



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño de un casco ciclista basado en superficies mínimas periódicas triplicadas

Design of a cycling helmet based on triply periodic minimal surfaces

Autor

Javier García Felipe

Director/es

Ramón Miralbes Buil

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2020

Diseño de un casco ciclista basado en superficies mínimas periódicas triplicadas

Resumen

Este trabajo pretende explorar una alternativa al uso de Poliestireno expandido como materia prima en la fabricación de cascos para ciclismo. Esto se debe a las cualidades propias del mencionado material, ya que a la hora de su recuperación y reciclaje presenta ciertos problemas que ponen en entredicho la viabilidad económica de su sostenibilidad.

La sustitución del EPS para esta tarea, presenta retos muy específicos no fáciles de atajar, como son la ligereza y la capacidad de absorción de energía en caso de impacto. Al mismo tiempo se estaría apostando por una mejora en la sostenibilidad del producto que ahora no se está teniendo en cuenta. Es por esto que se ha decidido apostar por estructuras capaces de aportar dichas características antes mencionadas, independientemente del material con el que se vayan a fabricar. De esta manera se permite optimizar el material y las cualidades deseadas, independientemente del resto de variables que puedan influir en la elección del material final.

La propuesta se basa en superficies mínimas periódicas triplicadas (TPMS), que son un tipo de estructuras matemáticas que se repiten regularmente en el espacio, minimizando el material necesario para su formación. En concreto se eligió la Primitiva de Schwarz, ya que parece tener cualidades diferenciales respecto al resto de TPMS que pueden ayudar en su función.

Con la intención de entender el comportamiento de esta estructura, se prepararon probetas y se realizaron ensayos estáticos de compresión. Tras obtener los resultados se analizaron y se determinaron las magnitudes más idóneas para su implementación en el producto.

Para el diseño en sí se realizó un análisis del casco como: elementos de seguridad, partes, función, tipologías, alternativas existentes... Además se llevó a cabo una labor de documentación de las normativas aplicables a este producto así como diferentes factores que pueden influir en el daño ocasionado al usuario en caso de accidente.

Finalmente se crea un modelado en 3D del casco, que aglutina todo lo aprendido en el trabajo y las decisiones tomadas. Así permite comprender de una forma más visual el desarrollo del trabajo y mostrar las posibilidades existentes fuera del estado actual de la técnica en materia de protección craneal para ciclistas.

Índice

Introducción

Objetivo, alcance y herramientas empleadas	Pag. 5
Contexto	Pag. 6
Definición: ¿Que es un casco ciclista?	Pag. 7

Estado del arte

Historia	Pag. 9
¿Como es un casco? Fabricación y tipologías	Pag. 10
Problemática del EPS	Pag. 12
Alternativas existentes	Pag. 14
Fabricación aditiva	Pag. 15

Propuesta

TPMS	Pag. 18
P-Schwarz	Pag. 19
Materiales	Pag. 20
Ensayos	Pag. 21
Análisis	Pag. 22

Diseño

Normativas aplicables	Pag. 25
Informes y estudios sobre seguridad	Pag. 28
Modelado	Pag. 30

Resultados

Covid-19	Pag.
Conclusiones finales	Pag.
Desarrollo a futuro y otras aplicaciones	Pag.

Bibliografía

Pag.

Anexos

Análisis de los datos extraídos de ensayos	Pag.
--	------

INTRODUCCIÓN

Concreta con mayor precisión el tema del trabajo: expone los objetivos, el alcance, los trabajos previos en los que se apoya y el contexto en que se realiza.

En líneas generales aborda desde el principal problema hasta las preguntas mas básicas como: ¿Que es un casco?

Objetivo

El objetivo final de este trabajo es el diseño de un casco ciclista basado en superficies minimales continuas triples periódicas (TPMS). Que a ser posible se equipare a la protección del usuario frente a impactos con un casco comercial basado en EPS. Evitando así los problemas derivados de la reciclabilidad y desechado típicos del producto objeto de este trabajo.

Alcance

El proyecto pretende tener en cuenta principalmente los aspectos relacionados con:

- Conocimiento del producto, funciones, construcción y regulación.
- El desempeño de la propuesta frente a los requisitos necesarios según el uso del producto
- El diseño del casco respecto a otros factores influyentes en caso de accidente. Ya sean señalados por las propias normativas pertinentes, o por estudios sobre la materia.

Por ello el proyecto se dividió en las siguientes partes con el fin de acotar claramente cada una de ellas :

Investigación sobre el estado del arte, destinado a conocimiento del producto e implicaciones de este.

Información sobre cascos ciclistas, tipologías partes y construcción
Normativas relativa al diseño y ensayo de cascos para ciclismo
Recopilación de alternativas al EPS
Información sobre TPMS y sus propiedades

Análisis experimental, cuya finalidad se encuentra en evaluar el desempeño de la estructura propuesta.

Elección de TPMS y estudio de sus parámetros
Elección de materiales
Preparación y ensayo de probetas
Estudio de los resultados arrojados por los ensayos
Evaluación final de datos experimentales

Diseño CAD, para la creación del modelo en 3D del casco.

*Escaneado de un casco existente para obtener el modelo tridimensional como referencia.
Modelado de estructuras TPMS (Superficies Mínimas Triplemente Periódicas)
Modelado del nuevo diseño del casco.

Herramientas

En este trabajo se han empleado gran variedad de herramientas y recursos, los más destacados son:



Contexto del trabajo

Este trabajo se desarrolló como respuesta a la propuesta de TFG “Desarrollo de cascos de bicicleta en nuevos materiales” por Ramón Miralbes Buil, dentro del departamento de diseño y fabricación del área de expresión gráfica en la ingeniería (Eina).

La idea parte de que en un mundo cada vez más concienciado por la sostenibilidad y el reciclaje de los productos desechados, no existe una propuesta generalmente aceptada de sustitución del EPS como material indispensable para cascos en el ciclismo.

Actualmente, gracias al desarrollo de otras tecnologías de las cuales hablaremos mas adelante, se abren nuevas posibilidades a la hora de proponer nuevas soluciones o comprobar otras ya teorizadas. Es el caso de la fabricación aditiva, o impresión 3D como se le conoce mas comúnmente. Nos es un concepto nuevo, pero si que su desarrollado en los últimos tiempos ha permitido la reducción en costes y por consiguiente su democratización. El cambio de dinámica que plantea a la hora de producir piezas y componentes, libera de muchas de las restricciones a las que la industria estaba sujeta hasta ahora.

Esta nueva forma de fabricación da entrada a implementar ideas como la de las superficies minimales. Un tipo de estructuras matemáticas teorizadas en el siglo XIX, que ya eran conocidas en la arquitectura por su ligereza, resistencia y armonía, pero imposibles de adaptar a un proceso de fabricación industrial tradicional.

Un caso particular son las TPMS por sus siglas en ingles o Superficies Minimales Periódicas Triplicadas en español. Propuestas por Hermman Schwarz, suponen una estructura minimal que se repite periódicamente en los tres ejes del espacio. Que a demás de ser muy versátil destaca por su gran resistencia para el poco material necesario en su construcción. Estas cualidades muy deseables en muchas aplicaciones, pero especialmnete relevantes en el caso de los cascos para ciclistas.

Adicionalmente se han observado que se comportan como materiales celulares y por tanto también contarían con la capacidad de absorción de impactos. Esto se muestra en diferentes estudios como:

- **Maskery I., Sturm L., Aremu O. A. et al. 2018.** *Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing.* Polymer, vol. 152, pp. 62-71. ISSN 00323861. DOI 10.1016/j.polymer.2017.11.049.
- **Abueidda, D.W. et al., 2017.** *Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures.* Materials and Design [en línea], vol. 122, pp. 255-267. ISSN 18734197. DOI 10.1016/j.matdes.2017.03.018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.018>.

¿Qué es un casco?

Los cascos de protección son un elemento indispensable en la utilización de un medio de transporte como la bicicleta. Ya no sólo por la reducción en el riesgo de sufrir secuelas tras un accidente, sino por que en ocasiones su uso es obligatorio por ley.

Por ellos la unión europea cataloga estos como EPIs (Equipos de Protección Individual) de tipo II y para recibir la certificación CE han de ser acordes a la norma EN 1078:2012

De acuerdo con esta norma un casco se define como:

“Un artículo que cubre la cabeza destinado a absorber la energía de un impacto, reduciendo así el riesgo de lesiones en la cabeza”

A pesar de que en la comunidad científica no hay un consenso sobre cuanto ayuda a reducir las probabilidades de sufrir lesiones en la cabeza, si lo hay en que lo consigue. Por ello existe un debate sobre si el uso del casco debería ser obligatorio o si solo se debería promover su utilización.

En la comunidad ciclista sin embargo si hay mas conciencia en la importancia de su uso, porque si está claro que ayuda a proteger, ¿merece la pena correr el riesgo de no usarlo? Probablemente por eso cada año se aprecia como más y más ciclistas admiten usar el casco, echo que se refleja en los indices estadísticos.

Tanto es así que la industria alrededor de la seguridad ciclista se desarrolla a un ritmo muy rápido, y la competencia entre fabricantes de cascos es cada vez más ajustada. Se ha convertido en un campo de estudio e innovación que poco tiene que envidiar al de otros sectores.

Es por ello que en este trabajo se pretende explorar una alternativa a sustancialmente diferente a la tendencia actual en la construcción de un casco ciclista.

Secciones

Estado del arte, es una sección en la que se da un poco mas de contexto al producto objeto de este trabajo. Evolución, estado actual, de que se compone y sus funciones. También explora las tendencias de vanguardia y las oportunidades que pueden surgir.

Propuesta, este apartado contiene la gran mayoría de la información relevante del trabajo. La parte más técnica, laboriosa y núcleo entorno al cual se orienta el trabajo, ensayos, análisis de datos y decisiones críticas.

Diseño, es la parte relacionada con el producto en si. En esta se exponen todos los retos que entraña el diseño del casco y se justifican las decisiones tomadas para cumplir con los objetivos.

Resultados, cierre del proyecto, donde se expone lo aprendido y se reflexiona sobre el proceso llevado a cabo.

ESTADO DEL ARTE

¿Cual es la historia del casco para ciclistas? ¿Cuando empezó y cual fue su evolución?

¿En que situación se encuentra actualmente la cabeza de un ciclista en cuanto a su integridad física y que se tiene en cuenta para su seguridad en la vía publica?

¿Cuales son los retos técnicos que se deben abordar con el fin de seguir mejorando la protección a los usuarios?

¿Que problemas y las oportunidades se presentan en el futuro de este campo?

Esta sección pretende dar respuesta a estas preguntas y arrojar algo de luz sobre las diferentes vías de desarrollo existentes a día de hoy en esta materia.

Historia

Los cascos para ciclistas tal y como se conocen hoy en día aparecen en la década de 1970, en el catálogo de empresas ya dedicadas a la producción de cascos para el mundo del motociclismo y automovilismo. Al no existir precedentes ni estándares de seguridad aplicables los modelos disponibles eran variaciones de las líneas de producto diseñadas para los campos ya mencionados, y se catalogaban como protecciones ligeras para estos. Lo que por su elevado peso, escasa ventilación y demás inconvenientes no ayudaba a su aceptación.

