representan el tejido sin someterse a tensión y sometido a tracción, respectivamente. Finalmente, en la gráfica D, ocurre lo mismo que en el apartado anterior.

Punto por urdimbre

Ejemplo de estructuras rotatorias :



| Number | Bar | Setting | Fiber |
|-----------|-----|--|-----------------------|
| Fabric I# | GB1 | 1- 0/ 0- 1/ 1- 1/ 1- 1/ 1- 0/ 0- 1/ 1- 0/ 0- 1/ 1- 1/ 1- 1/ 1- 0/ 0- 1// (Full set) | 40D/12f nylon FDY |
| | GB2 | 1- 0/ 1- 2/ 1- 0/ 1- 2/ 1- 0/ 1- 2/ 2- 3/ 2- 1/ 2- 3/ 2- 1/ 2- 3/ 2- 1// (1 in-1 miss) | 50D/24f polyester DTY |
| | GB3 | 2- 3/ 2- 1/ 2- 3/ 2- 1/ 2- 3/ 2- 1/ 1- 0/ 1- 2/ 1- 0/ 1- 2/ 1- 0/ 1- 2// (1 in-1 miss) | 50D/24f polyester DTY |

Figura 25: Definición del tejido con estructuras rotatoria de lazo hexagonal

Nota: Ma, 2016.

En este caso se testean 4 tipos de tejido de punto por urdimbre que siguen la geometría rotatoria que vemos en la figura 25. Hemos extraído como ejemplo sólo el tejido número 1, debido, ya que es el que mejor comportamiento auxético presenta, como puede observarse en la siguiente gráfica:

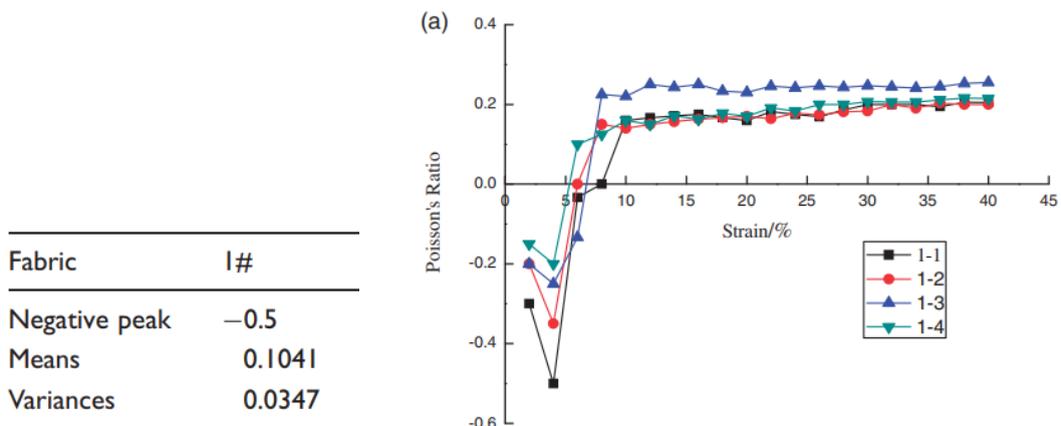


Gráfico 5: Gráfico de coeficiente de Poisson frente a tensión de las cuatro muestras del tejido 1.

Nota: Ma, 2016.

Ejemplo de estructuras reentrante:

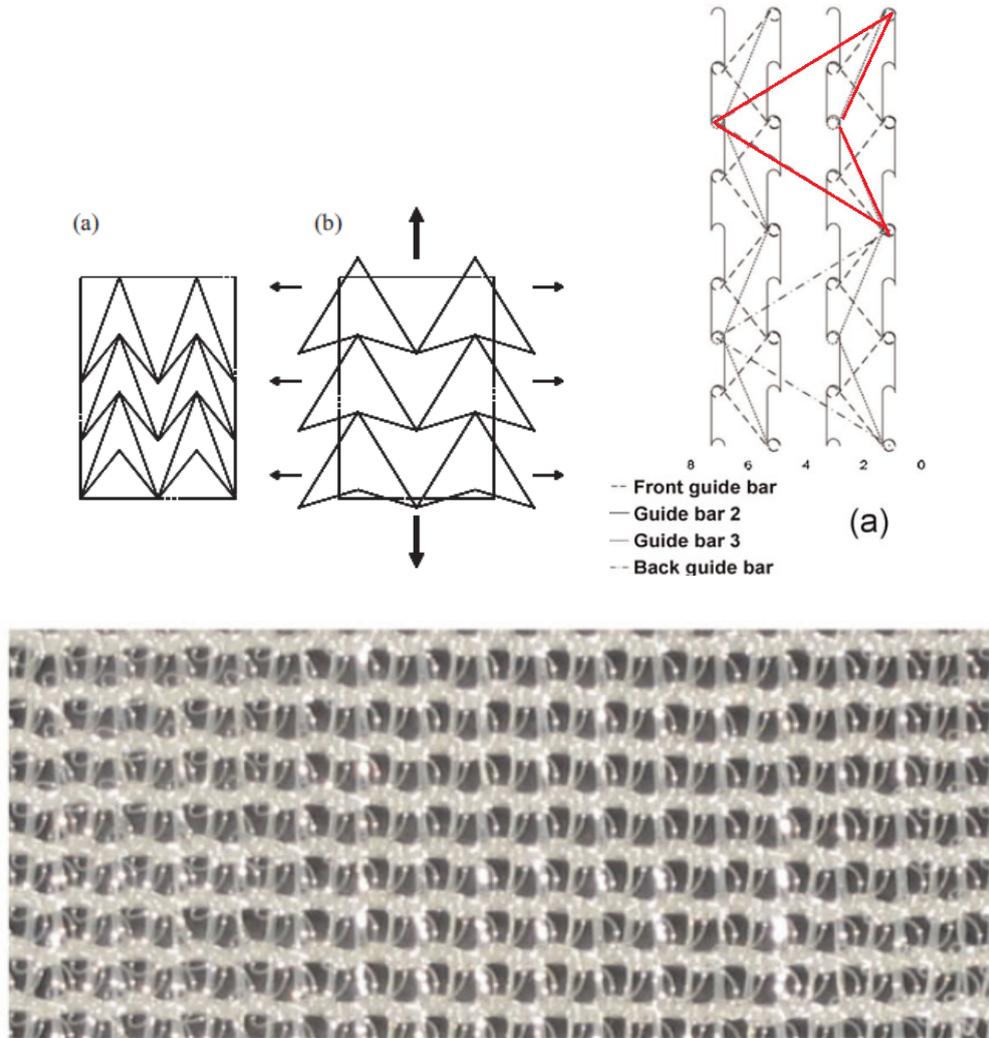


Figura 26: ejemplo de textil de punto con estructuras auxéticas reentrantes

Nota: Alderson, 2012

Se testean 4 tipos de tejido de punto por urdimbre que siguen la geometría reentrante que vemos en la figura 26. En este caso, sólo hemos representado en la figura el tejido número 3, debido a que el 1 y el 2 se concluye que no tienen comportamiento auxético y el 4 cambia ligeramente la geometría estudiada.

Los hilos “front guide bare and guide bar 2” son de elastano y los otros dos son mono-filamento PES.

Se ensayan las muestras en dirección axial, longitudinal y a 45 grados, como se muestra en la siguiente figura:

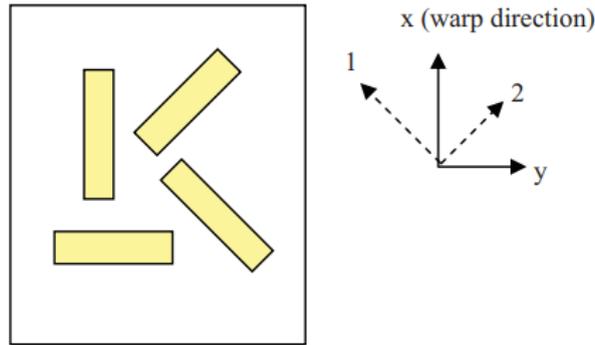


Figura 27: esquema de las direcciones de ensayo del textil.

Nota: Alderson, 2012

Y la tabla siguiente nos muestra que el coeficiente de poisson es ligeramente negativo solo en el caso de ensayar la tela en dirección 45°.

| ν_{xy} | ν_{yx} | ν_{12} | ν_{21} |
|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| 0.11 ± 0.03 | 0.33 ± 0.04 | -0.02 ± 0.02 | -0.13 ± 0.04 |

Figura 28: tabla con los coeficientes de poisson del tejido de punto por urdimbre.

Nota: Alderson, 2012

Ejemplo de Spacer 3D

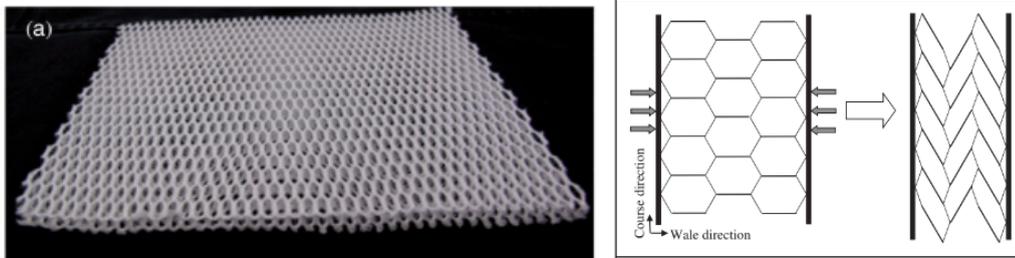


Figura 29: foto de un tejido spacer (izquierda) y esquema del ensayo a compresión (derecha).

Nota: Wang, 2017.

Para el ejemplo de la figura anterior se ensayan 5 textiles que teniendo la misma geometría hexagonal, difieren en el entrelazados de los outlayers. Textil A tiene hilos entre los hexágonos y el C tiene unas celdas hexagonales más pequeñas como puede observarse en la siguiente figura:



Figura 30: Fotografías de las celdas hexagonales de cada uno de los textiles ensayados

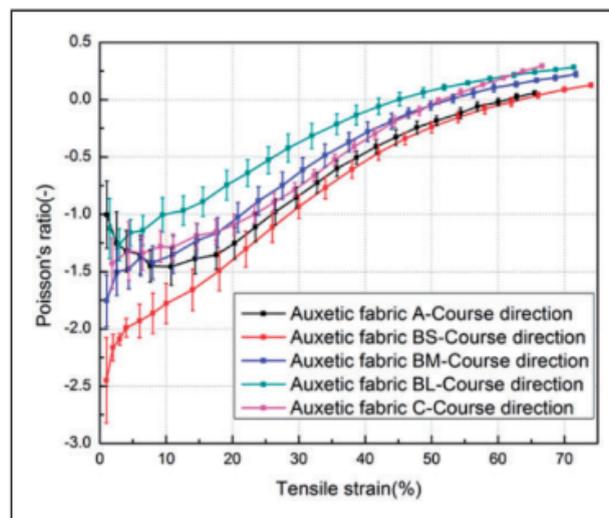
Nota: Wang, 2017.

Además, el Textil B, se divide en otros 2: se construyen para que tengan distintos espesores:

| Fabric name | Base fabric | Compression strain (%) | Thickness (mm) |
|-------------------|-------------|------------------------|----------------|
| Auxetic fabric A | A | 50 | 7.4 |
| Auxetic fabric BS | B | 50 | 7.9 |
| Auxetic fabric BM | B | 45 | 7.8 |
| Auxetic fabric BL | B | 40 | 7.6 |
| Auxetic fabric C | C | 50 | 5.9 |

Figura 31: Definición de las geometrías de cada una de los spacers ensayados.

Nota: Wang, 2017



Gráfica 6: Resultados del coeficiente de Poisson de los spacers sometidos a un esfuerzo de tracción.

Nota: Wang, 2017

3.2.2.3. No tejidos

El ejemplo posterior, analiza dos tipos de no tejidos: el primero es un polímero hecho de policaprolactona de manera convencional y el segundo es el mismo polímero fabricado con micro-spinning.

A continuación con láser se les realiza de geometría auxética rotacional, que se puede ver en la siguiente imagen:

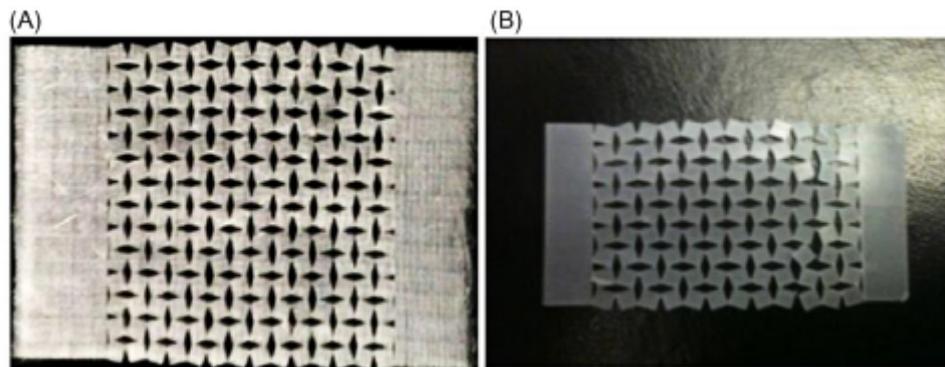


Figura 32: Polímero fabricado con electrospinning (A), polímero convencional (B).

Nota: Hu, 2019

La bibliografía concluye que tanto el PCL convencional como el de microfibras tienen un coeficiente de Poisson negativo de -1,11 y de -1,02 respectivamente.

3.3. La problemática de las formas

Según Fashion Network, el 40% de las mujeres tienen problemas con el tallaje. En el la OCU compara 66 prendas femeninas de la talla 40 y 42, teniendo en cuenta la norma EN13402 sobre medidas corporales orientativas y se obtienen diferencias de hasta 10 cm, lo que implicaría que ambas tallas tienen las mismas medidas (FashionNetwork, s.f.).

El tallaje no solo es un problema que afecta al consumidor, según Baymard, para el 83 % de las tiendas de ropa on-line que no brindan suficiente información sobre las tallas, la incertidumbre causada probablemente tenga un costo financiero y de recursos enorme. Las dudas sobre el tamaño llevan a los clientes a hacer una de estas tres cosas: abandonar su compra, buscar ayuda de los representantes de servicio al cliente o pedir en varios tamaños y devolver los que no se ajusten. (Loboda, 2022).

3.3.1. Body positive y body neutrality

El movimiento body positive ha ganado una gran fuerza en los últimos años como una respuesta a los estereotipos de belleza idealizados que se promueven en la sociedad. Este movimiento busca la inclusión de todas las formas y tamaños corporales en la moda. Sin embargo, el body positive ha evolucionado hacia un enfoque más inclusivo y neutral con el body neutrality, que busca aceptar todas las formas corporales sin hacer hincapié en el tamaño o la apariencia.

La moda ha sido un campo especialmente afectado por la problemática del tallaje, donde la ropa solo se produce en tamaños estandarizados que no reflejan la diversidad de los cuerpos humanos. La demanda del movimiento body positive y body neutrality ha llevado a algunos fabricantes y retailers de ropa a expandir su oferta de tallas para crear prendas que se ajusten a las necesidades de una amplia variedad de tamaños y formas corporales. Esto lo han conseguido a través de prendas oversize, gomas o lazos, algo que es insuficiente para el público al que se dirigen.

En resumen, el movimiento body positive y body neutrality tienen una relación significativa con la moda, ya que buscan fomentar la inclusión y la aceptación de todas las formas corporales. La expansión de las tallas en la moda es un paso importante para satisfacer las necesidades de los cuerpos humanos diversos, pero no suficiente (O'Connor, 2021), (Daniels, 2018).