Anteriormente se habían utilizados las llamadas chichoneras, que si bien partían de la misma idea de amortiguar la caída, la protección que ofrecían era realmente baja, ya que generalmente se fabricaban en cuero y rellenas de almohadillado blando.

En 1983 se lanzó el primer casco basado en poliestireno "Bell VI-Pro" homologado oficialmente para la competición. Este debido a la densidad de su material seguía siendo ligero a la vez que protegía significativamente mejor que el resto de modelos disponibles. Este supone el inicio de los cascos modernos y desde entonces el EPS ha sido el material predilecto para asegurar la protección craneal a los ciclistas.



Chichonera

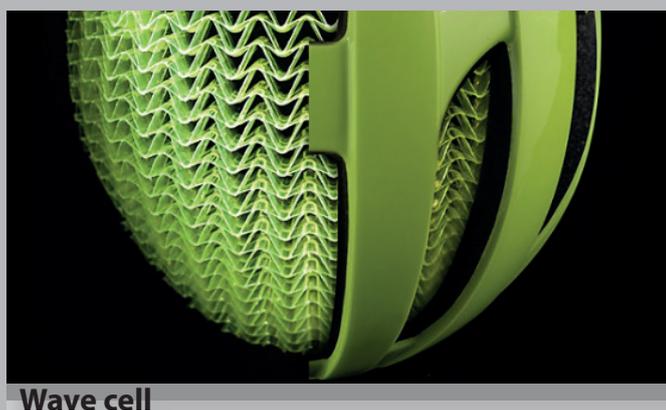


Bell VI-Pro

Tras ese hito la evolución no se ha detenido, ya sea con el uso de materiales cada vez más ligeros y resistentes, o con el empleo de espumas de diferentes densidades. Sin embargo el uso del EPS como material de amortiguación frente a impactos sigue siendo el pilar básico del concepto en sí mismo.

Sólo en los últimos años se están desarrollando diferentes opciones a este sistema presente desde hace ya casi 40 años. Hablamos de tecnologías como Wave cell o estructuras de panal de abeja.

Alternativas y/o complementos que pretenden mejorar las características y limitaciones de los modelos basados únicamente en la espuma de poliestireno.



Wave cell



Panal de abeja

¿Como es un casco?

Los cascos que encontramos actualmente en el mercado pueden ser divididos en:

Carcasa

Es la capa más exterior del caso. Generalmente rígida y dura, su función principal es la de proteger las capas internas del casco y mantener todo el conjunto unido. También absorbe inicialmente el impacto y ayuda a reducir la fricción entre el casco y la superficie de impacto, evitando situaciones comprometidas.

Se fabrican de muchos materiales diferentes, desde plásticos duros como el policarbonato, hasta materiales compuestos como la fibra de carbono, estos suelen estar determinados generalmente por la gama del producto.

Carcasa externa



Revestimiento interior

También llamada **calota**, es la parte más importante del casco ya que su función es absorber la mayor cantidad de energía en el impacto como sea posible. En esta parte es donde se encuentran las mayores diferencias entre cascos y tecnologías aplicadas, ya que es el componente clave para el desempeño de este producto.

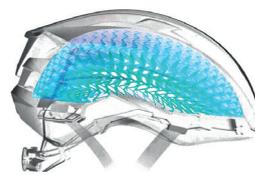
A pesar de que no hay una forma específica de obtener la absorción de energía, a día de hoy la gran mayoría de cascos utilizan las espumas de poliestireno con este fin. En algunos se combinan capas de espumas de diferentes densidades, modificando la amortiguación dependiendo de la fuerza y zona del impacto sobre el casco. A día de hoy casi el total de cascos cuentan también con refuerzos internos, que se encargan de mantener la integridad del casco en caso de colisión debido a la naturaleza frágil de la espuma de EPS.

Junto con este revestimiento el casco puede contar con aditamentos que le ayuden o complementen a desempeñar su función principal:

Acolchado, habitualmente se incluye un juego de almohadillado de diferentes grosores. Esto se hace para terminar de acomodar el casco a la cabeza del usuario y mejorar el confort durante su uso.



Sistemas de dispersión de energía, recientemente algunos cascos han empezado a integrar sistemas que en lugar de absorber la energía del impacto la disipan. De esta forma se reduce el estrés sobre el resto de componentes del casco y por consiguiente en el cráneo.



Sistema de retención

Son el conjunto de elementos encargados de asegurar el casco al usuario en todo momento. De gran importancia, ya que durante un accidente es fácil que sufra múltiples impactos y las probabilidades de que no se mantenga en su posición o incluso salga despedido serian altas sin los sistemas de sujeción adecuados. Los componentes del sistema de retención suelen ser:



Sujeción occipital, es un ajuste para la protuberancia occipital del cráneo del usuario, su función es evitar el desplazamiento longitudinal del casco.



Barbuquejo, correas ajustables que se unen bajo la barbilla para sujetar lateralmente el casco. Suelen ser correas de nailon y clipajes de plástico rígido que permiten su ajuste según la morfología del portador.

Fabricación

En la fabricación, se emplean esferas de poliestireno pre-expandido como materia prima. Estas se introducen en los moldes de la calota, por medio de vapor se vuelven a expandir, pero esta vez confinadas por el molde acaban fundiéndose entre sí. Después se enfrían con agua y se extraen del molde, obteniendo la pre-forma del revestimiento interno.

Para la carcasa, se parte de planchas de cualquiera que sea el material elegido y se le da la forma deseada por termo-conformado. En los cascos más asequibles se utiliza PET, mientras que para los tope de gama se utilizan polímeros más resistentes o composites.

Posteriormente la carcasa se une al revestimiento interior, mediante resinas compatibles con el poliestireno o incluso cintas adhesivas industriales. En cascos de alta gama sin embargo, la carcasa se coloca en el molde de la calota antes de su conformado, esto se conoce como adhesión "In-mold" lo que garantiza una unión homogénea y de mayor calidad. Pero esta técnica limita la selección del material usado en la carcasa externa, pues debe soportar las condiciones y altas temperaturas típicas del moldeo del EPS.

A continuación sobre el estructura ya básica del casco se realizan los orificios necesarios para anclar los sistemas de retención. En estos y junto con la ayuda e unos apliques diseñados específicamente se fijan tanto las correas del barbuquejo como la sujeción occipital. De esta forma es como a grandes rasgos suelen producirse la gran mayoría de los cascos disponibles en el mercado.

Tipos de casco

Al centrar la atención en estos elementos de seguridad pronto percibe la gran diferencia existente de unos a otros, siendo la función principal de todos la misma. Para entender las razones de esta diversidad a continuación se realiza una clasificación de las principales tipologías que se pueden encontrar en el mercado.



Integral: es un casco que cubre completamente el cráneo y pueden incluir también la mandíbula. Suelen estar considerablemente reforzados, por ello son probablemente los que promueven una mayor protección general. Por contra la ventilación no es tan buena y suelen ser más pesados que otros tipos de casco.

Estos se utilizan en disciplinas como enduro o trial, donde las caídas son más habituales y el entorno podría agravar las consecuencias de un accidente.



Mixto: de diseño más tradicional, son muy compactos y cuentan con numerosas entradas de aire lo que facilita la refrigeración. Es el tipo de casco más popular y la referencia para un uso generalista.

Son muy polivalentes y se usan tanto para ciclismo en ruta como para mountain bike, uso urbano etc...



Aerodinámico: son cascos modelados con la intención de ser lo más eficientes en cuanto a aerodinámica se refiere. Cuentan con una cola en la parte posterior de la cabeza y suelen ser de exterior liso y redondeado, las entradas de aire son escasas o inexistentes. Además, en su construcción se suelen integrar ciertos accesorios habituales en el ciclismo como lentes o pantalla transparente para mejorar el rendimiento aerodinámico del conjunto.

Se utilizan en disciplinas donde la diferencia entre el éxito o el fracaso está en la última décima o kilovatio, como contrarreloj, ciclismo en pista o triatlón.

La problemática del EPS

Atendiendo a su composición el EPS es un hidrocarburo de cadena larga formado por un 95% de poliestireno y un 5% de gas pentano, que actúa como agente de expansión. De tal forma que puede llegar a contener más de un 95% de aire en su interior.

Se trata pues de un material celular de estructura cerrada y muy baja densidad, conocido por su escasa conductividad térmica, su capacidad amortiguadora de impactos y su resistencia en relación a su masa.

Los **materiales celulares**, son los compuestos por dos fases, una sólida y un fluido. La fase sólida forma una red interconectada de columnas y placas que forman los bordes y paredes de las celdas. El fluido, comúnmente aire o vacío, se aloja en esta estructura.

A estos materiales, cuando sus celdas se encuentran agrupadas en un espacio tridimensional, se les llama espumas. Si las celdas sólidas están conectadas únicamente por las aristas y el fluido es capaz de desplazarse entre las celdas se les denomina espumas de celda abierta. [1]

Los materiales celulares tienen una curva de tensión-deformación similar bajo esfuerzos de compresión. Esta curva tiene tres zonas bien definidas y dependen directamente de la densidad del material y del tipo de célula que presentan Fig 1:

1. Zona elástica: durante esta etapa la energía se disipa por la flexión o el pandeo de las micro-estructuras internas del EPS y la compresión del aire atrapado dentro ella. Dependiendo de la densidad de la espuma pueden verse pequeñas deformaciones, que al ser elásticas, según la ley de Hook, son reversibles.

2. Zona plástica o Plateau: el esfuerzo de fluencia marca esta etapa donde empieza a colapsar la estructura celular cerrada. Las paredes de las celdas se pandean y el aire atrapado se comprime hasta provocar la rotura de alguna de ellas. Estas deformaciones son ya irreversibles y se aprecia claramente una reducción del volumen de la muestra.

3. Zona de densificación: tras el colapso de la estructura celular, el material continúa disipando algo de energía debido a la expulsión del aire aún atrapado en su interior. La estructura del material deja de comportarse como una espuma y pasa a ser prácticamente como un sólido. El volumen de la muestra es una fracción muy reducida del volumen inicial.



Fig 1 . Diagrama de fases típico de los materiales celulares como el EPS

Las espumas de poliestireno se usan ampliamente en la industria para amortiguar golpes y sus posibles consecuencias. El uso de materiales espumados da como resultado una mejora significativa en la seguridad pasiva, debido a sus propiedades de disipación de energía. Además, teniendo en cuenta su baja densidad, que son relativamente baratos y la libertad de diseño que permiten, ya que pueden ser moldeados fácilmente en geométricas complejas, no ha de extrañar su gran popularidad.

En la fabricación de los cascos para ciclismo, se emplean esferas de poliestireno pre-expandido como materia prima. Estas se introducen en los moldes de la calota y por medio de vapor se vuelven a expandir, pero esta vez confinadas por el molde acaban fundiéndose entre sí. Para finalizar se enfrían con agua y se extraen del molde, obteniendo un producto con la forma final y un buen acabado superficial.

Los motivos por los que se están investigando otros sistemas de absorción de impactos frente a la hegemonía de las espumas de poliestireno son principalmente:

- **La optimización** se basa en conseguir un mayor rendimiento por unidad en la absorción de impactos, generalmente se suelen eliminar recursos (material) de las zonas donde no es tan efectivo y reforzar las zonas donde si lo es.

Las espumas de PS no son las mas adecuadas a la hora de diseñar estos sistemas optimizados ya que por su proceso de fabricación el resultado es un material heterogéneo. Y aun que si pueden modificarse ciertos parámetros en su producción, estos se limitan a su micro-estructura. Por lo que limita las posibles actuaciones, debiendo usar diferentes capas o secciones intercaladas del mismo material modificado, dificultando el proceso de manufactura en los cascos y disminuyendo su efectividad final.

- **Disipación de calor**, uno de los factores más importantes para el confort de un ciclista con respecto al casco. Si bien no se ha detectado reducción alguna en la capacidad de refrigeración corporal llevando casco, sí puede afectar a la sensación de comodidad y percepción térmica durante la actividad física.

Es por eso que el EPS no posee cualidades idóneas para este aspecto, ya que se trata de un material excepcionalmente aislante, con una conductividad térmica entre los 0.041 y 0.029 W/mK.

- **Fragilidad**, se trata de una característica que afecta a su capacidad de absorción de impactos. Una rotura frágil supone el fallo temprano de la estructura del casco comprometiendo al integridad del mismo.

- **Reciclaje**, aun que las espumas de poliestireno si pueden ser recicladas, la realidad es que debido a su baja densidad y el gran volumen que ocupa el proceso no resulta rentable. Por lo que las piezas de este material apenas se reciclan, esto supone un problema medioambiental pues los desechos de este material tardarían más de 500 años en degradarse de forma natural.

Alternativas

Debido a los problemas del poliestireno en los últimos años están surgiendo diferentes propuestas, estas suelen tomar principalmente dos vías. La de la sustitución del Poliestireno con materiales cuyo huella ecológica sea menor o las que plantean una mejora en el rendimiento en la absorción de impactos, con sistemas y estructuras muy estudiadas y optimizadas. Algunos de los ejemplos más notables son:

Cyclo es una empresa que fabrica cascos basados en una estructura de panal de abeja, que tras invertir cientos de horas en software de simulación aseguran una mejora del 68% el control del impacto sobre el casco. Adicionalmente su estructura conseguiría una mejor ventilación evitando uno de los problemas mas comunes en los cascos tradicionales. Cyclo también afirma que sus cascos están fabricados con plástico reciclado recuperado de playas y mares, y al no contar con EPS en su estructura puede ser reciclado de nuevo.



Cellutech es un laboratorio de investigación en materiales avanzados que tras experimentar con celulosa desarrollo un prototipo de casco enteramente basado en materiales provenientes de los arboles. La cubierta exterior del casco está hecha de contrachapado de madera y la correa de papel duradero, mientras que la calota de amortiguación interior está hecha de Cellufoam™. Un material basado en nanocelulosa producida a partir de pulpa de madera y, por lo tanto, es renovable y biodegradable.



EcoHelmet es un prototipo ganador del premio Dyson de diseño en 2016. El casco hecho de cartón, fabricado a partir de papel reciclado, absorbe la energía del choque deformando su estructura de panel de abeja radial y cumpliendo los estándares de seguridad actuales. Cuenta también con un revestimiento biodegradable que lo hace impermeable durante un tiempo aproximado de 3 horas.

Debido a los recursos empleado en su fabricación y su diseño plegable no solo lo hace fácil y ligero de transportar sino que se espera sea muy económico.



Kupol es probablemente el concepto mas diferencial respecto a de los presentados en este trabajo. Un proyecto que busca financiación para un casco que incorpora tres soluciones que trabajan conjuntamente para proteger al usuario.

Bajo la carcasa exterior alberga unas pequeñas piezas de goma que absorberían cargas de impacto medias. Estas que se encuentran fijadas al núcleo del casco, más rígido e impreso en 3D, al colapsar reduce la mayoría del impacto. Finalmente otras piezas elásticas unidas al núcleo, denominadas tentáculos, adaptan el casco al cráneo del usuario maximizando el confort y disipando en forma de movimiento relativo parte de la energía del impacto.



Hexr es una empresa que fabrica cascos a medida del cliente. Gracias a escanear su cabeza y junto con una estructura de panel de abeja, aseguran ser un 26% más seguros que un casco de poliestireno corriente. Según aseguran se fabrican en materiales completamente renovables y mediante impresión 3D.



Fabricación aditiva

La **fabricación aditiva** es un concepto de producción a través del cual el material es depositado capa a capa de manera controlada allí donde es necesario. Comúnmente conocida como **impresión 3D**, produce formas geométricas personalizadas según las necesidades requeridas de una forma más rápida, precisa y con un ahorro de costes significativo respecto al resto de técnicas de fabricación. Es más, al utilizar el material justo y necesario para fabricación de la pieza no se genera deshecho alguno.

Este método de fabricación está estrechamente relacionado con diseño asistido por ordenador (CAD), ya que los modelos reproducidos son creados mediante este tipo de software. Una vez se ha obtenido el modelo deseado, y mediante otro software de pre-procesado, se establecen los parámetros ideales para su impresión y se convierte a un formato compatible con la impresora. Por último la impresora, de forma autónoma, se encarga de replicar físicamente el modelo. En algunos casos las piezas resultantes podrían requerir de un pos-procesado o tratamiento final, pero eso depende ya de la tecnología utilizada.

Pero a pesar de todas sus ventajas las actuales limitaciones para grandes volúmenes de producción, la relegan al campo del prototipado rápido. Donde la producción de nuevos componentes, las geometrías complejas, la completa funcionalidad de las piezas y las tiradas cortas, explotan a la perfección las capacidades de la técnica.

Es por ello que dada la naturaleza de este proyecto y a las características del producto que se pretende desarrollar, las cuales se explicarán más adelante, encajen a la perfección con la impresión 3D y las posibilidades que ofrece.

Dentro de la fabricación aditiva, y al tratarse de una disciplina en expansión existen multitud de tecnologías diferentes con las que obtener el producto deseado. A grandes rasgos estas se podrían dividir en las siguientes categorías:

Fused Depositon Modelling (FDM): un cabezal robotizado se mueve sobre el plano y funde un filamento del material con el que es alimentado, este se va aportando capa a capa para se crea una pieza en tres dimensiones. Es la base de las conocidas impresoras 3D y su principal ventaja es el bajo coste del equipamiento junto con la posibilidad de trabajar con diferentes materiales al mismo tiempo.

Estereolitografía (SLA) y PolyJet: las piezas se producen a partir de resinas líquidas que se polimerizan al por la acción de un haz de láser. El proceso originario fue la estereolitografía, pero posteriormente se desarrolló el polyjet, que se basa en curar la resina con múltiples haces de luz ultravioleta. El resultado es una pieza con excelente calidad tanto en precisión dimensional como en acabado superficial. La principal desventaja que plantea es la utilización de materiales específicos para este tipo de proceso.

Fusión selectiva de lecho de polvo (SLM, SLS, ...): se basan en la fusión selectiva de una capa previamente depositada de polvo del material con el que se desea imprimir. El proceso se realiza dentro de una cámara pre-calentada y que puede tener una atmósfera controlada para evitar la oxidación. La pieza resultante se obtiene a partir de la fusión y posterior re-solidificación capa a capa, pudiendo obtener piezas en diferentes materiales, incluyendo metálicos, polímeros, etc.

Inyección directa de material (DLMD, Laser Cladding, ...): consiste en el aporte de un material, tanto en polvo como filamento, sobre el material base fundido. Se emplea tanto para la fabricación aditiva de detalles o estructuras sobre piezas previamente fabricadas, como para reparar zonas dañadas. La principal ventaja su aplicación sobre piezas obtenidas por otros procesos.

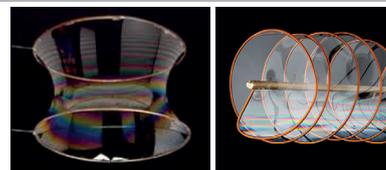
LA PROPUESTA

La propuesta de este trabajo se basa en la utilización de Superficies Mínimas Triplemente Periódicas (TPMS por sus siglas en inglés) como alternativa al uso de la ya mencionada espuma de poliestireno como método para la absorción de energía en los impactos.

TPMSs

Para entender que es una TPMS primero es necesario el concepto de superficie mínima o minimal, generada como solución al problema de Plateau. Esta se define como toda aquella superficie del espacio real tridimensional que conteniendo en si misma una curva cerrada dada, tiende a reducir su extensión al mínimo. Generalmente se pone el ejemplo de las laminas de jabón, esto se debe a la tendencia natural de los sistemas al menor gasto de energía y la relevancia que estas tuvieron en el estudio de la materia.

PROBLEMA DE PLATEAU (I): *Dada una curva de Jordan $\Gamma \subset \mathbb{R}^3$ ¿existe alguna superficie que minimize el área de entre todas las superficies con topología prescrita cuya frontera es Γ ?*



Las superficies mínimas son pues las resultantes de un equilibrio de tensiones homogéneas perfectamente optimizado. Esta característica les hace poseer necesariamente de una curvatura media de cero, o lo que es lo mismo, la suma de sus curvaturas principales en cada punto es nula.

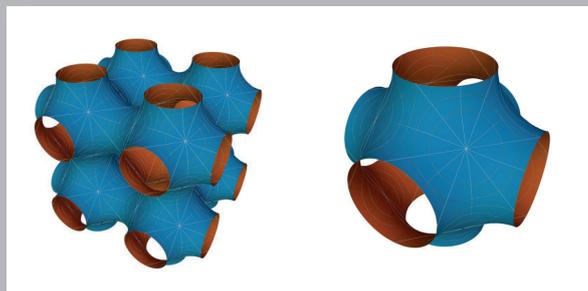
Cuando a una superficie de este tipo se repite en las tres dimensiones hablamos de una **superficie triplemente periódica (TPMS)**, este tipo de estructuras cristalinas se encuentran presentes en la naturaleza y suelen ser objeto de estudio en diversos campos. Esto se debe a su alto grado de efectividad en relación a su densidad y la capacidad de modificar algunas de sus cualidades segun interese, ya que por su naturaleza matemática son ideales para la optimización. [2]

Estas estructuras se comportan como un material celular y dependen en gran medida del material con el que se vayan a construir [3], ya que son las cualidades de este las que se verán potenciadas gracias a las particularidades que las TPMS aportarán:

- **Ligereza**, su gran porosidad consigue que este tipo de estructuras posean una baja densidad. A pesar de que en su construcción no se empleen materiales especialmente ligeros la densidad por unidad de volumen se verá reducida en gran medida, se espera que hasta el punto de poder rivalizar con las EPS.
- **Resistencia**, la superficie elegida de por si tiende a optimizar la resistencia de la estructura en su conjunto, si se une a un material con un ****modulo de Young**** superior al del poliestireno, el cual es un material frágil, ayudara positivamente en la absorción de energía en caso de impacto.
- **Disipación de calor**, por sus cualidades intrínsecas las TPMS ofrecen una gran superficie expuesta por unidad de volumen, lo que permite el intercambio de calor de forma muy eficiente, a expensas del material usado en su construcción. También el hecho de que se traten de estructuras de célula abierta permite que el aire fluya a través haciendo las veces de ventilación pasiva. Estas características aumentarían considerablemente la refrigeración del casco, proporcionando un mayor confort al ciclista.
- **Reciclaje**, no es una ventaja específica de las TPMS más allá de que emplear el mínimo material posible para la consecución de la tarea encomendada. Pero en concreto y aplicado para el caso que nos concierne la mejora radica en el la eliminación del poliestireno expandido como elemento fundamental, debido a su compleja/ineficiente reciclabilidad. Si bien es cierto que las estructuras TPMS pueden construirse a base de cualquier tipo de material, teniendo en cuenta el impacto ambiental de este en su elección y la facilidad de desechado del producto, la mejora a nivel ambiental sin duda sería sustancial.