Es por ello que con este proyecto, intentamos buscar alternativas a las soluciones que existen ahora mismo en el mercado.

Si a los movimientos anteriores, unimos el hecho de que, la prescriptora de tendencias Lidewij Edelkoort sobre SS23, anuncia la necesidad de:

- Actualizar las prendas hacia la moda genderless, lo que exige la adaptabilidad de las prendas.
- Existe un énfasis de artículos a medida, lo que implica una necesidad de un proceso productivo rápido y versátil.
- La moda se aleja del jersey y se acerca a los tejidos, por lo que hay una necesidad de realizar una elección de tejidos acorde.

El 26 % de los consumidores de la Generación Z ahora esperan experiencias personalizadas basadas en sus hábitos y preferencias de compra, según Euclid Analytics (Loboda, 2022).

Algunas empresas ya han propuesto sus soluciones a la exigencia de artículos a medida y customizados, y es la tecnología láser la que mejor cubre estas necesidades. Además, empresas como Jenealogia y Bershka colaboran para proporcionar customización de denim en la misma tienda (Sarmiento, 2022).

E incluso existen patentes de producción con corte láser que dotarían de rapidez y customización a la confección de prendas a medida.

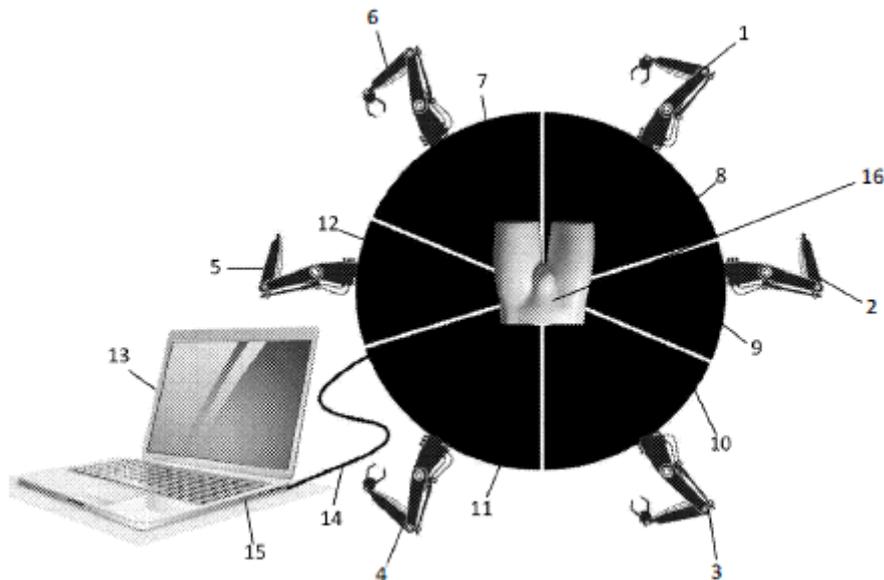


Figura 33: Ejemplo la rueda de producción para la confección de un producto con tecnología láser.
Nota: Campbell, JR. (2020).

4. Parte experimental

Una vez analizado el estado del arte, se propone una experimentación sobre distintos soportes textiles, en la que, utilizando la técnica del corte láser para la realización de las geometrías auxéticas en tejidos ya existentes, se analice el comportamiento auxético de los mismos.

4.1. Equipos y materiales

4.1.1. Equipos

Máquina de corte láser

La experimentación de corte láser de geometrías auxéticas sobre textiles es un proceso innovador que busca explorar las propiedades únicas de los materiales textiles cuando se les aplica una estructura auxética.

Para ello se ha utilizado una máquina de corte láser de la marca BODOR, modelo I3 versión antigua, con software es RDWorks v.8.01.

Características técnicas:

- El área de trabajo es de aproximadamente 1m²
- Potencia 2000 w
- Control numérico
- Eje X/Y--Precisión de posicionamiento: 0.01 mm
- Eje X/Y--Precisión de reposicionamiento: 0.004 mm
- Eje X/Y--Máxima velocidad de movimiento: 65 m/min



Figura 34: máquina láser utilizada para cortar las geometrías auxéticas sobre el material textil.

Nota: elaboración propia.

A priori, la utilización del láser para cortar las geometrías podría dar lugar a pensar que obtendremos tejidos deshilachados. Sin embargo, al emplear fibras sintéticas en todos los casos, el corte mediante láser logra fundir la fibra, evitando así el deshilachado de los tejidos.

En las siguientes figuras se muestra el corte de un tejido denim, en el cual se observa el deshilachado debido a que se trata de un tejido de calada compuesto al 100% de algodón. Sin embargo, en los tejidos seleccionados, este fenómeno no se presenta. Únicamente se observa en el tejido dos después de someterlo a cizallamiento en el dinamómetro.



Figura 35: Foto de tejido denim tratado con corte láser.

Nota: elaboración propia.

Dinamómetro

Para el ensayo de tracción de las muestras se utiliza un dinamómetro de la marca Zwick/Roell modelo Proline Z005 cuyas características técnicas son las siguientes:

Z005, Z010

| Type Item No. | Z005 TN 059008 | Z005 TH ¹⁾ 1097346 | Z010 TN 059010 | Z010 TH ²⁾ 059011 | |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| Test load F_{max} | 5 | 5 | 10 | 10 | kN |
| Test area | | | | | |
| Height, travel distance of the moving crosshead | 1000 ³⁾ | 1400 ³⁾ | 980 ³⁾ | 1380 ³⁾ | mm |
| Width | 440 | 440 | 440 | 440 | mm |
| Load frame | | | | | |
| Dimensions | | | | | |
| Height with leveling elements | 1340 ... 1345 | 1740 ... 1745 | 1340 ... 1345 | 1740 ... 1745 | mm |
| Width | 770 | 770 | 770 | 770 | mm |
| Width with machine electronics | 917 | 917 | 917 | 917 | mm |
| Depth with machine electronics | 439 | 439 | 439 | 439 | mm |
| Weight | | | | | |
| With machine electronics, approx. | 110 | 125 | 135 | 150 | kg |
| Connection, stud | Ø 20 | Ø 20 | Ø 20 | Ø 20 | mm |
| Average noise level at v_{max} measured at 1 m distance from the front of the machine | 59 | 59 | 57 | 57 | dB(A) |
| Drive system | | | | | |
| Crosshead speed v_{min} ... v_{max} | 0.0005 ... 1500 ⁴⁾ | 0.0005 ... 1500 ⁴⁾ | 0.0005 ... 1000 ⁴⁾ | 0.0005 ... 1000 ⁴⁾ | mm/min |
| Crosshead return speed, max. | 2000 ⁴⁾ | 2000 ⁴⁾ | 1500 ⁴⁾ | 1500 ⁴⁾ | mm/min |
| Deviation from the set drive speed, max. | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | % of v_{actual} |
| Drive travel resolution | 0.0348 | 0.0348 | 0.0232 | 0.0232 | µm |
| Power input specifications | | | | | |
| Power supply | 230 | 230 | 230 | 230 | V, 1Ph/N/P E |
| Power consumption (full load), approx. | 800 | 800 | 800 | 800 | VA |

Figura 36: características técnicas del dinamómetro.



Figura 37: Foto del dinamómetro utilizado en los ensayos.

Nota: elaboración propia.

Regla

Se utiliza una regla de acero para medir el estrechamiento de las muestras a medida que se les aplica tensión

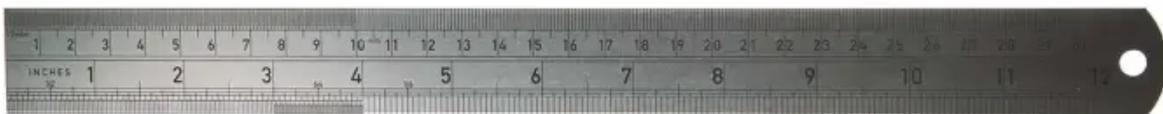


Figura 38: Imagen de la regla de acero

Nota: elaboración propia.

4.1.2. Textiles propuestos

Considerando la investigación previa, se seleccionan cinco tejidos que presentan características bielásticas. No obstante, cada uno de ellos tiene una bielastividad única. Además se busca incorporar a la investigación una amplia diversidad de gramajes y composiciones.

Tejido 1: Neopreno

Spacer con recubrimiento estampado a través de devoré.

Codificación: T1

- Composición: 64% Poliéster, 34% Viscosa, 2% Elastano
- Ancho de acabado: 144 cm
- Peso (g/m²): 269
- Tipo de tejido: Spacer
- Color: blanco, estampado
- Uso: Faldas, Chaquetas y Chalecos
- Condiciones de mantenimiento y uso:

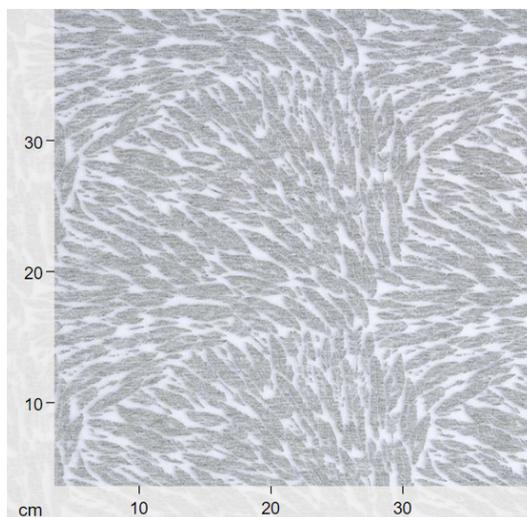


Figura 39: Imagen a escala del tejido 1, derecho y revés del tejido 1 (de arriba a abajo).
Nota: Neopreno scuba plumas estampadas con calor – blanco - Telas buceo- telas.es, s.f.

Tejido 2: Gabardina Stretch

Es un tejido stretch que se ajusta perfectamente al cuerpo.

Codificación: T2

- Composición: 95% Poliéster, 5% Elastano
- Ancho de acabado: 146 cm
- Peso (g/m^2): 190
- Tipo de tejido: calada, ligamento tafetán.
- Color: gris oscuro
- Aplicación: Pantalones, faldas, vestidos
- Condiciones de mantenimiento y uso:

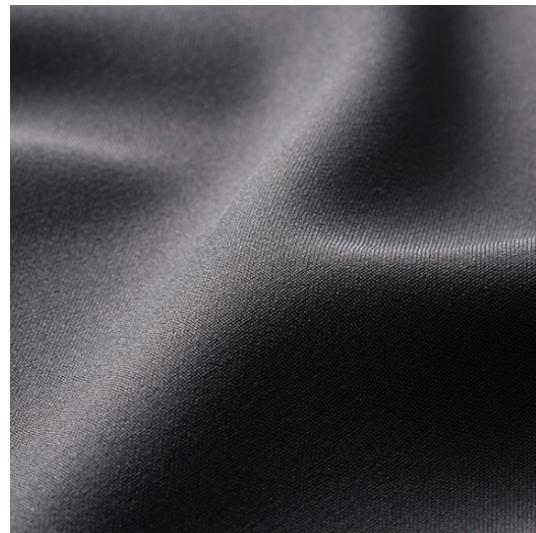
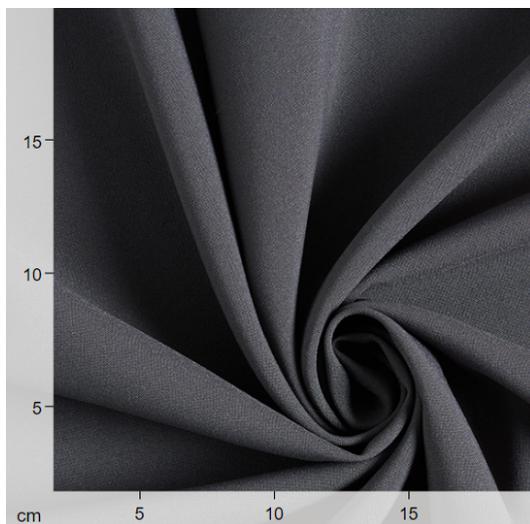


Figura 40: Imagen a escala del tejido 3, derecho y revés del tejido 3 (de arriba a abajo).
Nota: Gabardina Bi-Stretch – gris oscuro - Telas de gabardina- telas.es. (s. f.)

Tejido 3: Jersey Performance Active Wear

Tejido de microfibra cuya composición y acabados le aportan propiedades especiales perfectas para ropa deportiva.

Codificación: T3:

- Composición: 40% Trevira Bioactive (poliéster ignifugado), 40% Poliéster reciclado, 20% Elastano
- Ancho de acabado: 140 cm
- Peso (g/m^2): 240
- Tipo de tejido: punto por trama, ligamento interlock
- Color: verde oliva
- Aplicación: Deporte/funcionales, leggings, ropa de baño
- Otros: resistente a la luz UV, transpirable, equipado antibacterial, resistente al cloro, resistente al agua salada.
- Certificados: Oeko-Tex Standard 100 Clase del producto I
- Condiciones de mantenimiento y uso:

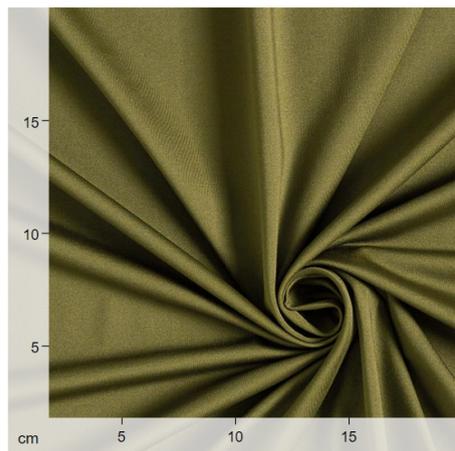


Figura 41: Imagen a escala del tejido 4, derecho y revés del tejido 4 (de arriba a abajo).
Nota: Tela de jersey PERFORMANCE uni – oliva oscuro | Hamburger Liebe | Albstoffe - Telas de jersey- telas.es. (s. f.)

Tejido 4: Tela de traje de baño

Tela de bañador de tacto liso y caída suave.