Superficie P-Schwartz

La superficie P-Schwarz o Primitiva de Schwarz es considerada la superficie minimal cristalina mas básica y fue propuesta por Hermann Schwarz, el reconocido padre de las TPMS, en 1865.



Alan H. Schoen fué quien posteriormente nombró a esta superficie "primitiva" porque se compone de dos laberintos congruentes entrelazados, ambos son una versión tubular inflada de la simple red cúbica. Esa es precisamente su principal característica dentro de las superficies minimales periódicas, ya que presenta una perfecta simetría rotacional de 180°.

La superficie puede ser aproximada por la siguiente ecuación:

$$\cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{L}y\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{L}z\right) = t \quad L = \text{periodo} \quad t = \text{desplazamiento}$$

Se eligió esta estructura para el desarrollo del casco, debido a que frente a otras estructuras de la misma familia destaca por tener un mayor modulo elástico y por su gran porosidad, lo que la hacen especialmente interesante para el proyecto [1,4].

Además su característica disposición de red y su simetría facilita la implementación en el objeto del proyecto y se presume que ofrecerá una respuesta más homogénea frente a otras TPMS componente torsional en su comportamiento.

Estructura

Para modelar esta estructura se hace necesario el uso de software especializado, pues la superficie P no es mas que eso, una superficie, por lo que se busca crear una estructura 3D. Para poder aprovechar sus virtudes y adaptarla a las necesidades del proyecto es necesario modificar algunos de sus parámetros.

Tras probar varios programas se decidió el uso de **NTopology**, un software especializado para optimización de piezas y estructuras de geometría topológicas. Esta plataforma da la posibilidad de generar la superficie P-Schwarz y modificar ciertos parámetros de interés de forma sencilla, minimizando problemas relacionados con el espesor de la estructura que se daban en otros programas. Los parámetros relevantes que se exploraron en este trabajo fueron:

Periodo: es el parámetro que determina la proporcionalidad de la estructura. Si todos los ejes (x,y,z) tienen el mismo valor, la estructura no tendrá distorsión alguna, si alguno de ellos tiene un periodo diferente, la estructura entera sera deformada entorno a ese eje, proporcionalmente a la disparidad existente entre los valores asignados para cada uno de ellos.

Escala: modifica la magnitud de la estructura. Es inversamente proporcional al número de celdas por unidad de volumen, cuanto mayor es la escala menos celdas por unidad de volumen tendrá y viceversa.

Grosor: determina el espesor que se le da a la superficie. Es lo que crea la estructura en si, tomando como base la superficie primitiva de Schwarz.

Densidad: aunque el programa no permite modificarla directamente, si permite asignar un valor al material con el que se esta construyendo la estructura. Esto junto a otra herramienta que muestra el peso de la estructura creada ayuda a monitorizar la densidad relativa de la muestra, de esta forma y mediante los parámetros de la escala y grosor se puede ir modificando.

Materiales

Para el desarrollo del proyecto, como ya se ha mencionado anteriormente, el uso de la impresión 3D es parte fundamental. Por ello a la hora de seleccionar la forma de producir los prototipos se optó por la elección de impresoras FDM. Estas son las más conocidas y habituales en el mundo de la impresión en tres dimensiones y sus costes de adquisición, utilización y mantenimiento son muy asequibles. Además el departamento de Diseño y Fabricación cuenta con varios ejemplares a su disposición, lo que resultó especialmente conveniente. Los ejemplares utilizados y los parámetros empleados fueron:



Al optar por la impresión FDM, los materiales a emplear ya se ven limitados por la propia tecnología. Así pues de los disponibles para este tipo de técnica se eligieron los siguientes materiales:

PLA (Ácido poliláctico), es un polímero que se obtiene a partir de almidón de maíz, yuca, mandioca o caña de azúcar. Estable bajo la acción de radiación UV (por lo que no se decolora), es resistente a la humedad y a la grasa, ofreciendo también características de barrera al sabor y olor.

Se trata de un material muy duro y baja elasticidad, comparable al polietileno aun que de densidad menor. Puede ser formulado para tener mayor rigidez o flexibilidad y también copolimerizado con otros materiales. Pero sus características mecánicas dependen principalmente del proceso de fabricación seguido.

PROPIEDADES	Dureza Shore: D77	Tª transición vítrea: 48,8 °C	Densidad: 1,426 gr/cm ³
--------------------	-------------------	-------------------------------	------------------------------------

HIPS (High Impact Polystyrene), termoplástico de mayor resistencia al impacto que el poliestireno sin modificar, que combina dureza con resistencia y flexibilidad. Muy buena adhesión entre capas que se traduce fácil procesabilidad y alta fidelidad que permite en acabados de gran calidad en las impresiones.

PROPIEDADES	Dureza Shore: D73	Tª transición vítrea: 98,7 °C	Densidad: 1,136 gr/cm ³
--------------------	-------------------	-------------------------------	------------------------------------

ABS mejorado, es un material caracterizado por alta resistencia al impacto, y su buen acabado final. Lo que permite producir objetos que requieren de gran durabilidad y que mantienen su forma incluso después de un uso continuado. Además de alcanzar un aspecto de producción final comparable a piezas de fabricación por inyección.

PROPIEDADES	Dureza Shore: D69	Tª transición vítrea: 107,9 °C	Densidad: 1,195 gr/cm ³
--------------------	-------------------	--------------------------------	------------------------------------

Originalmente se planteó el uso de más materiales, así como un mayor número de ensayos. Pero la excepcional situación provocada por el Covid-19 impidió que se realizara la impresión y posteriores pruebas con estos.

Ensayos

Para comprobar empíricamente el comportamiento de las estructuras planteadas en este trabajo, se siguió como modelo la normativa para ensayos a compresión de materiales plásticos celulares rígidos: ISO EN-UNE 844:2015. Si bien no se aplicó al pie de la letra, es la base del procedimiento utilizado.

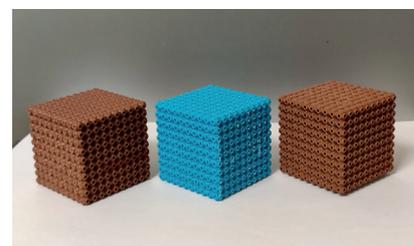
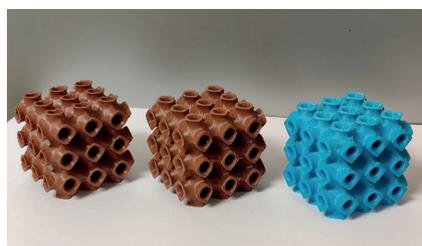
Además del proceso seguido en la mencionada norma, se tuvieron en cuenta procedimientos mencionados en estudios [5] como la elección del tamaño de las probeta y metodología a aplicar.

Con la intención de buscar la máxima eficiencia de la superficie P, se planteó una batería de pruebas a realizar con cada uno de los materiales propuestos para la fabricación del prototipo. De esta forma y tras analizar los datos obtenidos se podría determinar los parámetros más efectivos para el diseño del casco.

Las pruebas consistieron en el ensayo de 9 probetas cúbicas de 50mm de arista (50x50x50), combinando diferentes espesores (0,5 mm / 0,75 mm / 1 mm) con la variación del periodo aplicado a la superficie primitiva de Schwarz (periodo: 5/ 15 / 25). Este último parámetro seleccionado teniendo en cuenta las densidades más representativas del EPS comercial, 60 kgm³, 80 kgm³, 120 kgm³.

Tab. 1

Periodo de la estructura Grosor de la superficie	5	15	25
0.5 mm	5 x 0,5	15 x 0,5	25 x 0,5
0.75 mm	5 x 0,75	15 x 0,75	25 x 0,75
1 mm	5 x 1	15 x 1	25 x 1



Las pruebas se llevaron a cabo con la ayuda de una máquina universal de ensayo, adaptada para procedimientos de compresión.

Esta máquina va recopilando a lo largo del ensayo los datos de fuerza y el desplazamiento, aplicados a la probeta durante el proceso de ensayo.

De esta forma, a partir de ellos y el tratamiento que se les da en la siguiente fase del proyecto se pudieron estudiar las cualidades de cada propuesta.



Instron Model 8032

Máquina de ensayos universal
Servo-hidráulico UTM
Tensión, Compresión, Pandeo, Rotura, Ciclo bajo de Fatiga
Máx. Carga [KN]: 100
Ratio de deformación [1/sec]: 10⁻³ a 10¹

Para mostrar los datos obtenidos y su posterior interpretación se emplearon una serie de procedimientos y gráficas que permiten visualizar mejor los datos obtenidos. Estos se basan en

Análisis

Para realizar el análisis de los datos, ya extraídos en formato digital por la propia máquina de ensayo, se recurrió al programa de hojas de calculo Excel.

En él se desglosaron los datos y clasificaron, con el fin de obtener toda la información necesaria para comprender el comportamiento de la Primitiva de Schwarz como material. Cabe destacar la gran cantidad de datos que esto supone, llegando a dar problemas en ocasiones a la hora de su procesado.

Este análisis se centró en el estudio de las principales cualidades típicas de los materiales destinados a la amortiguación de impactos:

Absorción de energía, la mejor estrategia para reducir las consecuencias de un impacto es la absorción de la energía transmitida. Generalmente este proceso se da debido a la rotura y/o deformación del material protector.

Rigidez, se encuentra estrechamente relacionada con la capacidad de la estructura para absorber la fuerza del impacto por medio de la deformación. Cuanto menor sea la rigidez, más deformaciones se producirán, lo que supone reducir las aceleraciones generadas por el impacto.

Identificar posibles tendencias, en relación con las diferentes variables planteadas en las probetas con el fin de elegir la que mas se ajuste a la aplicación.

Debido a la ya mencionada incidencia del Covid-19, no se pudieron preparar todos los especímenes deseados para su estudio. Es por eso que se tubo que cambiar la metodología para completar el análisis.

Se dividieron las muestras en dos bloques, a los cuales se sometió al mismo proceso de estudio. Con la idea de extraer de cada uno las conclusiones acordes al sus características.