Codificación: T5

- Composición: 85% Poliamida, 15% Elastano
- Ancho de acabado: 152 cm
- Peso (g/m^2): 190
- Tipo de tejido: punto por trama, ligamento interlock
- Color: azul turquesa
- Aplicación: Deporte/funcionales, leggings, camisetas, ropa de baño
- Condiciones de mantenimiento y uso:



- Certificados: Oeko-Tex Standard 100 Clase del producto I

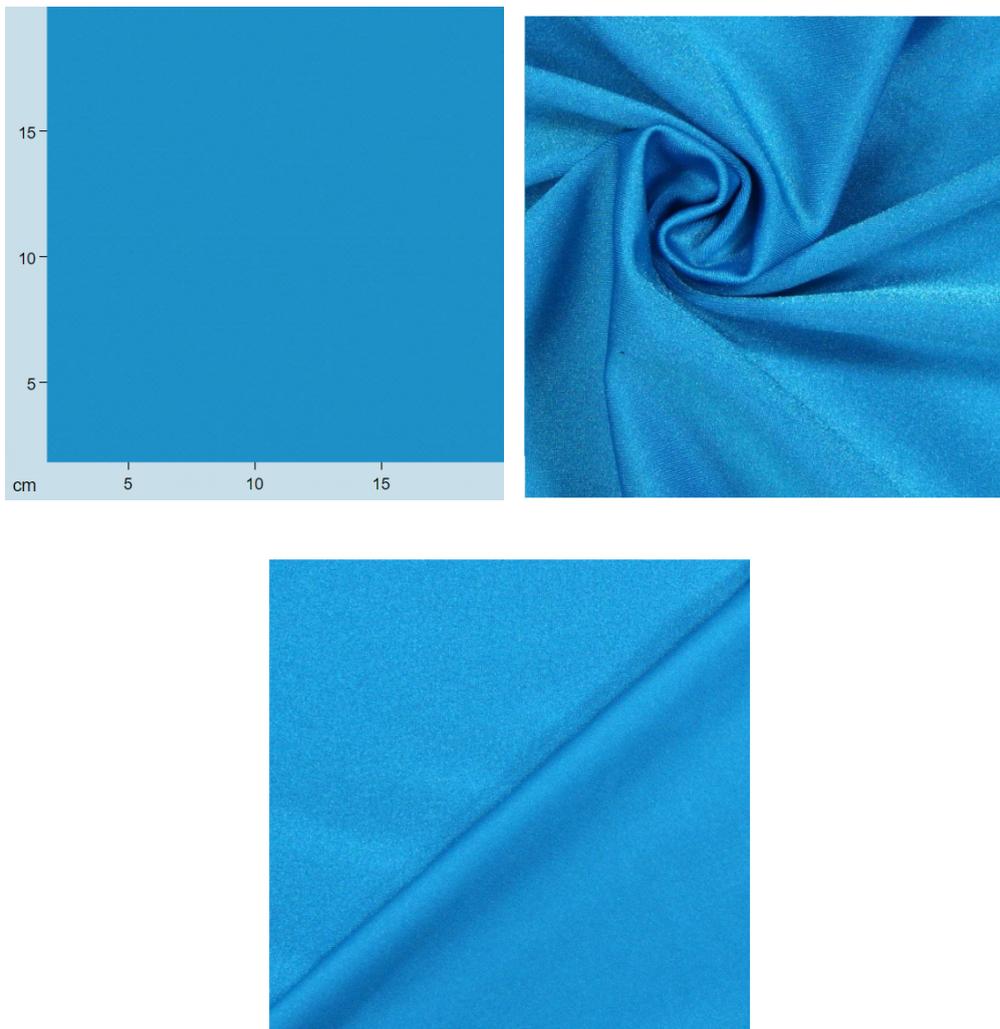


Figura 42: Imagen a escala del tejido 4, derecho y revés del tejido 5 (de arriba a abajo).
Nota: Tela para traje de baño – turquesa - Telas de jersey- telas.es. (s. f.)

4.2. Procedimiento experimental

4.2.1. Geometrías propuestas

Para el procedimiento experimental, se elegirá al menos una geometría de cada tipo: re-entrante, rotatoria y quiral. Descartamos las geometrías plegables, debido a la imposibilidad tecnológica de conseguir dichas estructuras con la técnica de fabricación de las muestras elegidas.

- Geometría 1: re-entrante, estrellada (G1):** La aparición posterior de esta geometría en el proyecto (aunque está codificada como geometría 1), se debe a que se optó por seleccionar inicialmente la forma triangular reentrante de punta de flecha (G2). Sin embargo, al analizar las muestras cortadas y estirarlas en dirección longitudinal, se observó una deformación asimétrica de la geometría triangular, mientras que la geometría estrellada mostró una mayor simetría. Además, la simetría estrellada no solo cumple con la función requerida, sino que también ofrece una estética más atractiva, lo cual, en el caso de que los resultados lo respalden incrementaría su aplicabilidad en el campo de la moda.

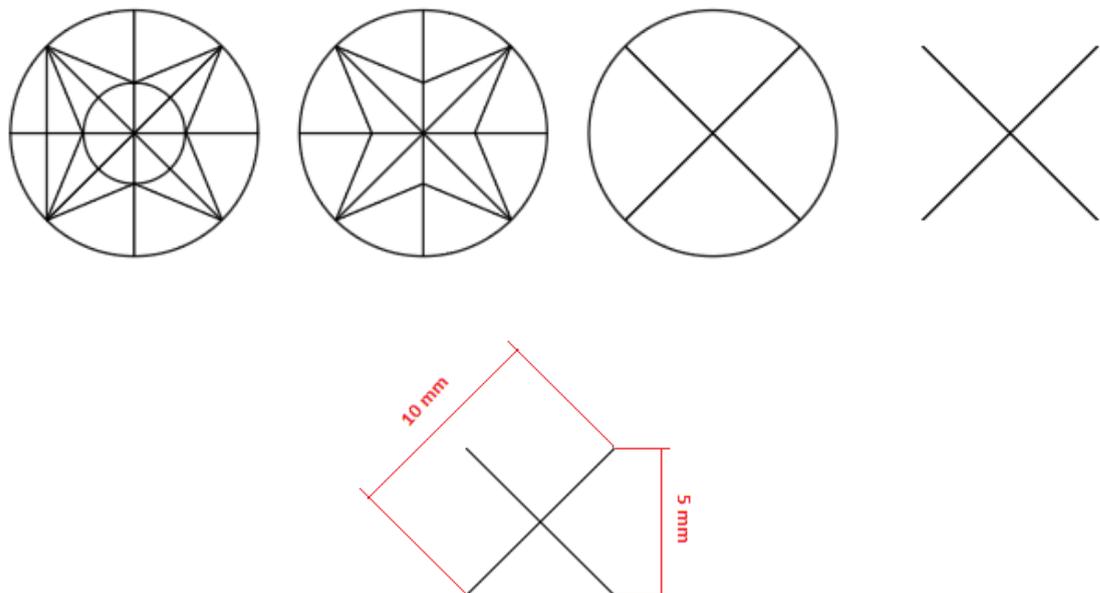


Figura 43: progresión del desarrollo y dimensiones de la geometría reentrante, estrellada.

- Geometría 2: re-entrante, triangulares, forma de flecha (G2):** el desarrollo de las geometrías reentrantes (tanto la estrellada como la de punta de flecha) siguió una progresión específica. Inicialmente, nos basamos en la literatura teórica que sugería utilizar una estrella o un triángulo en punta de flecha. Sin embargo, durante el proceso, identificamos que al simplificar la geometría a una cruz o a tres líneas que se unen en el centro de una circunferencia, además de facilitar el corte láser, logra una mayor capacidad de deformación. Esta capacidad, a su vez, resultará en una mejor adaptabilidad al cuerpo.

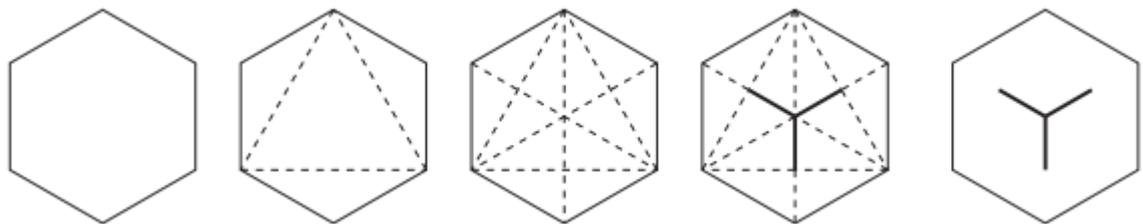


Figura 44: progresión del desarrollo de la geometría reentrante punta de flecha.

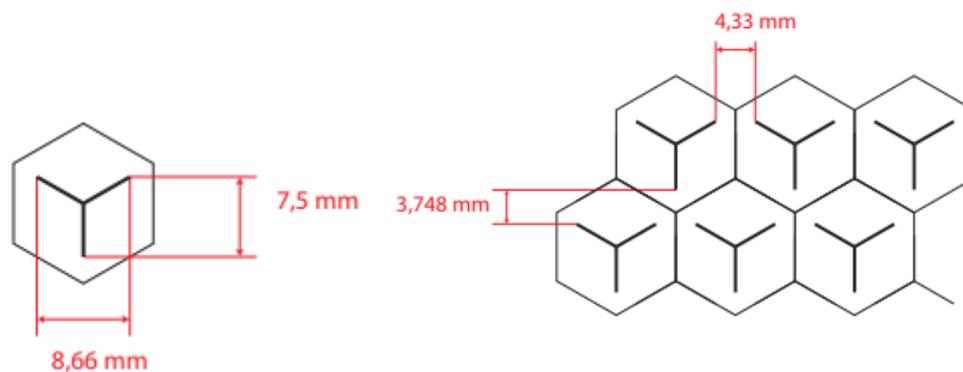


Figura 45: Dimensiones de la geometría reentrante punta de flecha

- Geometría 3: rotatoria.** Dado que las geometrías de rectángulos y cuadrados rotatorios ya han demostrado ser exitosos en tejidos de punto y calada, se plantea llevar a cabo la experimentación con geometrías de elipses, la cual se asemeja a los rectángulos rotatorios. En el marco teórico, esta geometría se encuentra ejemplificada en varias investigaciones y ejemplos de aplicación. Ver figura 1 y 6. Además, al redondear los extremos,

como nos indica Barillas, se logra reducir la concentración de tensiones (Barillas, 2020).

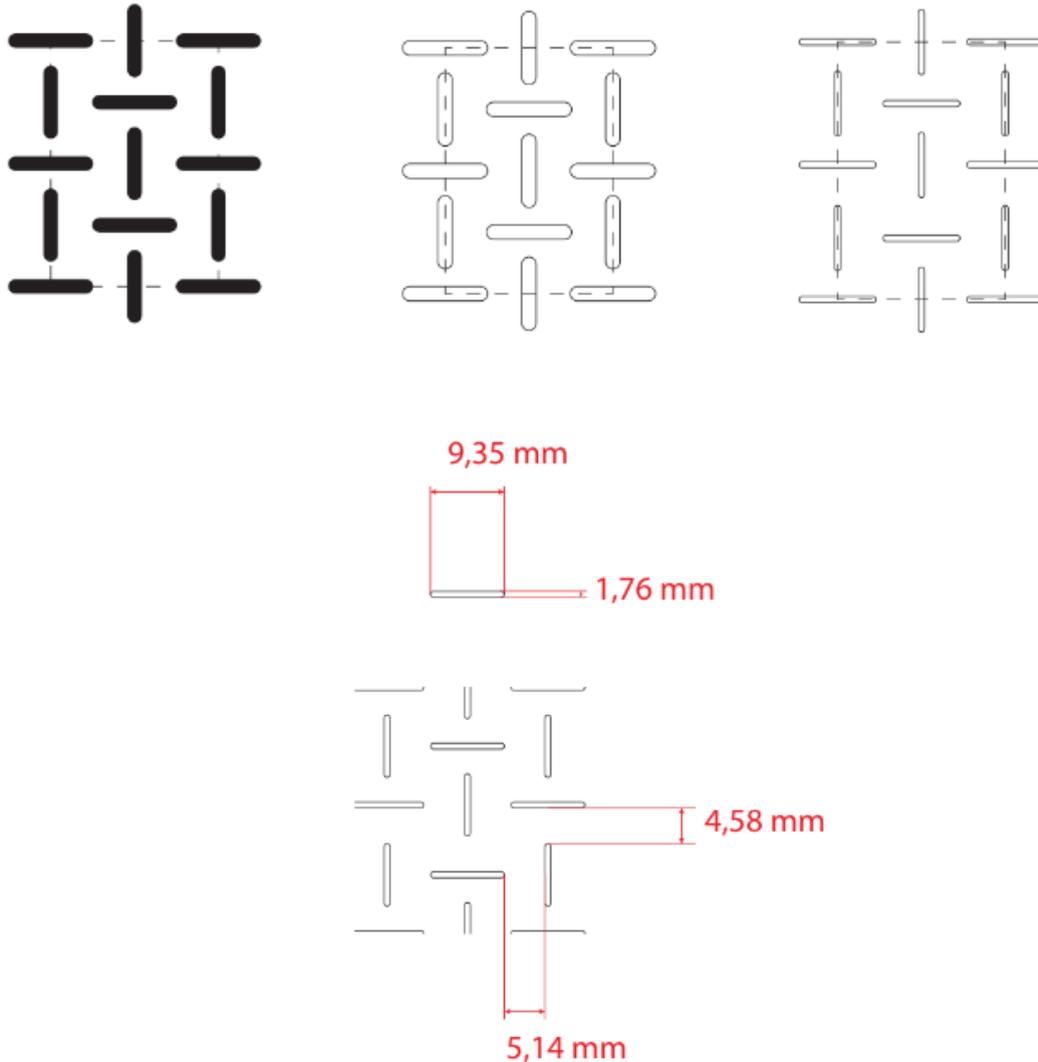


Figura 46: Desarrollo y medidas de la geometría 3

- Geometría 4: Hexa-quiral (G4):** En este caso particular, se ha observado una falta de información bibliográfica disponible sobre la aplicación de este tipo específico de geometrías en tejidos. Aunque se ha identificado un estudio por elementos finitos realizado por Baron Cangrejo que aborda este tema, la cantidad de literatura existente es limitada. Además, se ha encontrado una notable ausencia de ejemplos prácticos o aplicaciones concretas relacionadas con estas geometrías en tejidos.

Por lo tanto, la elección de la geometría hexa-quiral se basa en seguir la línea de geometrías triangulares reentrantes y circulares utilizados en la rotatoria.

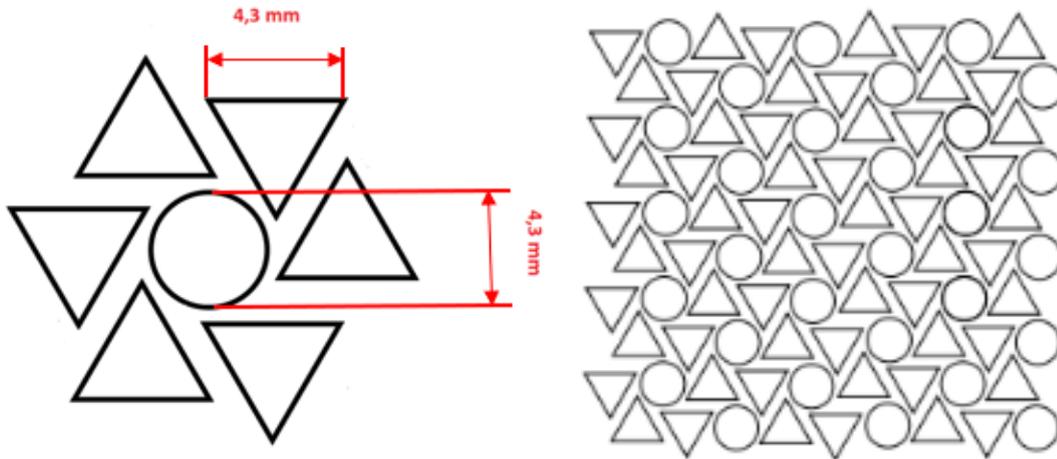


Figura. 47: Desarrollo y medidas de la geometría 4

4.2.2. El corte láser

Basándonos en el análisis previo de tendencias, presentado en la sección 3.3. de la investigación, donde se identifica la creciente demanda de prendas personalizadas, tanto en el ámbito minorista como en el mayorista, así como la existencia de patentes relacionadas con la producción de prendas a medida con corte láser (Campbell, 2020), hemos optado por la tecnología láser como una solución idónea para alcanzar nuestros objetivos de customización y agilidad en la obtención de geometrías, incluso en prenda terminada .

Una máquina de corte láser utiliza un rayo láser de alta potencia para cortar materiales. El rayo se enfoca a través de una serie de lentes y se dirige hacia el material a cortar, en este caso el soporte es textiles. En ese punto se convierte en calor y vaporiza o derrite el material.

El movimiento del cabezal de corte y la intensidad del láser se controlan a través del software. Para la experimentación se probaron primero los textiles con el fin de definir las potencias y velocidades de corte adecuadas para los textiles. En todos los casos a excepción del tejido 5, fue posible cortar con los siguientes parámetros:

- Potencia: 40% de la potencia total de la máquina
- Velocidad: 100% de la velocidad máxima.

En el caso del tejido 5, al realizar los cortes con estos parámetros, se observó que las geometrías sufrían deformaciones y los bordes se quemaban, lo que podría ocasionar daños en el tejido. Como resultado, los datos obtenidos no serían fiables y la aplicabilidad del tejido se vería comprometida.

Como resultado los parámetros utilizados para el tejido fueron:

- Potencia: 35% de la potencia total de la máquina
- Velocidad: 100% de la velocidad máxima.

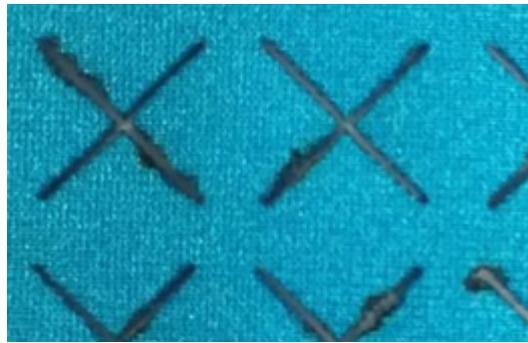


Figura 48: Vista de las geometrías sobre el tejido 4 a potencias altas.

Nota: elaboración propia.

A potencias menores no era posible realizar el corte.

Se cortan 3 muestras de cada tejido por cada una de las geometrías:

- 3 muestras de 10x5 cm

| Tejido/Geometría | Geometría 1 | Geometría 2 | Geometría 3 | Geometría 4 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tejido 1 | X | X | X | X |
| Tejido 2 | | X | X | X |
| Tejido 3 | X | X | X | X |
| Tejido 4 | X | X | X | X |

Tabla 5: Tabla de prototipos realizados, con combinación de geometrías y tejidos

Ejemplos de alguno de los resultados del corte láser de las geometrías sobre los textiles en imágenes:

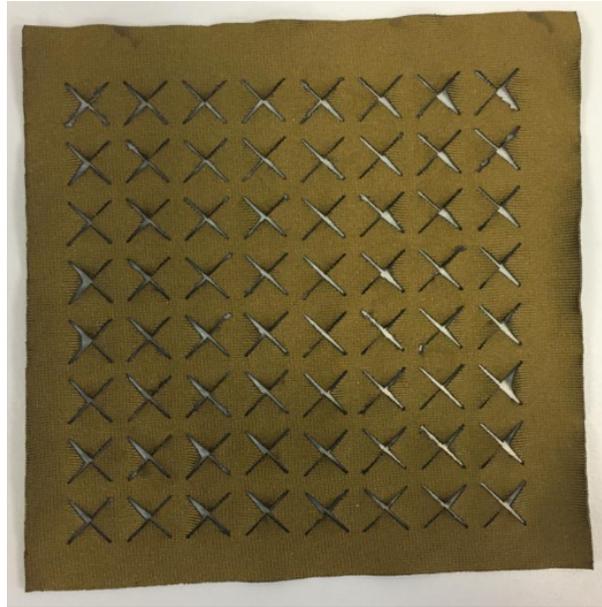


Figura 49: Ejemplo de resultado de corte láser sobre el tejido 3 y con la geometría 1
Nota: elaboración propia.

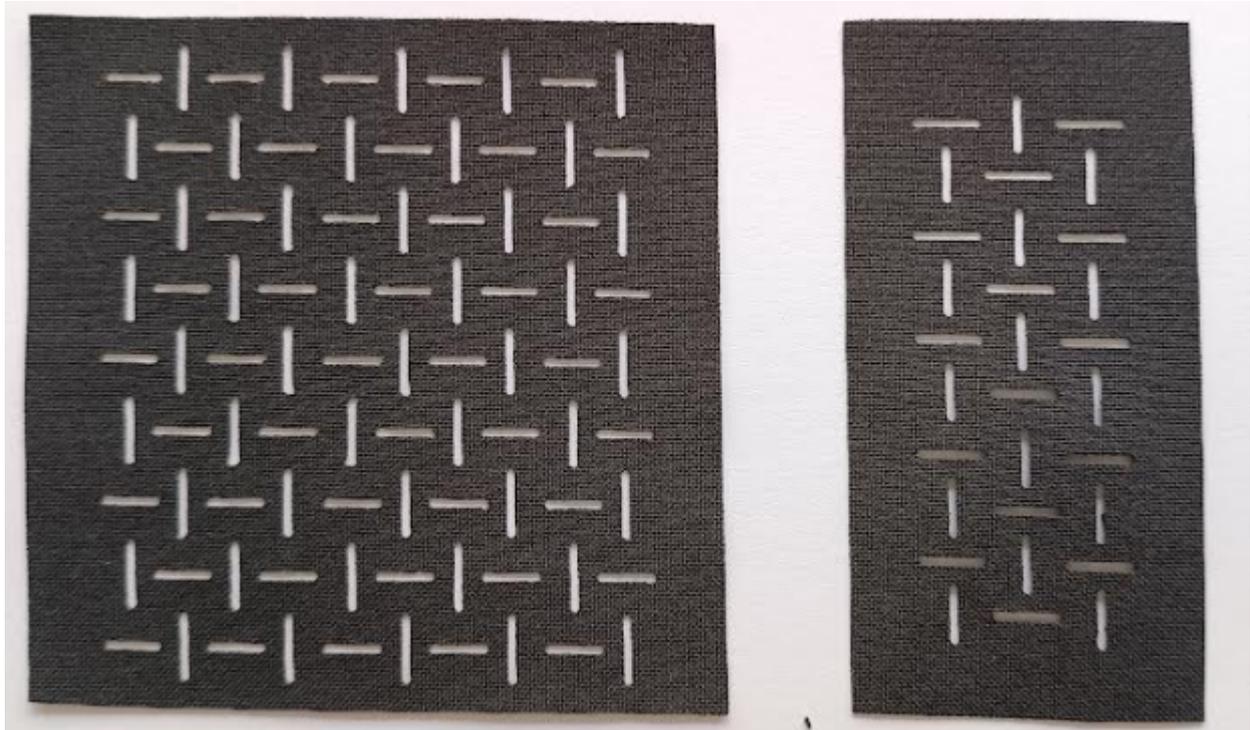


Figura 50: Ejemplo de resultado de corte láser sobre el tejido 2 y con la geometría 3.
Nota: elaboración propia.

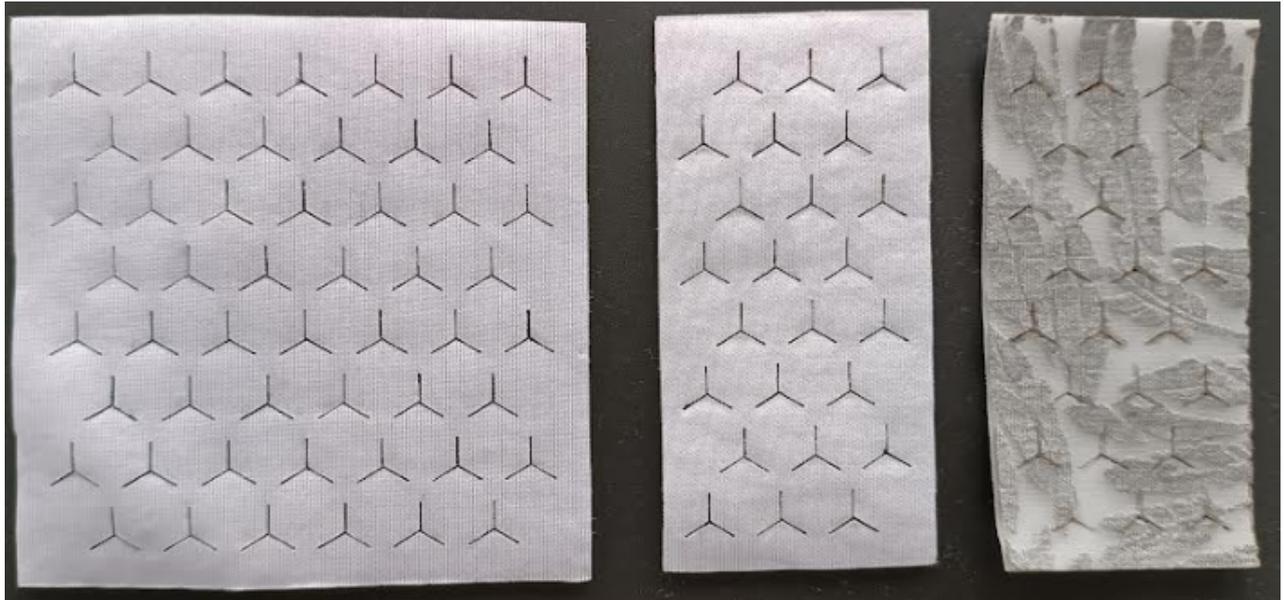


Figura 51: Ejemplo de resultado de corte láser sobre el tejido 1 y con la geometría 2.

Nota: elaboración propia.

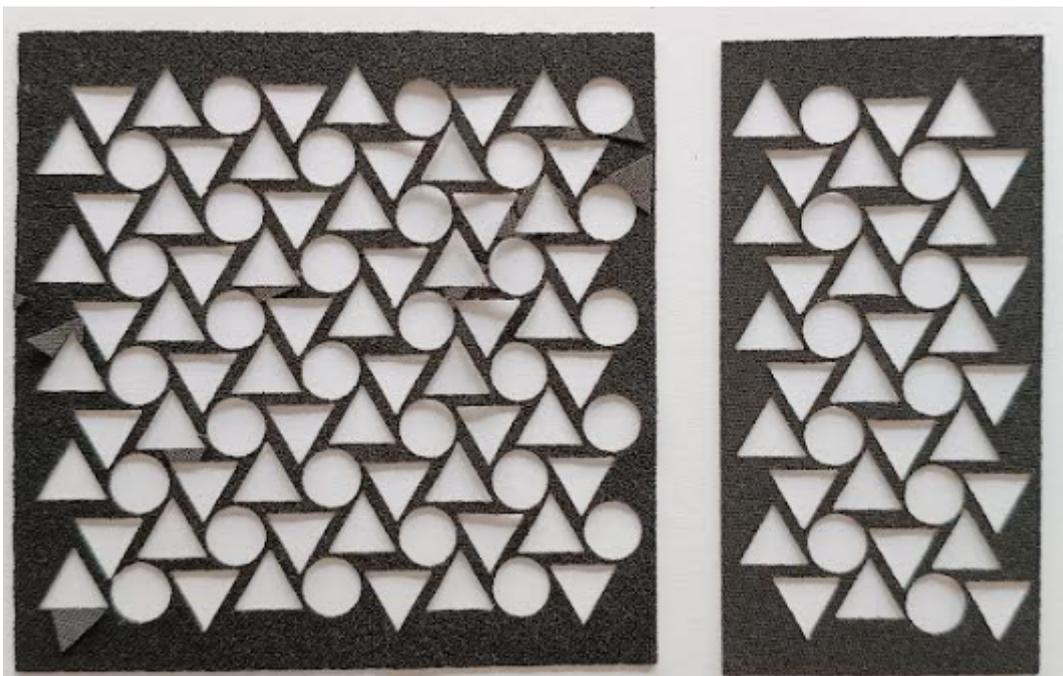


Figura 52: Ejemplo de resultado de corte láser sobre el tejido 2 y con la geometría 3.

Nota: elaboración propia.

4.2.3. Testeo de las muestras

Codificación de las muestras

Tenemos:

- 4 tejidos
- 4 geometrías
- 3 muestras por cada una de las combinaciones anteriores

| Tejido | Geometría | Muestra | Elasticidad en distinta en direcciones distintas |
|--------|-------------|----------|--|
| T1 | G1/G2/G3/G4 | V1/V2/V3 | |
| T3 | G1/G2/G3/G4 | V1/V2/V3 | |
| T4 | G1/G2/G3/G4 | V1/V2/V3 | SI |
| T5 | G1/G2/G3/G4 | V1/V2/V3 | SI |

Tabla 6: Tabla de codificación de las geometrías

Todos ellos se han comparado con tejidos de la misma tipología pero sin corte, que se codifican como tejidos de control (TC).

Ejemplo de codificación:

- T1_G2_V2 = Tejido 1, con la geometría 2, muestra 2 de esta tipología.
- T2C_V1 = Tejido 2, sin corte de geometrías, muestra 1..

Parámetros a analizar

Al igual que la mayoría de artículos citados en la investigación teórica, el parámetro adecuado para evaluar la idoneidad de las geometrías auxéticas es el coeficiente de Poisson en relación con la tensión aplicada.

Para medir adecuadamente los parámetros necesarios, considerando que el coeficiente de Poisson se define como la relación entre la elongación transversal (en el eje x) y la elongación longitudinal (en el eje y), se deben tomar las siguientes medidas:

1. Ancho del tejido: utilizando una regla, se medirá el ancho del tejido en diferentes momentos durante el ensayo de tracción. Esto permitirá calcular la elongación en el eje x.
2. Elongación del tejido en el eje y: el software del equipo de ensayo proporcionarán directamente la información.

3. Tensión aplicada a la muestra: en este caso también es el software del equipo de ensayo el que nos permitirá obtener directamente la medida de la tensión aplicada en la muestra.

Estos parámetros permitirán realizar los cálculos necesarios para determinar el coeficiente de Poisson, graficarlo frente a la tensión aplicada y evaluar adecuadamente el comportamiento auxético del tejido en estudio. (Sierra, 2017)

4.3. Caracterización de prototipos

Se lleva a cabo un ensayo de tracción de cada una de las muestras anteriores, el cual, a pesar de ser uno de los métodos más comunes para evaluar materiales textiles, proporciona información valiosa sobre el comportamiento auxético de los mismos. Para realizar el ensayo, se colocan las muestras de tejido en la máquina y se les aplica una fuerza de tensión a una velocidad constante (con una precarga de 5N). Se registra la gráfica tensión deformación y se medirá el estrechamiento del tejido a diferentes tensiones.