Bloque 1

Nueve probetas fabricadas en ABS, con diferentes periodos y espesores. Su función era la de dar con la mejor combinación de periodo y densidad relativa.

Bloque 2

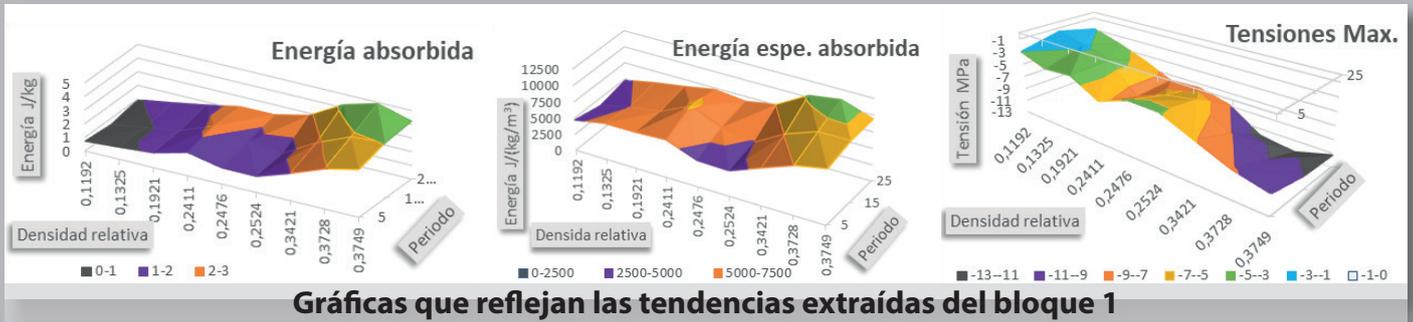
Compuesto también por nueve probetas, estas con igual periodo pero diferentes espesores y en diferentes materiales, ABS, HIPS y PLA, con la intención de hallar el óptimo.

Conclusiones

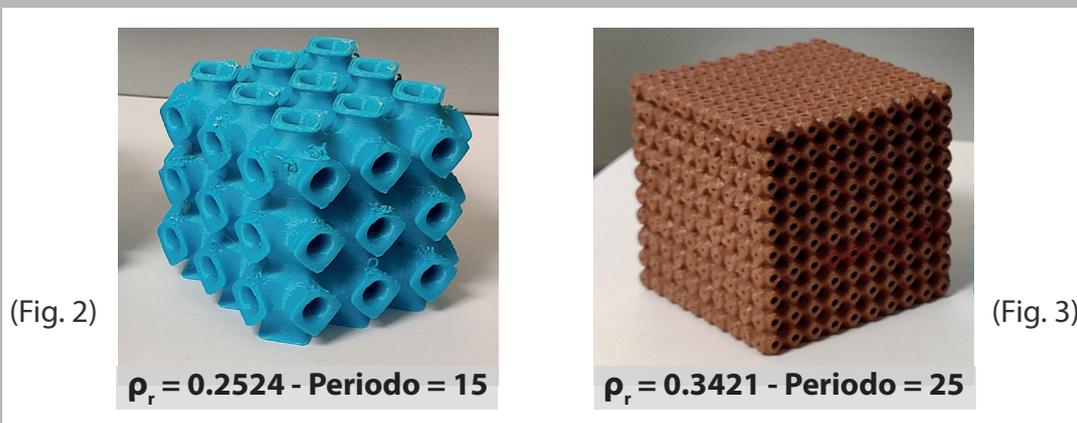
1. En general se observó que el factor mas influyente en las cualidades de la superficie primitiva de Schwarz, como en otros materiales celulares, es la densidad relativa (ρ_r). Un cociente entre la densidad propia de esa versión de la superficie P y la densidad propia del material con el que esta construida. Ya que con el aumento de dicha densidad relativa también lo hace la capacidad del material para absorber energía, y de forma muy notable.

2. Otro de los aspectos se aprecia claramente es el de la suavización de su comportamiento, especialmente en la curva tensión-deformación. Ya que cuantas más celdas posee una probeta, mayor periodo de la superficie P, menores y menos pronunciadas son las oscilaciones apreciables en la zona de la Plateau.

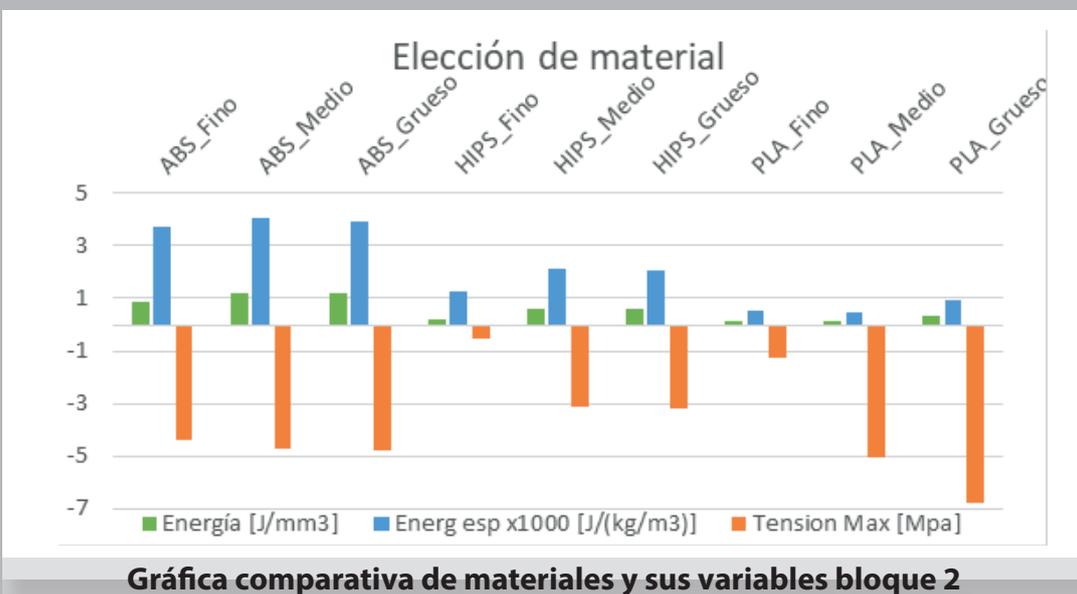
Observando los valores de energía y energía específica absorbidas antes de la densificación del material (punto en el que pierde sus cualidades amortiguadoras debido a su deformación) y a las tensiones máximas, se vio que ambas capacidades de absorción eran inversamente proporcionales a la rigidez estructural, para la Superficie Primitiva.



Por ello con el bloque 1 de probetas se llegó a la conclusión de que la configuración mas equilibrada era (Fig. 2). Sin embargo dado que la absorción de energía es un comportamiento crítico para el producto y los beneficios asociados son grandes, se **propone (Fig. 3) como elección final.**



Por otro lado con el bloque 2 no hubo lugar para la duda, el **ABS** destaco en casi todos los aspectos por encima de los otros dos materiales, HIPS y PLA. Este ultimo mostrándose completamente descartado desde el inicio del análisis, pues se hizo enseguida evidente su comportamiento frágil. Comportamiento opuesto a lo que se buscaba para esta aplicación



DISEÑO

La materialización del trabajo hasta ahora realizado tiene lugar en el proceso de diseño, todos los conocimientos adquiridos y el aprendizaje se reflejan en el modelo de casco ciclista creado.

También se incluye información relevante para su diseño como, las normativas aplicables, y estudios e informes relevantes para una mejora del concepto.

Normativas

Para el diseño del casco se ha considerado como primer paso revisar las principales normativas de estandarización a nivel mundial, con el fin de tener en cuenta la mayor cantidad de restricciones y requerimientos a los que están sujetos estos sistemas de seguridad.

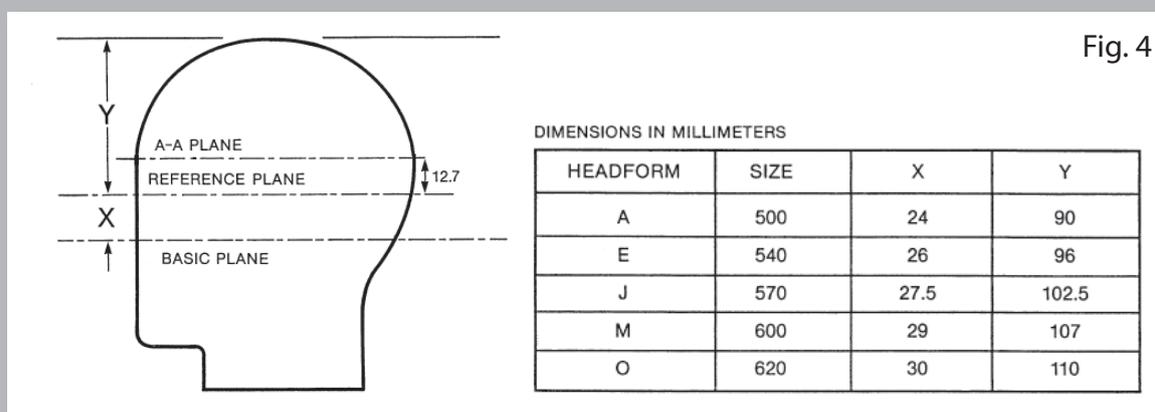
- Normativa Europea (EN-1078):
- Standar Estadounidense (CPSC Part-1203):
- Normativa Austro-Neocelandesa (AS/NZS-2063):
- Fundación en memoria de William Snell (Snell-95):

Todos ellos toman como referencia la extinta Normativa ISO/DIS 6220 que regía las características de las cabezas de ensayo para las pruebas de choque. Actualmente cada organismo la ha ido adaptando en diferentes aspectos pero todas se basan en los principios establecidos por esta:

Se denomina **cabeza de ensayo** a una representación en 3 dimensiones de semejante a la misma parte del cuerpo humano. Esta representación debe obviar los rasgos faciales y los pabellones auditivos y puede ser total o parcial.

Las cabezas se representan según su tamaño en **diferentes tallas**, designadas por el perímetro, expresado en milímetros, medido a nivel del plano de referencia (Fig. 4).

Estas representaciones son reverenciadas mediante planos generales, que se ubican según la talla de cada una.



Plano de referencia, es un plano horizontal situado a una distancia "y" medido en el eje vertical desde la cima.

Plano base, plano horizontal situado a una altura "x" bajo el plano de referencia. Este plano coincide con el de Frankfort, el cual se traza a partir del punto más alto del conducto auditivo externo y el más bajo y externo de la cavidad orbital.

Plano A-A, paralelo horizontal situado a 12.7mm sobre el plano de referencia, considerado la referencia sobre la que medir la talla del casco.

Además de estos planos la superficie craneal de los modelos deben pasar por una **lista de puntos geométricos** cuyas coordenadas se muestran en unas tablas anexas a la norma.

Los aspectos relativos a la seguridad, incluidos en las anteriormente mencionadas normativas internacionales, aun que con sus particularidades y diferencias en limitaciones emplean directrices similares.