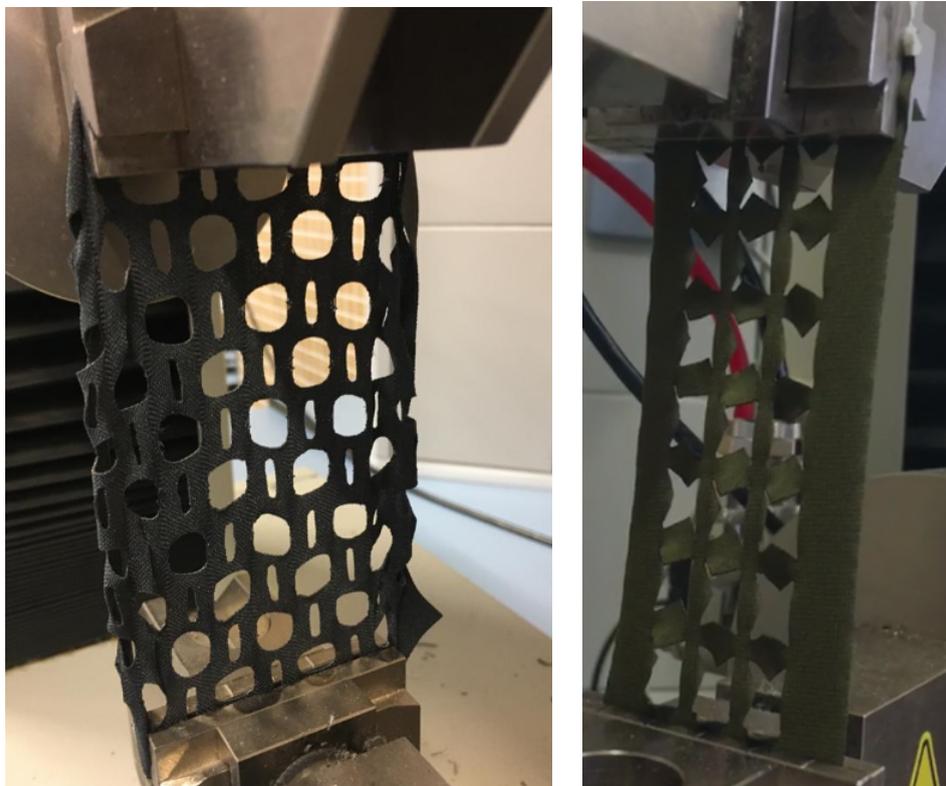


Figura 53: ejemplos de las muestras con distintas geometrías T2_G3 (izquierda) T3_G1 (derecha) testeadas en el dinamómetro.

Nota: elaboración propia.

Además de obtener esta gráfica, se debe medir el estrechamiento del tejido en la dirección perpendicular a la aplicación del esfuerzo, con el fin de calcular el coeficiente de Poisson.

Para llevar a cabo esta medición, se realizan pausas periódicas en la máquina de ensayo, durante las cuales se medirá la elongación directamente mediante el software del dinamómetro. Asimismo, se medirá el estrechamiento del textil en la dirección perpendicular al esfuerzo ejercido sobre el tejido utilizando una regla. Estos datos se registran en intervalos regulares.

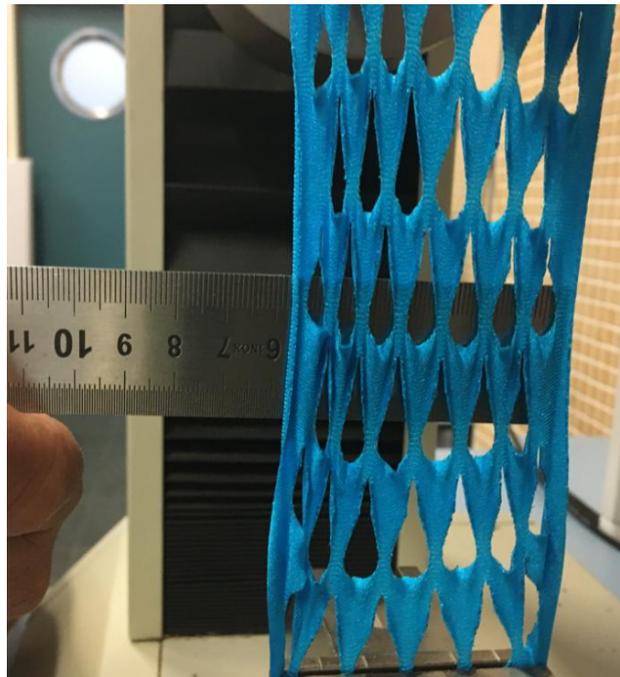


Figura 54: ejemplos de la medición de estrechamiento de la muestra a una tensión determinada (T4_G2).

Nota: elaboración propia.

Para cada tipo de tejido, se seleccionan tiempos de medición considerando tanto la facilidad para detener la máquina (siendo más sencillo en tejidos altamente elásticos, debido a que los intervalos de tiempo entre tensiones son más amplios), como la dificultad del proceso manual en tejidos menos elásticos.

Es fundamental asegurarse de que ninguna de las geometrías auxéticas creadas mediante corte láser se rompa durante el proceso de medición, ya que esto afectaría a su aplicabilidad. Es importante destacar que este fenómeno de rotura de las geometrías, cuando no es masivo (figura 55), no se refleja de manera clara y definitiva en la gráfica de tensión deformación.

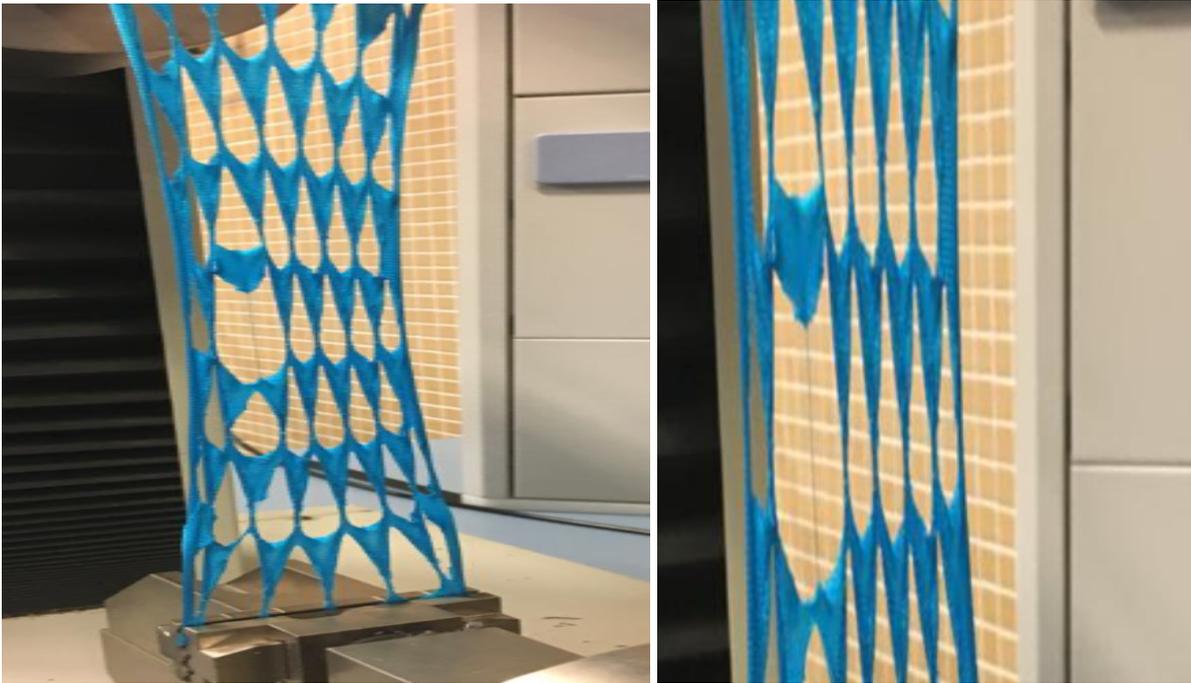


Figura 55: ejemplo de rotura de una sola de las geometrías (T4_G2)

Nota: elaboración propia.

4.4. Resultados obtenidos

La evaluación de los resultados se estructura en tres grandes secciones. En primer lugar, se examinará el comportamiento de los tejidos sin considerar geometrías adicionales, lo cual permitirá establecer un punto de referencia inicial. Las gráficas de tensión-deformación con los combinaciones de tejidos y geometrías que se han utilizado para el resto de bloques se encuentran disponibles en los anexos adjuntos.

En el segundo bloque, se analizará la influencia de las geometrías en un mismo tejido. Este enfoque nos permitirá comprender cómo diferentes configuraciones geométricas afectan a la respuesta del tejido en términos de su capacidad para deformarse.

Por último, en el tercer bloque se examinará el efecto de utilizar la misma geometría sobre diferentes tejidos. Este análisis nos permitirá evaluar cómo diferentes tipos de tejidos responden a un asimetría particular y si existen variaciones significativas en sus coeficientes de Poisson al someternos a tensión.

Para llevar a cabo estos análisis, se ha elegido representar el coeficiente de Poisson en función de la elongación. Esta elección nos permite visualizar y comparar de manera clara cómo varía la capacidad de adaptación de los tejidos frente a diferentes niveles de deformación.

La elección de representar el coeficiente de Poisson en función de la elongación en lugar de la tensión aplicada se fundamenta en consideraciones relacionadas con la adaptabilidad de los tejidos, especialmente en términos de elasticidad.

Los tejidos seleccionados para este estudio presentan variaciones en su contenido de elastano, lo cual les confieren diferentes niveles de elasticidad, como se ha observado previamente. Por lo que si graficamos frente a tensión, no estaríamos evaluando la capacidad de adaptación del tejido, y además, se introduciría como factor de interferencia la composición específica de los mismos.

La elongación refleja directamente el cambio en la forma y tamaño del tejido bajo una carga determinada, permitiéndonos examinar la capacidad para modificar su estructura en respuesta a fuerzas externas.

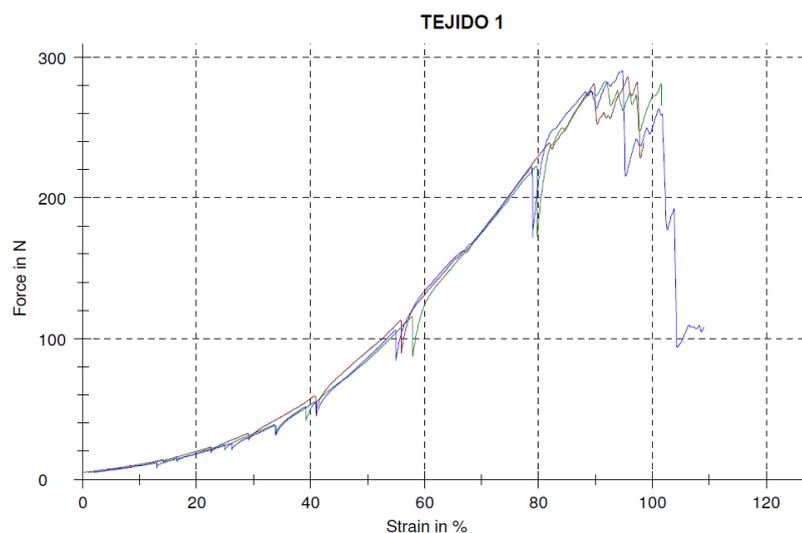
4.4.1. Gráficas tensión/deformación de los tejidos sin geometrías

La norma EN13934 establece los parámetros de ensayo para determinar la resistencia a la tracción y la elongación de los tejidos textiles. Hemos establecido los siguientes parámetros de testeo:

- Separación entre mordazas: 60 mm
- Velocidad de testeo: 200 mm/min
- Precarga: 5N

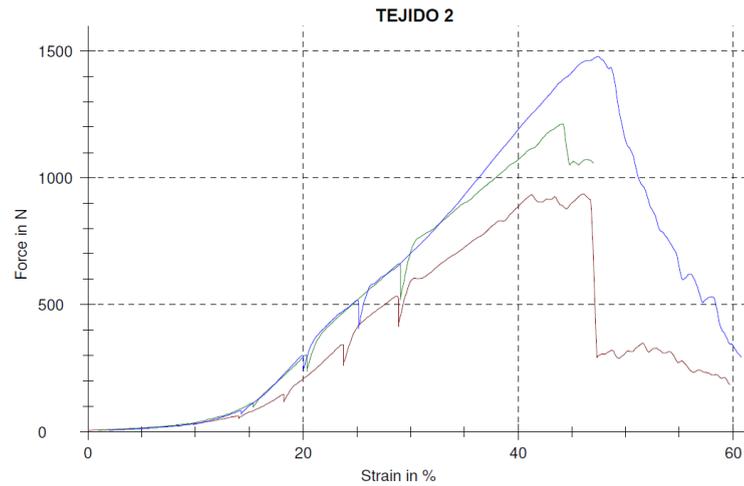
Aunque la norma indica que el test debe realizarse sin ningún paro del dinamómetro, en nuestras mediciones es necesario detener el proceso y medir el ancho de la probeta periódicamente. Esto nos permite obtener datos precisos y relevantes para nuestro análisis.

Además, según la norma, las probetas deben tener un tamaño de 10 cm x 5 cm, considerando el espacio extra necesario para las mordazas. Sin embargo, con el fin de evaluar el comportamiento auxético de los tejidos, hemos diseñado nuestras probetas con dimensiones de 10 cm x 10 cm. Esto nos brinda un margen adicional para medir los cambios de espesor durante la aplicación de la fuerza de tracción.



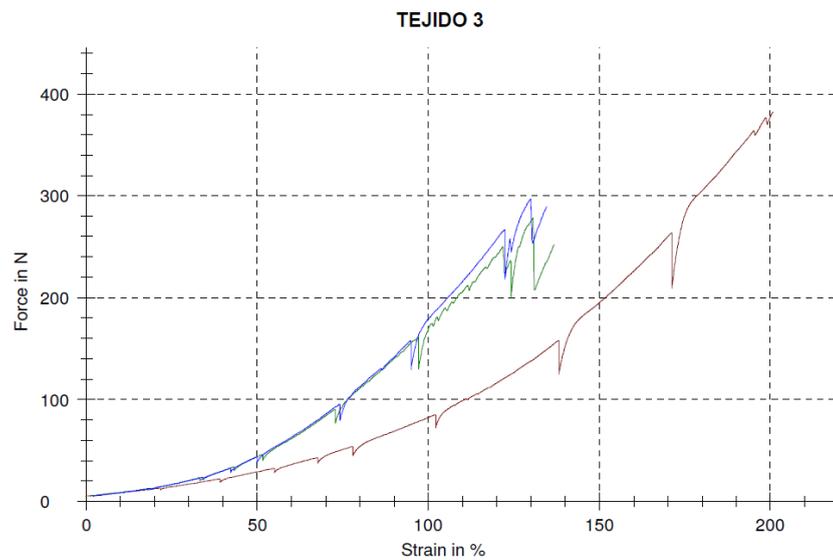
| Series n = 3 | b0 Strip specimen mm | L0 mm | FH N | σ H N/cm | RH cN/tex | FB N | σ B N/cm | RB cN/tex | ϵ H % | ϵ B % |
|-----------------|-------------------------|----------|---------|--------------------|--------------|---------|--------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| x | 50 | 85,98 | 286,47 | 57,29 | 28647,04 | 204,18 | 40,84 | 20417,95 | 93,09 | 102,10 |
| s | 0,000 | 2,60 | 3,83 | 0,77 | 382,88 | 84,22 | 16,84 | 8421,91 | 2,46 | 4,45 |
| v | 0,00 | 3,03 | 1,34 | 1,34 | 1,34 | 41,25 | 41,25 | 41,25 | 2,65 | 4,36 |

Gráfica 7: Tensión deformación y estadísticas de la prueba del tejido 1 sin geometrías



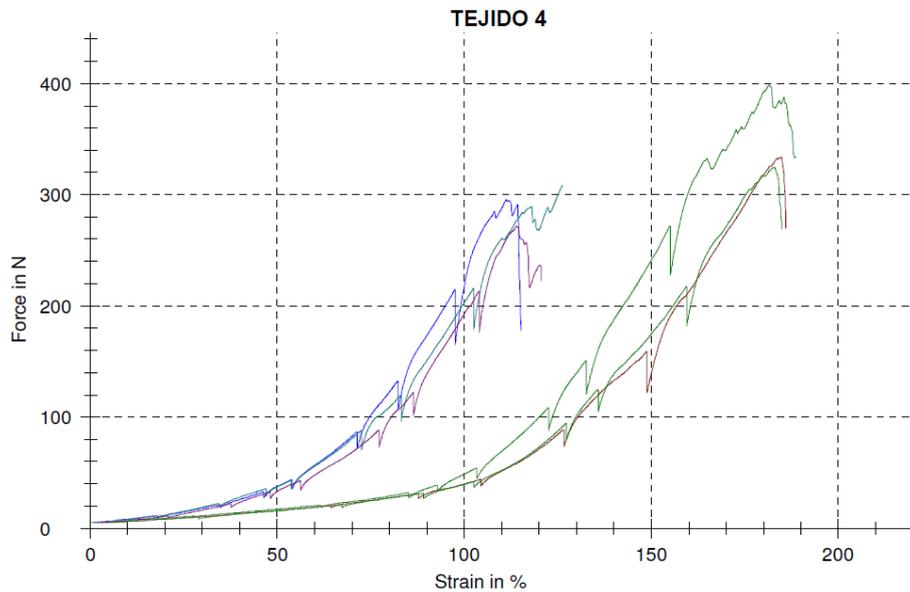
| Series n = 3 | b0 Strip specimen mm | L0 mm | FH N | σ H N/cm | RH cN/tex | FB N | σ B N/cm | RB cN/tex | ϵ H % | ϵ B % |
|-----------------|-------------------------|----------|---------|--------------------|--------------|---------|--------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| x | 50 | 66,54 | 1208,71 | 241,74 | 120871,49 | 512,69 | 102,54 | 51268,93 | 44,91 | 54,79 |
| s | 0,000 | 3,19 | 270,50 | 54,10 | 27049,92 | 475,71 | 95,14 | 47570,72 | 1,53 | 7,62 |
| v | 0,00 | 4,80 | 22,38 | 22,38 | 22,38 | 92,79 | 92,79 | 92,79 | 3,41 | 13,91 |

Gráfico 8: Tensión deformación y estadísticas de la prueba del tejido 2 sin geometrías



| Series n = 3 | b0 Strip specimen mm | L0 mm | FH N | σ H N/cm | RH cN/tex | FB N | σ B N/cm | RB cN/tex | ϵ H % | ϵ B % |
|-----------------|-------------------------|----------|---------|--------------------|--------------|---------|--------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| x | 50 | 91,86 | 319,17 | 63,83 | 31916,99 | 307,97 | 61,59 | 30797,28 | 152,74 | 156,35 |
| s | 0,000 | 2,57 | 55,52 | 11,10 | 5552,21 | 67,03 | 13,41 | 6702,70 | 41,53 | 38,44 |
| v | 0,00 | 2,80 | 17,40 | 17,40 | 17,40 | 21,76 | 21,76 | 21,76 | 27,19 | 24,58 |

Gráfico 9: gráfico de tensión deformación y estadísticas de la prueba del tejido 3 sin geometrías



| Series n = 6 | b0 Strip specimen mm | L0 mm | FH N | σ_H N/cm | RH cN/tex | FB N | σ_B N/cm | RB cN/tex | ϵ_H % | ϵ_B % |
|-----------------|-------------------------|----------|---------|--------------------|--------------|---------|--------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| x | 50 | 113,87 | 321,87 | 64,37 | 32186,59 | 263,43 | 52,69 | 26342,56 | 147,63 | 151,15 |
| s | 0,000 | 12,62 | 43,50 | 8,70 | 4349,78 | 56,73 | 11,35 | 5673,21 | 35,92 | 35,74 |
| v | 0,00 | 11,08 | 13,51 | 13,51 | 13,51 | 21,54 | 21,54 | 21,54 | 24,33 | 23,64 |

Gráfico 10: gráfico de tensión deformación y estadísticas de la prueba del tejido 4 sin geometrías

Observamos que el tejido 2 muestra la menor elasticidad en comparación con los demás tejidos, seguido por el tejido 1. Por otro lado, los tejidos 3 y 4 exhiben una elasticidad similar.

Es importante destacar que tanto el tejido 3 como el 4 presentan características distintas en las dos direcciones del tejido. Por lo tanto, al realizar las comparativas posteriores, hemos tenido en cuenta esta particularidad para asegurarnos una comparación adecuada y precisa.

4.4.2. Gráficas elongación/poissón según cada tejido

Estas gráficas permitirán realizar el análisis comparativo de las distintas geometrías, con el objetivo de determinar cuál de ellas proporciona al tejido una mayor característica auxética.

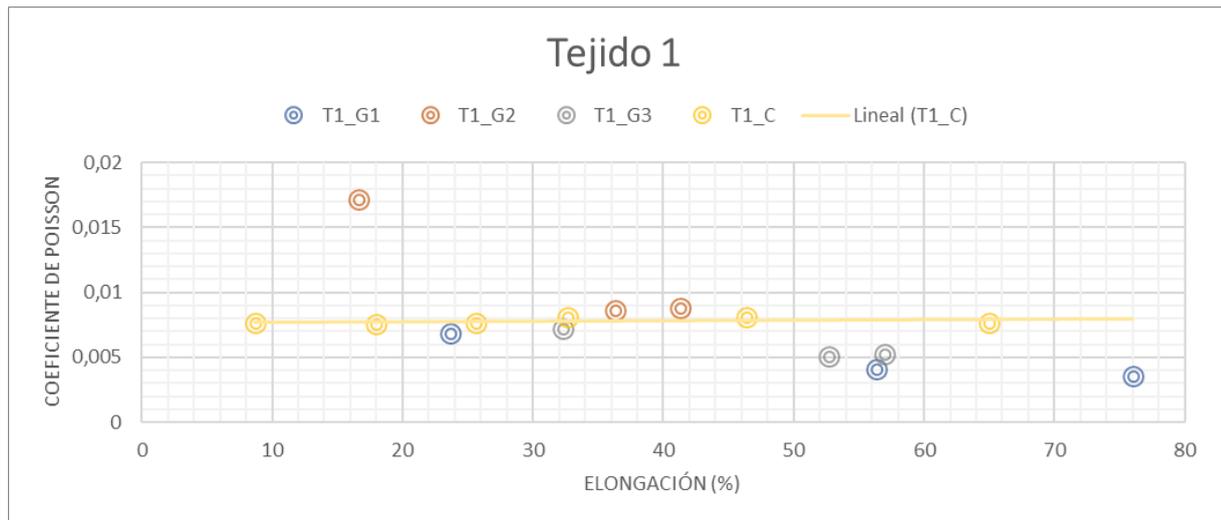


Gráfico 11: Coeficiente de Poisson en relación elongación, según geometrías para el Tejido 1.

En el caso del tejido 1, la muestra de control (es decir, el tejido en crudo sin geometrías cortadas a láser, T1_C) nos proporciona un coeficiente de Poisson constante. Además, al observar la gráfica podemos apreciar que tanto la geometría 3 como la 1 mejoran las propiedades auxéticas del textil a altas elongaciones. Sin embargo, la geometría 2 parece tener el efecto contrario. Esto podría deberse a la distribución de dichas geometrías en el soporte textil, ya que al no colocar la punta de flecha en sentido contrario, no logramos mejorar esta propiedad. Ver referencias de diseño de geometría auxética en punta de flecha. Figuras 4, 9 y 10.

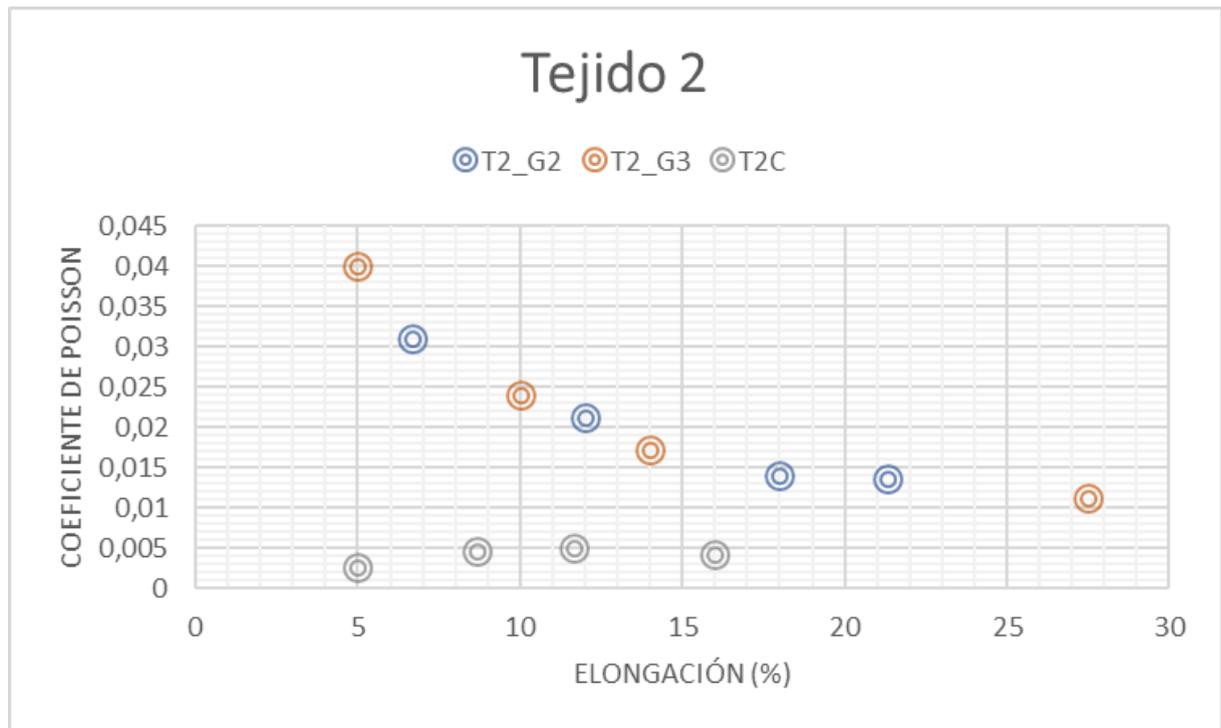


Gráfico 12: Coeficiente de Poisson en relación a la elongación, según geometrías para el Tejido 2.

En el caso del tejido dos, que previamente hemos mencionado como más rígido que los demás y que además es un tejido de calada, no hemos logrado mejorar las propiedades auxéticas del material en ninguno de los casos.

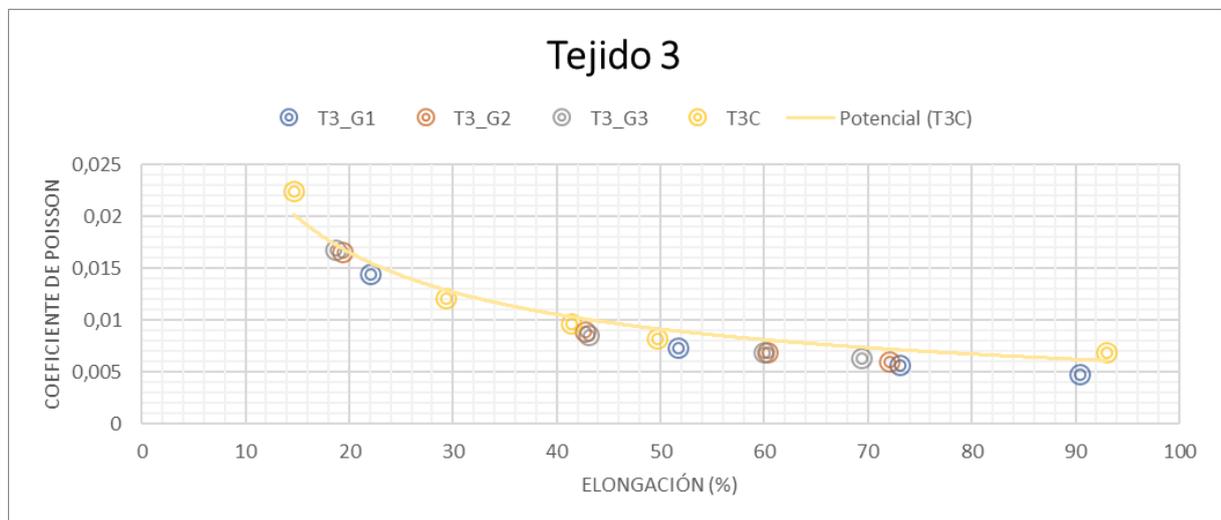


Gráfico 13: Coeficiente de Poisson en relación a la elongación, según geometrías para el Tejido 3.

En el caso específico del tejido 3, se observa una mejora en su comportamiento auxético en todas las geometrías probadas. Esta mejora se hace aún más evidente cuando se llega a una elongación considerable del tejido.

Es importante destacar que, en este caso, hemos excluido de la comparación aquellos datos que presentaban contradicciones, centrándonos únicamente en aquellos datos que coincidían con los resultados obtenidos en pruebas realizadas en las mismas direcciones del tejido.

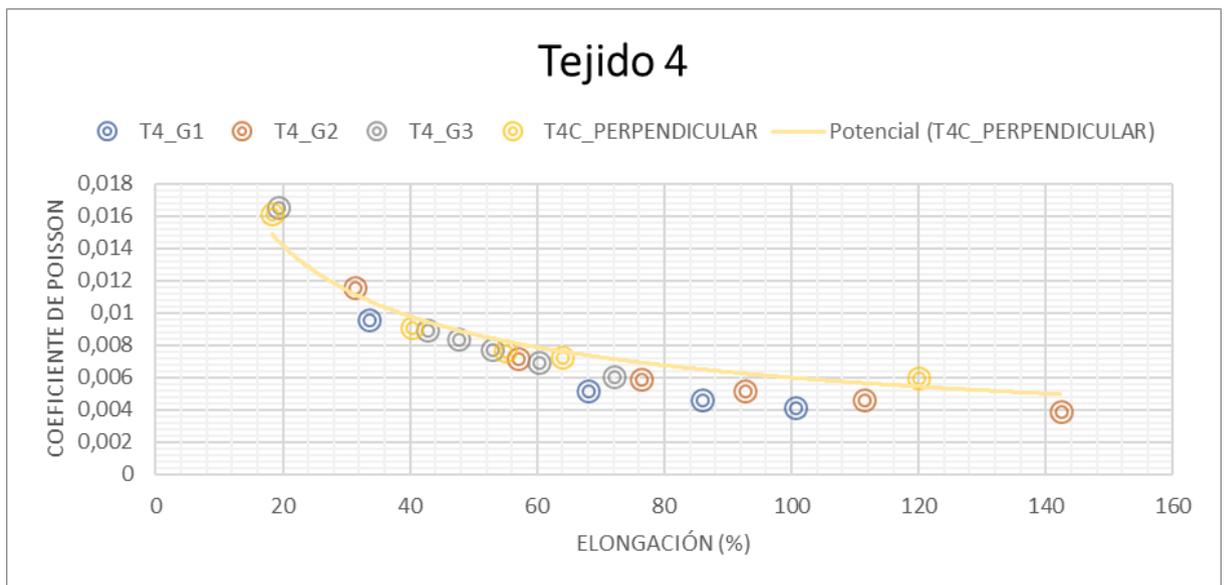


Gráfico 14: Coeficiente de Poisson en relación a la elongación, según geometrías para el Tejido 4.

Al igual que en el caso anterior, es importante destacar que las geometrías cortadas a láser en el tejido 4 mejoran su comportamiento auxético en todos los casos evaluados.

4.4.3. Gráficas tensión/poissón según geometrías

Estas gráficas facilitarán la identificación de los tejidos más adecuados para una geometría específica. La idea es analizar en este tercer bloque, cuáles son las mejores geometrías para cada tipo de tejido.