Las directrices más relevantes, respecto al diseño de un casco, se recogen a continuación:

Construcción

Haciendo referencia a lo más básico respecto a la forma en que está construido el casco. Tiene en cuenta cosas como la morfología del producto, superficies y materiales entre otros.

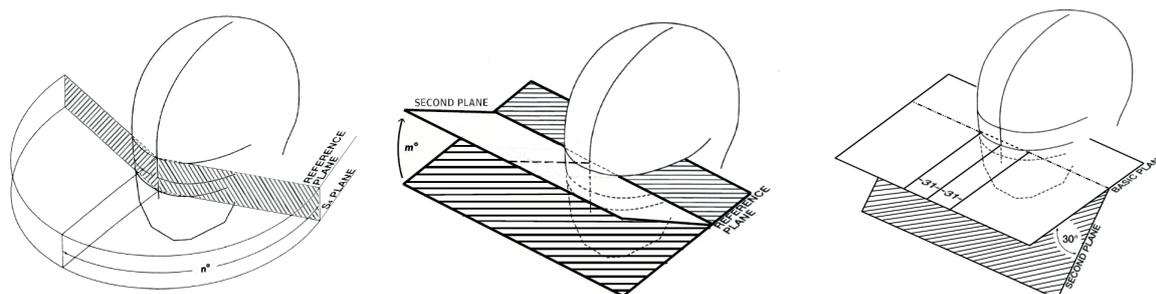
Materiales, deben ser duraderos y no ser dañados por su exposición al sol, agua, vibraciones o temperaturas que puedan ser encontradas en un uso rutinario.

De igual manera se deben tener en cuenta las zonas que se encontrarán en contacto directo con el usuario, y en su construcción no utilizar materiales que puedan causar reacciones y/o alteraciones en la piel. Tampoco deben ser materiales susceptibles a degradarse o modificarse con el sudor o sustancias que puedan estar incluidas en productos cosméticos.

Acabados, todas las formas, como bordes, aristas o protuberancias, que puedan causar algún daño en el usuario en caso de impacto, deben ser suavizadas para evitarlo.

Superficies, cualquier tipo de irregularidad que sobresalga de la superficie curvada exterior o interior del casco debe estar suavizada con el objetivo de minimizar, en caso de accidente, la fricción o posibilidad de impacto tangencial. En caso de que estas protuberancias sobresalgan más de "x" sobre la superficie del casco, estas deben romperse o separarse por el impacto, evitando que se concentren las tensiones en ese punto.

Campo de visión, el casco ha de permitir al usuario mantener clara la visión periférica del entorno. Esto significa un mínimo de "n" de grados desde el plano medio sagital tanto a derecha como izquierda, y una visión frontal superior de "m" grados. Y la referencia del ángulo inferior para cascos integrales.



Angulo de visibilidad	Snell	EN-1078	CPSC Part-1203	AS/NZ-2063
Frontal "n"	110°	105°	105°	105°
Superior "m"	25°	25°	-	25°
Inferior	30°	45°	-	-

Tab. 2

Ventilación, los cascos deben incluir ventilación para transferir el calor generado en el interior. Pero no se especifica como deben ser o que valores ha de cumplir esta ventilación

Absorción de impactos

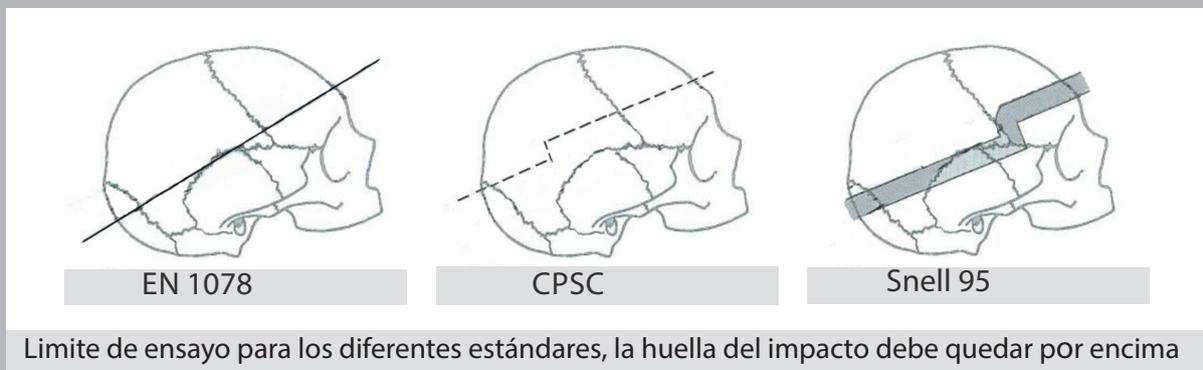
Este apartado alude a los ensayos de caída que debe pasar todo casco para recibir la certificación. En ellos se analizan las aceleraciones que sufre el conjunto de cabeza y casco semejante a la situación de un golpe en un accidente. Para cada normativa las pruebas difieren principalmente en:

Condiciones de ensayo, los test consisten en la caída libre guiada del casco colocado sobre la cabeza de ensayo, que termina impactando sobre un yunque solido. Tanto la altura desde la que se deja caer la cabeza, la energía con la que impacta y su velocidad son variables que difieren dependiendo del estándar para el que se este realizando el ensayo. La superficie del yunque y los requisitos mínimos para superarla también dependen de la norma seguida.

Ensayo de impacto	Snell	CPSC Part-1203	EN-1078	*AS/NZ-2063
Aceleración máxima	300 G's	300 G's	250 G's	250 G's >200 G's durante 3 ms >150 G's durante 6 ms
Superficies de impacto	Plano / Bordillo / Hemiesferico	Plano / Bordillo / Hemiesferico	Plano / Bordillo	Plano
Altura de lanzamiento	2,2m / 1,5m / 1,5m	2m / 1,2m / 1,2m	1,5m / 1m	1,5m
* En esta normativa también tiene en cuenta la máxima fuerza que se transmite a la cabeza:				Fuerza max 500N Altura de lanzamiento 1 m

Tab. 3

Línea de exención, es la que establece la zona del casco sobre la que se deben de realizar las pruebas de impacto y la que esta libre de someterse a ensayo. Esta zona esta obligada a superar todos los requisitos impuestos por el estándar y su no cumplimiento en cualquiera de las situaciones propuestas conllevara el final de la evaluación y la no superación de esta.



Sistemas de sujeción

En referencia al método que mantiene al casco sujeto a la cabeza del usuario, manteniendo este en la posición indicada para garantizar la protección en caso de accidente.

A pesar de ser un sistema relevante para la seguridad, no se encuentra dentro del campo de estudio de este trabajo, por lo que no se tendrá en cuenta.

Marcado e información

Este apartado se refiere a la forma de transmitir al consumidor la conformidad del producto respecto a la norma. Por no ser relevante para la seguridad en si, este apartado no se ha sido analizado en este trabajo.

Informes y estudios sobre seguridad

A la hora de aportar posibles mejoras y/o soluciones en el diseño del casco las posibilidades son innumerables. Desde elementos de seguridad activa muy interesantes, como señales luminosas integradas en el propio casco, hasta elementos pasivos como pueden ser los airbag para ciclistas.

Por ello se decidió acotar el enfoque a un ámbito mas cercano a la temática del trabajo, como sería la absorción de los impactos sobre el cráneo del usuario.

Impactos habituales

Una forma obvia de mejorar la seguridad sería la observación de los daños causados al casco tras los accidentes, evaluarlos y reforzar estos donde se encuentren más habitualmente las fallas. Eso exactamente es lo que se llevo a cabo por Otte D. et al [6], el que clasificaron a partir de una muestra de 164 casos los daños visibles sobre los cascos. Para la segmentación se usó el AIS-Head, un sistema creado por la Asociación para el Avance de la Medicina Automotriz, para clasificar y describir sobre la cabeza la gravedad de las lesiones (Fig 5).

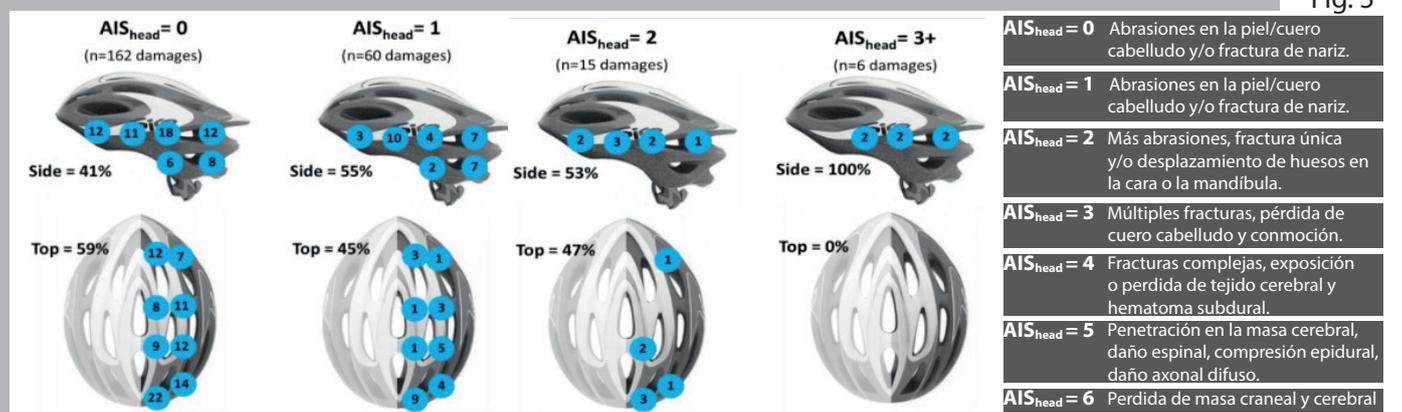


Fig. 5

Como se puede comprobar parece haber una tendencia a que las lesiones más graves se correlacionen con impactos laterales en el casco, mientras que los impactos en la parte superior suelen ir acompañados de lesiones menos graves.

Por otro lado estudios basados en simulaciones [7] de caída también apuntan al lateral como la zona más proclive a recibir impactos. En este caso las simulaciones se hicieron a diferentes velocidades y teniendo en cuenta dos tipos de caídas habituales, (Fig. 6a) caída después de patinar y (Fig. 6b) caída tras chocar con un bordillo. Mostrando además que el borde inferior del casco es donde se concentran la mayoría de los impactos.