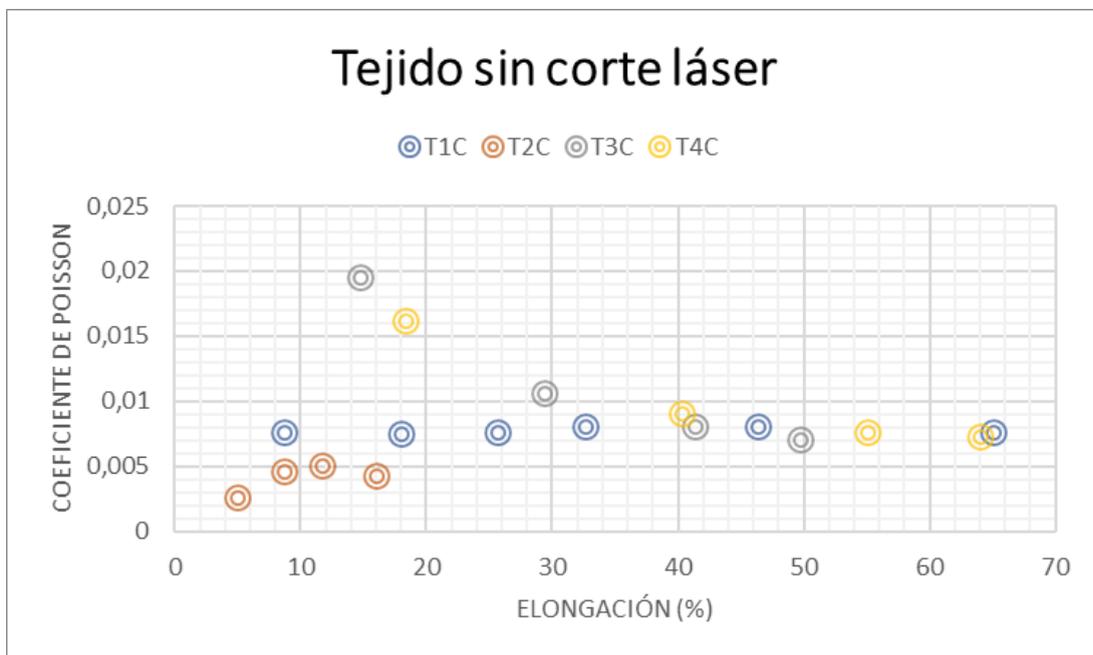
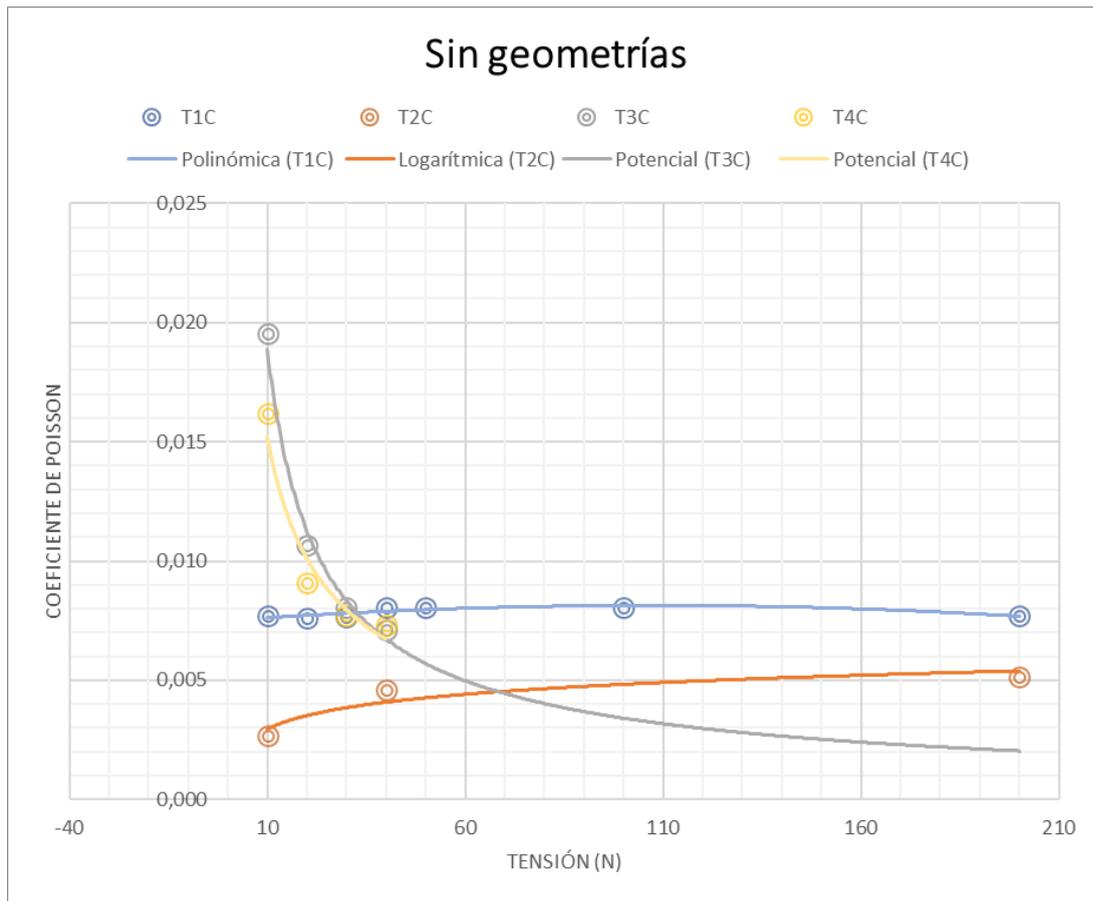


Gráfico 15: Análisis del comportamiento auxético de los diferentes textiles analizados sin el corte de las geometrías.

Al comparar los cuatro tejidos, podemos observar que sin geometrías cortadas al láser, el tejido 3 y 4 experimentan cambios en su coeficiente de Poisson muy rápidos al aplicar poca tensión, debido a su mayor elasticidad y la pendiente de la curva cambia y se hace más horizontal cuando llegan a su límite.

Por otro lado, el tejido 1 mantiene su coeficiente de Poisson constante al aplicar tensión.

Finalmente, por su parte el tejido 2, que es el menos elástico de todos, empeora su coeficiente de Poisson a medida que se aplica mayor tensión, mostrando un comportamiento contrario a los demás tejidos.

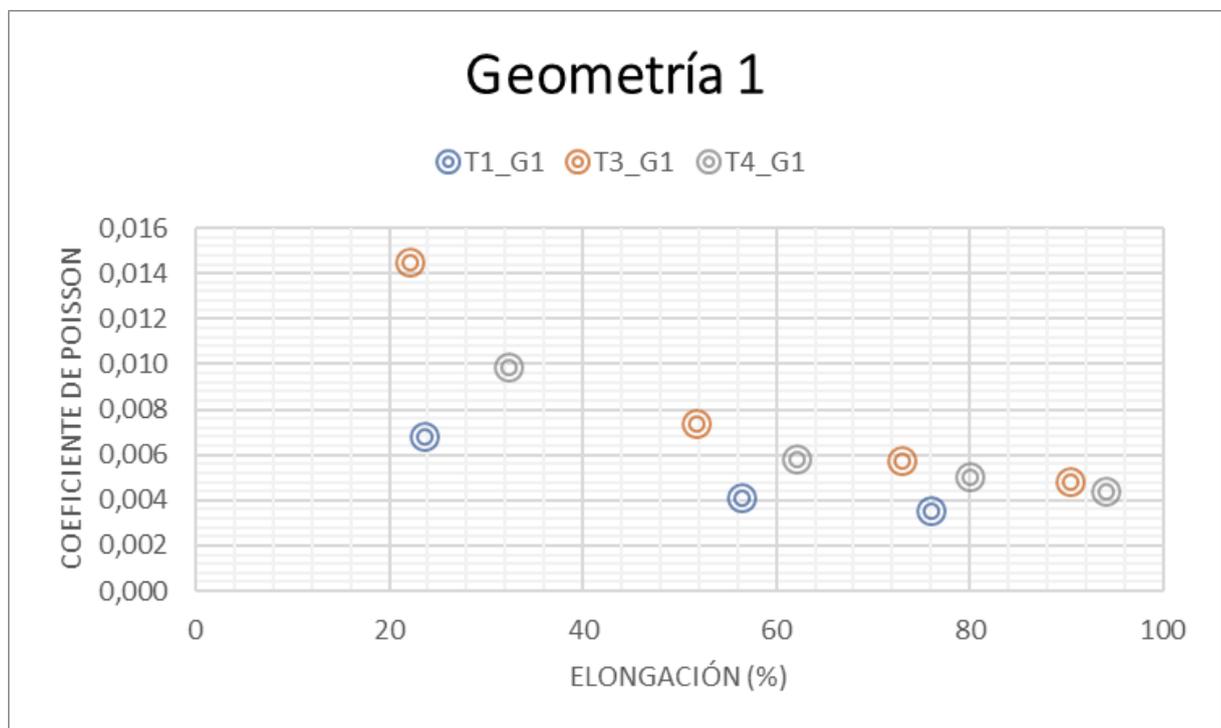


Gráfico 16: Comparativa de la geometría 1 aplicada a distintos textiles.

La geometría 1 fue cortada en todos los tejidos, excepto en el tejido 2 debido a la falta de disponibilidad del láser. A pesar de esto, al analizarla en los diferentes tejidos, se concluye que la mejor combinación entre geometría y soporte textil se logra con la geometría 1 y el textil 1. Seguido muy de cerca del tejido 4.

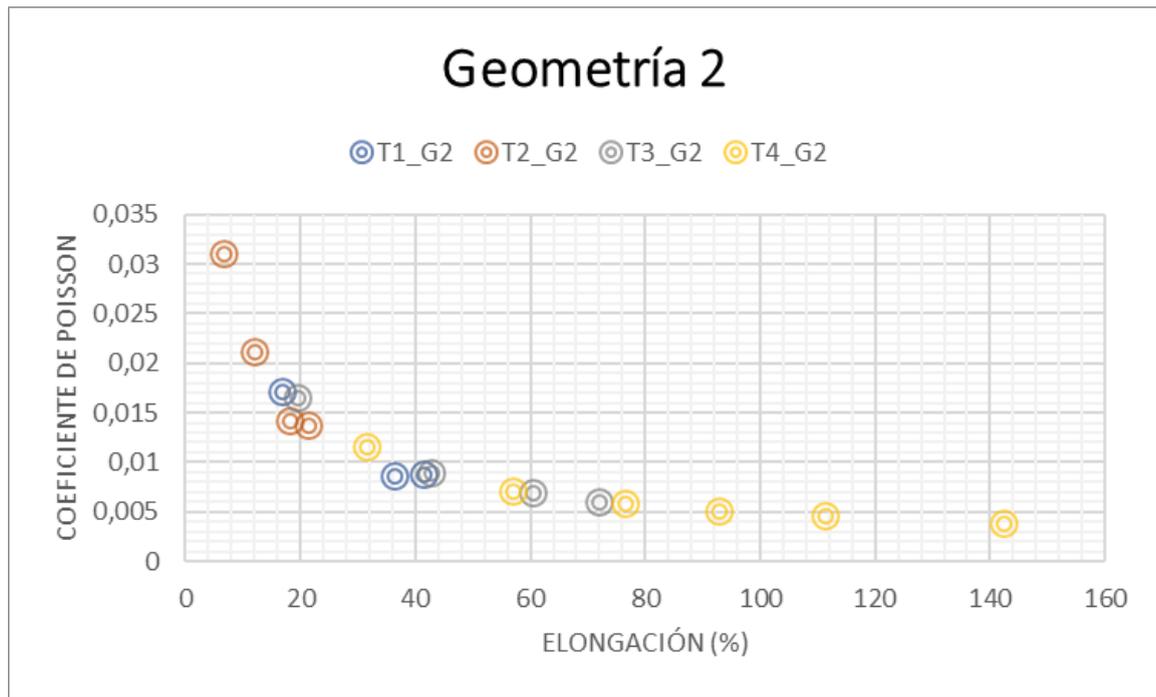


Gráfico 17: Comparativa de la geometría 2 aplicada a distintos textiles.

En el caso de la geometría 2, si atendemos a la elongación, no percibimos diferencias significativas entre tejidos.

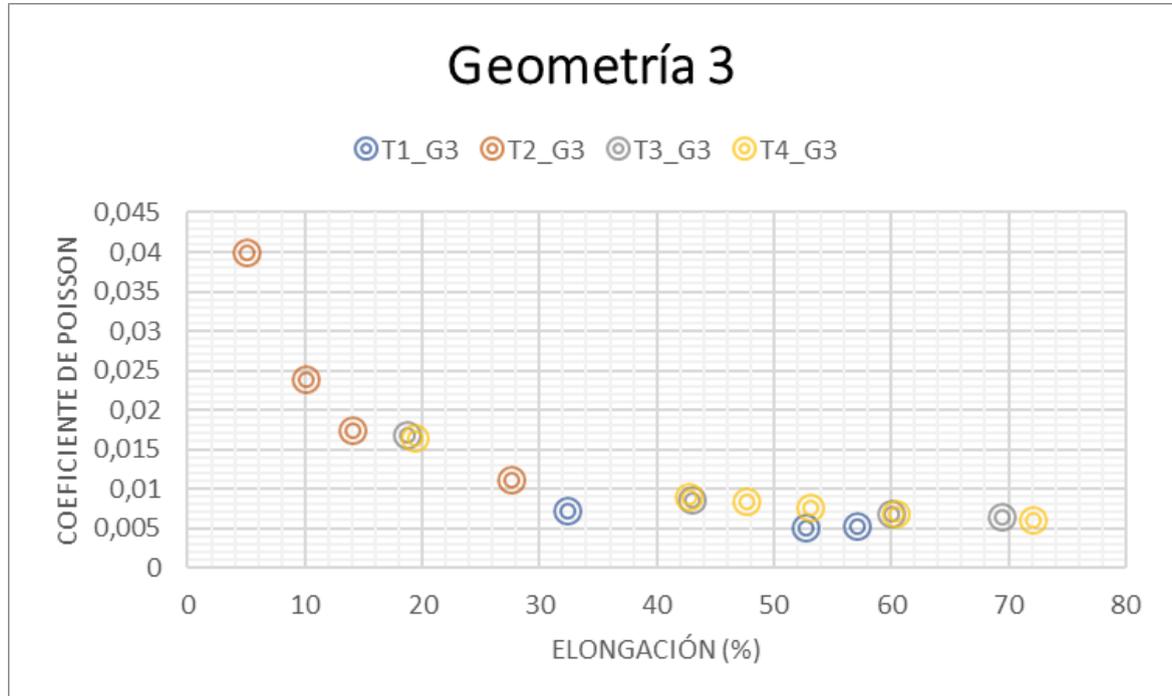


Gráfico 18: Comparativa de la geometría 3 aplicada a distintos textiles.

Con respecto a la geometría 3, también se recomendaría elegir el tejido 1 como mejor opción, seguido por el 3 y 4, en las mismas condiciones.

Al analizar la geometría 4, que también ha sido evaluada en todos los tejidos, hemos encontrado una problemática significativa. Estas geometrías tienden a romperse prematuramente, incluso antes de la aplicación de la precarga (5N) en la máquina de tracción. Esta situación imposibilita la medición precisa y por supuesto, la utilización de la misma en una aplicación práctica.