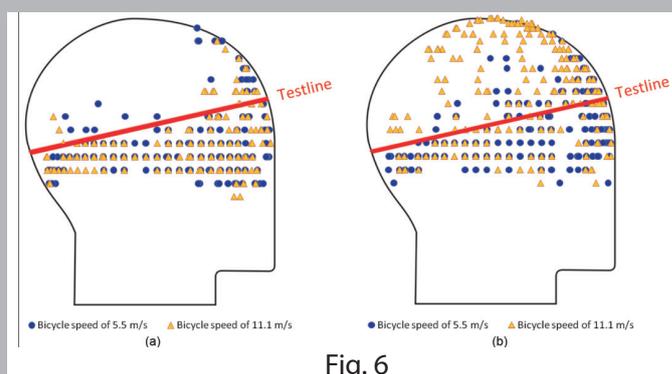
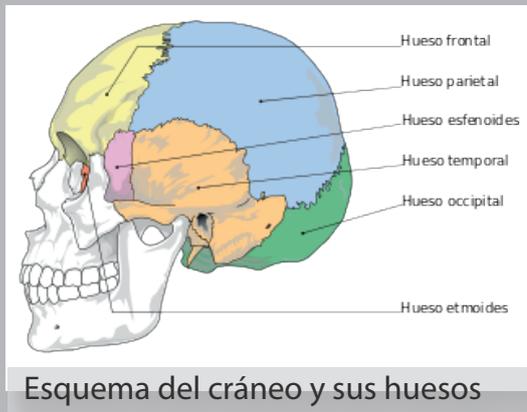


Fig. 6

Zonas frágiles del cráneo

A pesar de la multitud de investigaciones realizadas hasta la fecha en el campo de la biomecánica sobre el traumatismo craneoencefálico, la relación entre las características un impacto, el tipo de lesión y su gravedad sigue siendo un tema de debate. Sin embargo si se atiende a la estadística, La lesión de importancia más frecuente en un ciclista suele ser una fractura craneal, con una incidencia entorno al 86% de los accidentes [8].

Las fracturas de cráneo son muy dependientes de las características locales del hueso en el que se recibe el impacto, de la superficie de contacto, así como de la rigidez de la superficie contra la que se impacta. A pesar de ello y siguiendo lo indicado por Monea A. et al [9], se pueden proponer ciertos patrones típicos de fractura, además de niveles de energía asociada a cada zona:



- **Impactos frontales**, requerirían de entorno a 21 J de energía hasta el fallo. En más del 80 % de los casos presentan fractura lineal que se extiende lateralmente al plano medio, hacia los bordes orbitarios.
- **Impactos parietales**, aproximadamente 10 J hasta la fractura. Esta en más del 85 % e los casos parte de la zona del impacto y se extiende verticalmente hacia la sutura temporo-parietal, aun que la variedad de las fracturas en esta zona aumento con impactos a alta velocidad.

- **Impactos occipitales**, requieren de unos 18 J hasta la rotura. Fractura lineal que en más del 50% de las ocasiones se extiende lateralmente desde el sitio de impacto a la sutura lambdoidea.

Se ha de tener en cuenta que la energía necesaria esta calculada a partir de cráneos desnudos, por lo que los valores teniendo en cuenta el cuero cabelludo y otros tejidos se esperarían superiores.

Cobertura del casco

Una vez se es consciente de las zonas más comunes de impacto y de los puntos débiles del cráneo, sorprende comprobar las zonas de ensayo dictaminadas por las normativas pertinentes.

Pues, la zona frontal y superior se encuentra bien cubierta y es comúnmente ensayada por todos los estándares de seguridad, pero los laterales del cráneo (zona temporal), solo esta cubierta de forma parcial o no lo esta en absoluto.

Si bien es cierto que muchos cascos superan la cobertura mínima establecida en los ensayos, al no ser sometidos a las pruebas en esas zonas su eficacia no esta demostrada. Es más en la mayoría de ocasiones y al encontrarse cerca del borde del casco su eficacia es menor, o lo que es peor un golpe en esa zona podría comprometer la integridad del casco al completo.



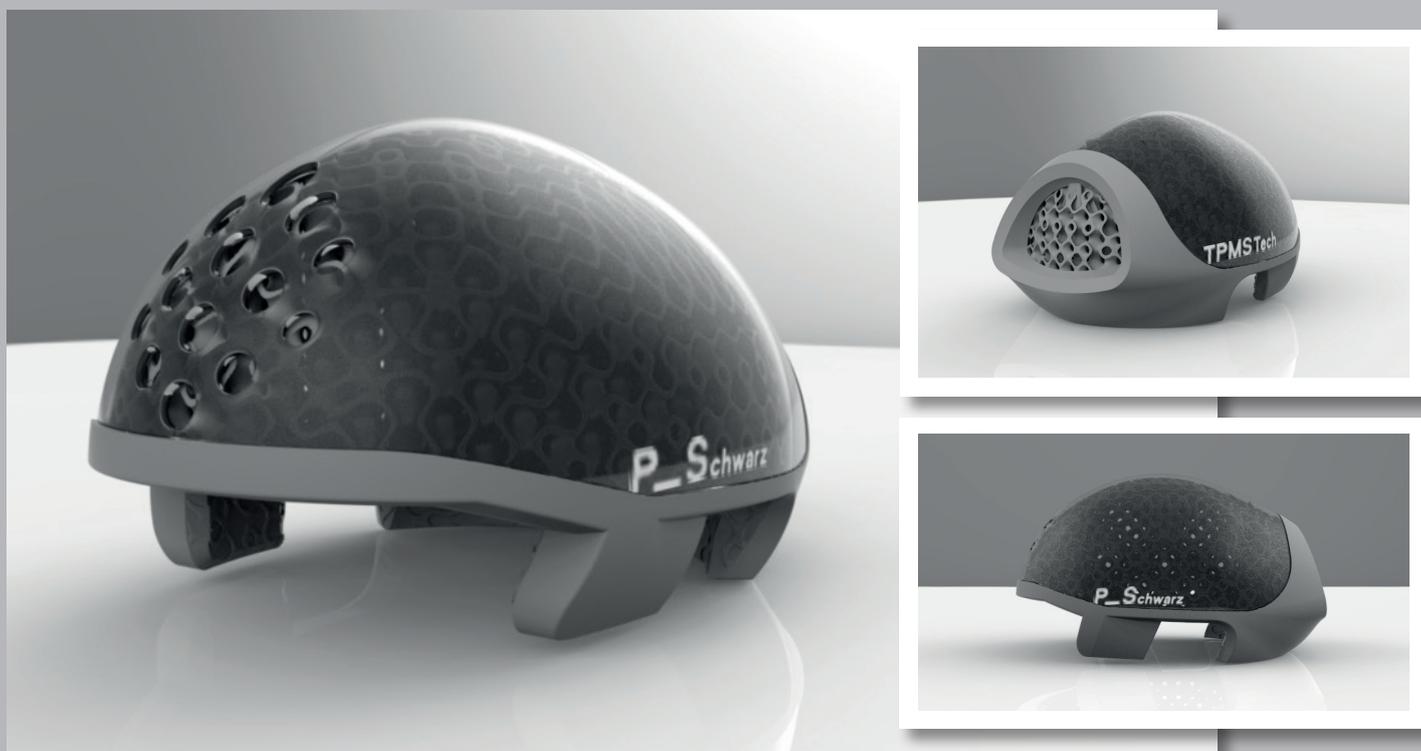
Limite de ensayo para los diferentes estándares, la huella del impacto debe quedar por encima

Así como se menciona en la mayoría de estudios consultados y en varios de los informes de la iniciativa HOPE [10], el diseño de los futuros cascos debería tener en consideración esta circunstancia. Hasta el punto de que desarrollar un efecto protector optimizado en dicha parte del cráneo debería convertirse en un requisito específico incluido en la normativa.

Modelo del casco

Siendo la última parte del proyecto, el casco, no solo es el producto objeto del trabajo, sino que debe servir como pieza final y resumen al mismo.

Debería mostrar su marcado carácter innovador y dejar ver la llamativa superficie Priitiva de Schwarz. Es por ello que, se ha decidido dejar ver su estructura interna a través de la carcasa externa. Haciendo gala de todo lo aprendido y mostrando las posibilidades que ofrece el diseño con superficies TPMS.



El casco se compone principalmente de solo dos elementos:

La calota (Fig. 7), que es la estructura del casco en si misma. La que aporta la forma y el cuerpo al conjunto, que también será la encargará de absorber la energía del choque en caso de accidente.

La carcasa exterior (Fig. 8), una cobertura extra que se fabricaría en un polímero resistente a impactos, como policarbonato o HIPS, aportando una capa más para garantizar la seguridad del usuario. Se une a la calota por medio de unas pesetñas, que tras un impacto se romperían, permitiendo su deslizamiento relativo al resto del casco. De esta forma ayuda a convertir choque en un impacto tangencial disipando parte de la energía en el proceso.

Adicionalmente y por normativa se debería acompañar también por un juego de almohadillados (Fig. 9), de diferentes espesores. Que permitan un mejor ajuste de la cabeza del ciclista al casco.

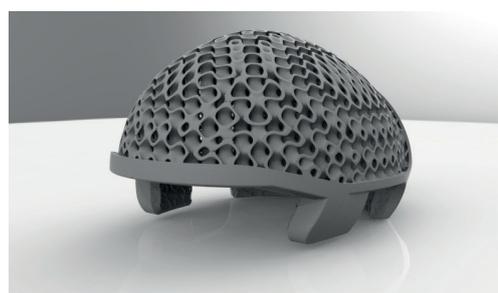


Fig. 7

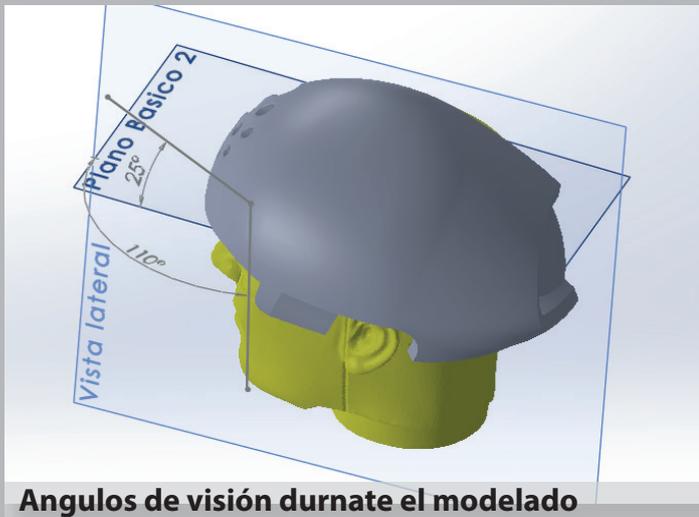


Fig. 9



Fig. 8

Pero a la vez se enfrenta a retos de diseño tradicionales, como son las normativas aplicables o a mejorar la protección del cráneo y sus partes más críticas.



Ángulos de visión durante el modelado

Normativa

El casco cumple con todas las normativas estudiadas para este trabajo, desde los ángulos de visión, hasta las superficies exteriores.

- Aristas interiores y exteriores achaflanadas, para evitar cortes en caso de accidente.
- Carcasa exterior lisa que permite deslizarse por el firme en caso de caída.
- Orificios de ventilación. Tanto de entrada como de salida.

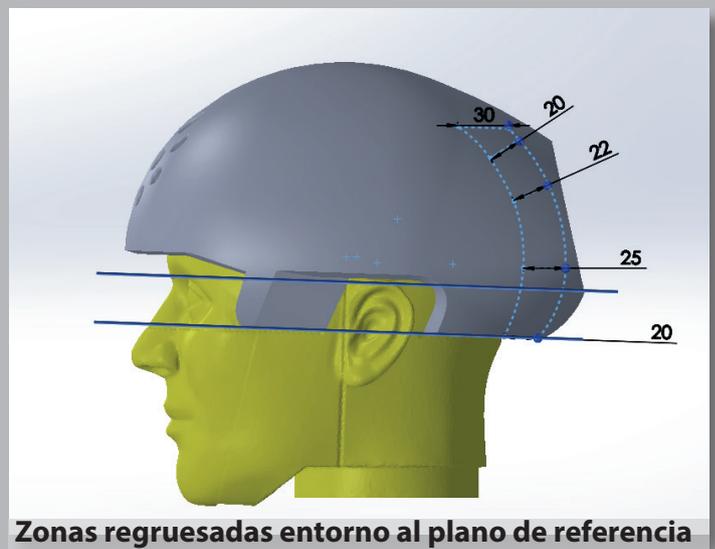
Las únicas excepciones son los requerimientos relacionados con la absorción de energía, los cuales no se pudieron comprobar debido al COVID y sus consecuencias.

Seguridad y protección

Para la protección de las zonas más débiles del cráneo, no solo se siguió la recomendación de bajar la línea inferior del casco, sino que se decidió llevar la cúpula del casco hasta el plano de referencia. Adicionalmente, a partir de ese plano y hasta el plano básico, desde la parte posterior, cuenta con una extensión que pretende proteger occipital y temporales bajos hasta el efemoides.

Un planteamiento ambicioso y alejado de las tendencias actuales, pero cuyo único propósito es garantizar la seguridad de zonas normalmente expuestas a su suerte.

Finalmente, y debido a la gran acumulación de impactos que se acumulan en esa franja, se apostó por dar mayor grosor a las paredes del casco. Un incremento de entre el 10 % y 25% en comparación con el resto del casco.



Zonas regreasadas entorno al plano de referencia

Covid-19

El brote de covid-19 surgido a principios de año junto con la pandemia mundial que desencadenó, y cuyas consecuencias aún hoy sufrimos, como no podía ser de otro modo afectó también al desarrollo de este trabajo.

La ya por todos conocida situación generada por estado de alarma, junto con las restricciones impuestas y decisiones tomadas por parte de la universidad, obligaron a detener parte de las actividades previstas. Dentro de este trabajo ciertas actividades fueron suspendidas y posteriormente eliminadas, tras un replanteamiento del proyecto, debido a las nuevas condiciones y situación académica.

En concreto las actividades que se vieron afectadas y no se pudieron realizar fueron:

- Impresión de parte de las probetas.
- Ensayo estático de parte de las probetas planeadas.
- Análisis de los datos obtenidos de las ya mencionadas probetas en el ensayo estático.

Esto supone un claro impacto en las conclusiones finales, ya que al no disponer de la totalidad de los datos, estas dejan de explorar las relaciones y posible efecto de la propuesta. En su lugar se estima que tendrían un comportamiento similar al observado en las probetas si ensayadas.

- Impresión de un prototipo a tamaño real del casco.
- Ensayo dinámico (en torre de caída) del prototipo.
- Estudio de los datos obtenidos en el ensayo dinámico.

Las consecuencias son que el trabajo no puede asegurar de forma rotunda las observaciones realizadas en los ensayos estáticos y las decisiones tomadas en el diseño del casco. Ya que al no someterse a un ensayo dinámico y por consiguiente a situaciones de ensayo según la normativa pertinente, no se tiene constancia de que las estimaciones hechas durante fases previas del trabajo sean correctas.

Por otra parte debido a la necesidad de reenfocar el trabajo se añadieron las siguientes actividades:

- Investigación y documentación de estudios sobre la seguridad en cascos para ciclismo.
- Diseño del modelo teniendo en consideración los estudios relacionados con la seguridad.

RESULTADOS

Conclusiones finales

Una de las primeras conclusiones sacadas del proyecto tiene que ver directamente con las normativas vigentes sobre los cascos de ciclismo. Queda claro que son antiguas y poco exigentes, puesto que como ha quedado demostrado no cubren las zonas más sensibles de la cabeza en caso de accidente. Una actualización sería extremadamente recomendable.

Otra de las lecciones aprendidas sería la extrema complejidad asociada a campos en incipiente desarrollo. Ya que el estudio e implementación del conocimiento existente, en este caso las superficies matemáticas TPMS, es una tarea muy complicada. Se trata de un campo no muy estudiado, menos aún su aplicación directa a un producto, por lo que encontrar soluciones e información resulta difícil. Además de tener en cuenta la cantidad de variables que pueden afectar en la práctica al rendimiento de estas superficies, teóricamente ideales.

En cuanto al objetivo principal del trabajo, a pesar de los sucesos acontecidos, se ha podido demostrar la viabilidad de diseñar una alternativa a los cascos de EPS, empleando superficies TPMS. Al menos a nivel de prototipo, un hecho nada desdeñable, que deja con la duda de saber si verdaderamente se encuentra al nivel de un casco tradicional de espuma de poliestireno.

Desarrollo a futuro

Partiendo de la necesidad cada vez mayor de materiales ligeros y especializados, la idea de utilizar estructuras matemáticas supeditadas a los nuevos requerimientos, parece una solución lógica.

En el caso concreto de superficies minimales triplemente periódicas, es necesario mucho más estudio. Tanto para conocer sus particularidades y las formas de trabajar con ellas, ya que requieren de un gran conocimiento de todas sus variables, como para llegar a comprender su funcionamiento. Pero por otro lado las aplicaciones son innumerables, ya que al no tratarse de un material en sí mismo, puede ser aplicado allí donde las necesidades de ligereza, baja densidad o gran superficie expuesta sean necesarias.

Ya en el caso particular del caso diseñado, se requeriría de los ensayos dinámicos y torre de caída, así como alguna simulación de accidente, para demostrar su efectividad real. En el caso de buscar mayor rendimiento y seguir desarrollando la idea, se deberían explorar otras vías como:

- La orientación de la estructura TPMS respecto a las superficies de contacto en caso de choque.

- El uso de gradientes en las estructuras, ya descrito en la literatura y que parece dar resultados prometedores.

- O el investigar la influencia de la dirección de impresión en los posteriores esfuerzos a los que se someta.

Bibliografía

Artículos y estudios científicos

- [1] **Gibson, L. J., & Ashby, M. F. 1982.** *The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.* ® www.jstor.org. Proceedings of the Royal Society A, vol. 382, pp. 25-42. ISSN 13645021. DOI 10.1098/rspa.1927.0039.
- [2] **Afshar, M., Anaraki, A.P., Montazerian, H. y Kadkhodapour, J., 2016.** *Additive manufacturing and mechanical characterization of graded porosity scaffolds designed based on triply periodic minimal surface architectures.* Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials [en línea], vol. 62, pp. 481-494. ISSN 18780180. DOI 10.1016/j.jmbbm.2016.05.027. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.05.027>.
- [3] **Gibson, L.J. y Ashby, M.F., 2014.** *Energy absorption in cellular materials.* S.l.: s.n. ISBN 9781139878326. GIBSON, L.J. y ASHBY, M.F., 2014. Energy absorption in cellular materials. S.l.: s.n. ISBN 9781139878326.
- [4] **Abueidda, D.W. et al., 2017.** *Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures.* Materials and Design [en línea], vol. 122, pp. 255-267. ISSN 18734197. DOI 10.1016/j.matdes.2017.03.018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.018>.
- [5] **Avalle, M., Belingardi, G. y Montanini, R., 2001.** *Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram.* International Journal of Impact Engineering. S.l.:
- [6] **Otte, D. y Wiese, B. 2014.** *Influences on the Risk of Injury of Bicyclists' Heads and Benefits of Bicycle Helmets in Terms of Injury Avoidance and Reduction of Injury Severity.* SAE International Journal of Transportation Safety, vol. 2, no. 2, pp. 257-267. ISSN 23275634. DOI 10.4271/2014-01-0517.
- [7] **Bourdet, N. et al. 2012.** *Head impact conditions in the case of cyclist falls. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology,* vol. 226, no. 3-4, pp. 282-289. ISSN 17543371. DOI 10.1177/1754337112442326.
- [8] **Depreitere, B., et al. 2007.** *Lateral head impacts and protection of the temporal area by bicycle safety helmets.* Journal of Trauma - Injury, Infection and Critical Care, vol. 62, no. 6, pp. 1440-1445. ISSN 00225282. DOI 10.1097/01.ta.0000221472.68873.fb.
- [9] **Monea, A.G. et al. 2014.** *The relation between mechanical impact parameters and most frequent bicycle related head injuries.* Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials [en línea], vol. 33, no. 1, pp. 3-15. ISSN 18780180. DOI 10.1016/j.jmbbm.2013.06.011. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.06.011>.
- [10] **Final report of Working Group 4: Ergonomics of thermal effects A COST Action TU1101 / HOPE collaboration** Citation Information for this Report, [sin fecha]. S.l.: s.n. ISBN 978-90-5986-469-6.
- [x] **Maskery I., Sturm L., Aremu O. A. et al. 2018.** *Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing.* Polymer, vol. 152, pp. 62-71. ISSN 00323861. DOI 10.1016/j.polymer.2017.11.049.

Paginas web consultadas

Pagina web de consulta de normativas [en línea] [consulta: 12de Abril de 2020]. Disponible en: <https://portal-aenormas-aenor-com.cuarzo.unizar.es>

Pagina web de difusión [en línea] [consulta: 12de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.helmetfacts.com/standards/>

Plataforma para la optimización de cascos en europa [en línea] [consulta: 23 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.bicycle-helmets.eu/>

Pagina web de difusión [en línea] [consulta: 18 de Mayo de 2020]. Disponible en: <https://helmets.org/history.htm>

Pagina web comercial de Cyclo[en línea] [consulta: 18 de Mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.cyclotechnology.com/>

Pagina web comercial de Cellutech [en línea] [consulta: 20 de Mayo de 2020]. Disponible en: <http://www.cellutech.se/helmet.html>

Pagina web comercial de Hexr [en línea] [consulta: 18 de Mayo de 2020]. Disponible en: <https://hexr.com/pages/safety/>

Plataforma de crowdfoundig web [en línea] [consulta: 10 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.kickstarter.com/projects/kupol/kupol-reinventing-the-helmet-with-3d-printing/description>

Publicaciones de blogs

DAVIDSON, History Tuesday: The Bicycle Helmet [en línea]. En: *Davidson.com*, 14 de Mayo de 2013. [Consulta: 5 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.davison.com/blog/history-tuesday-the-bicycle-helmet/>

UKAR, Eneko. Fabricación aditiva: Qué es cada tecnología [en línea]. En: *Interaempresas.net*. 8 de Julio de 2015. [Consulta: 15 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/138289-Fabricacion-aditiva-Que-es-cada-tecnologia.html>

ANEXOS

Análisis y resultado de los ensayos

Diseño de un casco ciclista basado en superficies mínimas periódicas triplicadas

Design of a cycling helmet based on triply periodic minimal surfaces

Autor

Javier García Felipe

Escuela de Ingeniería y Arquitectura