5. Conclusiones

La presente investigación se centra en analizar y evaluar las propiedades auxéticas de diferentes geometrías aplicadas a textiles. A lo largo del estudio, se exploraron varias combinaciones de geometrías y tipos de tejido, con el objetivo de determinar cuáles brindan los mejores resultados en términos de adaptabilidad y comportamiento auxético:

- **La geometría 4, quiral, no funciona** en ninguna de los casos estudiados, ya que presenta problemas de cizalla.
- **En textiles de poca elasticidad** (textil 2), **las geometrías auxéticas no juegan un papel relevante** para mejorar la adaptabilidad de los mismos. Algo que también queda corroborado a través de la bibliografía (Hu, 2019) y (Zulifqar, 2018).
- Se observó que **las geometrías auxéticas son más efectivas en textiles de mayor elasticidad**. Estos textiles presentaron una mayor ganancia al utilizar estas geometrías.
- En general, se determinó que la **mejor geometría** para conseguir un mejor comportamiento auxético en todos los casos es la **geometría 1**.
- Finalmente para la **geometría 1 y el tejido 1 es la mejor combinación** ya que es la que **menor coeficiente de Poisson presenta**.

6. Prototipado

Con el objetivo de evaluar la adaptabilidad de las geometrías auxéticas en relación a las diferentes formas del cuerpo humano, se ha llevado a cabo el diseño de un body utilizando la geometría 1 aplicada sobre el textil 4.

El body, ha sido especialmente diseñado para incorporar la estructura auxética en áreas estratégica. Esto permitirá observar y analizar cómo dicha geometría influye en la capacidad de adaptación a las formas del cuerpo.

Las fotografías intentan centrarse en evaluar aspectos como la capacidad de estiramiento y contracción de dicha geometría en respuesta a los contornos y movimiento corporales, manteniendo una forma óptima y cómoda.

El enfoque de de este diseño pretende contribuir al desarrollo de prendas más ergonómicas y versátiles, intentando llevarlos a talla única para evitar problemas de tallaje y obteniendo un ajuste personalizado en la indumentaria.

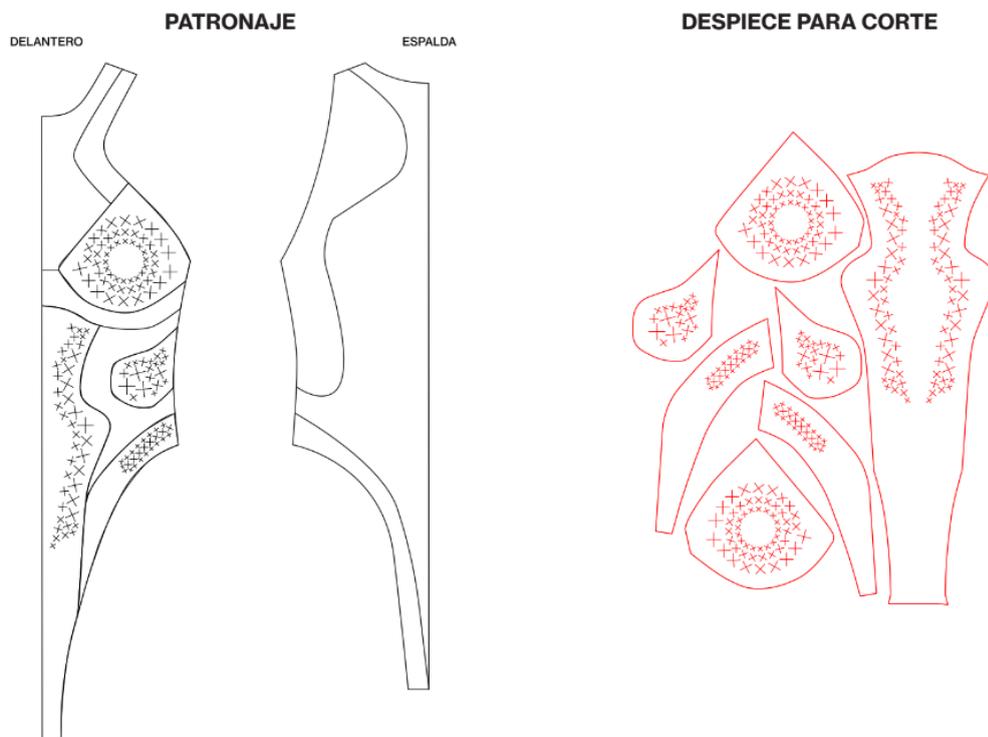


Figura 56: patronaje y despiece para corte láser del Body

Nota: Diseñadora Úrsula Suárez Bazo



Figura 57: Prototipo sobre modelo 1.

Nota: Fotografía Mario Rabasco.



Figura 58: Prototipo sobre modelo 2.

Nota: Fotografía Mario Rabasco.



Figura 59: Detalle del prototipo modelo 1.

Nota: Fotografía Mario Rabasco



Figura 60: Detalle del prototipo modelo 1.

Nota: Fotografía Mario Rabasco

7. Líneas futuras

Dado el potencial de estas geometrías en la mejora de las propiedades de adaptabilidad de los textiles, se sugieren algunas líneas futuras de investigación:

1. Explorar nuevas geometrías y optimizar las estudiadas. Esto podría incluir geometrías más complejas o innovadoras. En los artículos de Kamrul y Glazzard, entre otros, se utilizan algoritmos matemáticos u otras técnicas para maximizar las propiedades auxéticas deseadas. (Kamrul, 2022) y (Glazzard, 2014). De hecho, lo ocurrido en el tejido 1 con la geometría 2, es probable que tenga solución explorando una mejor disposición de dichas geometrías para que el tejido trabaje en ambos ejes.
2. Caracterización del desempeño auxético: en varios artículos de investigación, se estudia el comportamiento de los textiles a compresión y se podría añadir a ensayos de tracción biaxial. La inclusión de estos ensayos complementará la evaluación de su comportamiento en condiciones más cercanas a las aplicaciones reales.
3. Exploración de aplicaciones, no solo en indumentaria, sino también en textil hogar, como cortinas, fundas de almohadas o sofás, tapicerías, etc.
4. Investigación de materiales innovadores: desarrollar nuevos materiales compatibles con las geometrías, explorando materiales flexibles elásticos y duraderos o incluso metamateriales que permitan la implementación exitosa de las estructuras auxéticas.
5. Arquitectura efímera: geometrías que permitan la fácil movilidad y montaje de estructuras efímeras, que se puedan expandir y contraer de manera eficiente y rápida, facilitando el transporte y la instalación en diferentes ubicaciones.
6. Sostenibilidad y eficiencia energética: toldos que puedan contraerse o expandirse para dejar pasar la luz solar o no dependiendo de los diferentes contextos del día.

8. Bibliografía

A' Design Award & Competition. (s. f.). *A' Design Award and Competition - Maria Alejandra Mora Sanchez Press Kit*. Loom. Recuperado 4 de diciembre de 2021, de <https://competition.adesignaward.com/designer-press-kit.php?profile=201380>

AERON. (s. f.). *GOSPEL – Fringe cami top – beige*. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://eu.aeron.com/products/gospel-fringe-cami-top-beige>

Alderson, K., Alderson, A., Anand, S., Simkins, V., Nazare, S., & Ravirala, N. (2012). Auxetic warp knit textile structures. *physica status solidi (b)*, 249(7), 1322-1329.

Ali, M., Zeeshan, M., Qadir, M. B., Riaz, R., Ahmad, S., Nawab, Y., & Anjum, A. S. (2018). Development and mechanical characterization of weave design based 2D woven auxetic fabrics for protective textiles. *Fibers and Polymers*, 19, 2431-2438.

Andrea chin | designboom. (2015, 10 agosto). *LEXUS design award 2015 winner senses acts to improve the life of people*. designboom | architecture & design magazine. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://www.designboom.com/design/lexus-design-award-2015-grand-prix-winner-sense-wear-08-07-2015/>

Auxetic Soles With Corresponding Inner or Outer Liners. (2015, 3 septiembre). Espacenet. Recuperado 25 de enero de 2022, de https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150903&CC=US&NR=2015245683A1&KC=A1

Balan, M., Mertens, J., & Bahubalendruni, M. R. (2022). Auxetic Mechanical Metamaterials and their Futuristic Developments: A state-of-art Review. *Materials Today Communications*, 105285.

Barillas, M. (2020). Materiales Auxeticos: una breve descripción y avances en la reducción de la concentración de esfuerzos.

Baron Cangrejo, D. A. Análisis por elementos finitos de la respuesta de estructuras auxéticas hexaquirales y re-entrantes con coeficiente de Poisson Negativo Bajo Carga Uniaxial en el plano Xy.

Bertoldi, K., Reis, P. M., Willshaw, S., & Mullin, T. (2010). Negative Poisson's ratio behavior induced by an elastic instability. *Advanced materials*, 22(3), 361-366.

Boletín 51 vigilancia tecnológica INESCOP. (2015). OEPM. Recuperado 25 de enero de 2023, de https://www.oepm.es/export/sites/oepm/comun/documentos_relacionados/Boletin_es/Calzado/opticalz0315.pdf

Borneman, J. (2021, 27 octubre). *Hyosung's creora® 3D Max Spandex Helps Denim Brands Achieve Circularity*. Textileworld. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de

<https://www.textileworld.com/textile-world/knitting-apparel/2021/10/hyosungs-creo-ra-3d-max-spandex-helps-denim-brands-achieve-circularity/>

Campbell, JR. (2020). Automated Process of Manufacturing Clothing (US) N° patente: 20200245707. U.S. Patent and Trademark Office

Daniels, E. A., Gillen, M. M., & Markey, C. H. (Eds.). (2018). *Body positive: Understanding and improving body image in science and practice*.

Esch, L. (2021, 8 octubre). *SS23: 5 tendencias de lencería que destacaron en Interfilière París*. FashionUnited. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://fashionunited.es/noticias/moda/ss23-5-tendencias-de-lenceria-que-destaca-ron-en-interfiliere-paris/2021100836570>

FashionNetwork.com ES. (s. f.). *El 40% de las mujeres tiene problemas con las tallas de ropa, según la OCU*. FashionNetwork.com. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://es.fashionnetwork.com/news/El-40-de-las-mujeres-tiene-problemas-con-las-tallas-de-ropa-segun-la-ocu,82219.html>

Formas auxéticas para un pedalear perfectamente. (s. f.). Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://demonerosso.dainese.com/es/formas-aux%C3%A9ticas-para-un-pedalear-perfectamente>

Gabardina Bi-Stretch – gris oscuro - Telas de gabardina- telas.es. (s. f.). telas.es. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de https://www.telas.es/81-1615-168_gabardina-bi-stretch-gris-oscurο.html

Glazzard, M., & Breedon, P. (2014). Weft-knitted auxetic textile design. *physica status solidi (b)*, 251(2), 267-272.

Hu, H., Zhang, M., & Liu, Y. (2019). *Auxetic textiles*. Woodhead Publishing.

Iconic legwear. (s. f.). Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://www.wolfordshop.es/iconic-legwear.html>

Kamrul, H., Zulifqar, A., Yang, Y., Zhao, S., Zhang, M., & Hu, H. (2022). Geometrical analysis of auxetic woven fabrics based on foldable geometry. *Textile Research Journal*, 92(3-4), 317-329.

Kelkar, P. U., Kim, H. S., Cho, K. H., Kwak, J. Y., Kang, C. Y., & Song, H. C. (2020). Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review. *Sensors*, 20(11), 3132.

Lakes, R. (1987). Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235, 1038-1041.

Loboda, V. (2022, 28 diciembre). *Sizing solutions for retail: Best options for fashion brands*. 3DLOOK. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://3dlook.me/content-hub/sizing-solutions-for-fashion-brands/>

Los zapatos auxéticos impresos en 3D por Wertel Oberfell se adaptan continuamente a la forma del pie | Floornature. (s. f.). Floornature.com. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://www.floornature.es/design-trends/los-zapatos-auxeticos-impresos-en-3d-por-wertel-oberfell-se-17199/>

Ma, P., Chang, Y., & Jiang, G. (2016). Design and fabrication of auxetic warp-knitted structures with a rotational hexagonal loop. *Textile Research Journal*, 86(20), 2151-2157.

Ma, P., Chang, Y., Boakye, A., & Jiang, G. (2017). Review on the knitted structures with auxetic effect. *The Journal of The Textile Institute*, 108(6), 947-961.

Moroney, C., Alderson, A., Allen, T., Sanami, M., & Venkatraman, P. (2018, February). The application of auxetic material for protective sports apparel. In *Proceedings* (Vol. 2, No. 6, p. 251). MDPI.

Neopreno scuba plumas estampadas con calor – blanco - Telas buceo- telas.es. (s. f.-c). telas.es. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de https://www.telas.es/210-poso-e22-193_neopreno-scuba-plumas-estampadas-con-calor-blanco.html

Nike Free RN Flyknit «Dynamic Movement» para mujer. (s. f.). Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://www.nike.com/es/launch/t/womens-free-rn-flyknit-dynamic-movement>

O'Connor, T. (2021, 19 noviembre). How to Make Your Brand Size Inclusive. *The Business of Fashion*. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://www.businessoffashion.com/articles/news-analysis/how-to-make-your-brand-size-inclusive/>

Post, S. (2019, 28 octubre). *Insulation Opens Up: TNF 'Ventrix' Jacket Dissected*. GearJunkie. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://gearjunkie.com/apparel/outerwear/the-north-face-ventrix>

Santi, E. (2021, 22 abril). *Danit Peleg - 3D Printed Fashion*. Danit Peleg. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://danitpeleg.com/>

Sarmiento, A. R. (2022, 26 abril). *“Nadie diseña vaqueros como tú” el lema con el que Bershka propone a sus clientes personalizar sus prendas*. FashionUnited. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://fashionunited.es/noticias/moda/nadie-disena-vaqueros-como-tu-el-lema-con-el-que-bershka-propone-a-sus-clientes-personalizar-sus-prendas/2021100136488>

Sierra Soraluze, A. (2017). Diseño, construcción y caracterización de un material auxético.

Tela de jersey PERFORMANCE uni – oliva oscuro | Hamburger Liebe | Albstoffe - Telas de jersey- telas.es. (s. f.). telas.es. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de https://www.telas.es/173-900f25e-003_tela-de-jersey-performance-uni-oliva-oscuro-hamburger-liebe-albstoffe.html

Tela para traje de baño – turquesa - Telas de jersey- telas.es. (s. f.). telas.es. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de https://www.telas.es/81-0365-004_tela-para-traje-de-bano-turquesa.html

Terra, C. (2021, 22 diciembre). *La prescriptora de tendencias Lidewij Edelkoort sobre SS23: lazos, raso y motivos florales.* FashionUnited. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de <https://fashionunited.es/noticias/moda/la-prescriptora-de-tendencias-lidewij-edelkoort-sobre-ss23-lazos-raso-y-motivos-florales/2021122237424>

Verdejo, A. (2020, 11 marzo). *Algo pasa en la sastrería.* El País. Recuperado el 07 de Junio de 2023 de https://elpais.com/elpais/2020/03/02/eps/1583161175_090152.html

Wang, Z., & Hu, H. (2017). Tensile and forming properties of auxetic warp-knitted spacer fabrics. *Textile research journal*, 87(16), 1925-1937.

Wright, Z. (2019) Article of Footwear Having an Integrally Formed Auxetic Structure (US) N° patente: EP3513677. European Patent Office.

Zulifqar, A., Hua, T., & Hu, H. (2018). Development of uni-stretch woven fabrics with zero and negative Poisson's ratio. *Textile research journal*, 88(18), 2076-2092.

Zulifqar, A., & Hu, H. (2019). Geometrical analysis of bi-stretch auxetic woven fabric based on re-entrant hexagonal geometry. *Textile Research Journal*, 89(21-22), 4476-4490.