



UNIVERSITAT JAUME I

ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS EXPERIMENTALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Análisis mecánico de un nuevo sistema de fijaciones para tablas de snowboard

TRABAJO FINAL DE GRADO

AUTOR: Carlos Valls Fuster

TUTORA: Emma Moliner Cabedo

Castellón, Noviembre 2016

0. Índice

Contenido

0. Índice	5
1. Resumen.....	7
2. Introducción	9
2.1. Antecedentes	9
2.2. Objeto del proyecto	11
3. Generalidades del Snowboard	13
3.1. Historia del snowboard	13
3.2. Material	15
3.2.1. Tabla de snowboard	16
3.2.2. Fijaciones.....	18
3.2.3. Botas.....	20
3.3. Esfuerzos	21
4. Diseño innovador de las fijaciones Snabbsnö	25
5. Generalidades del método de los elementos finitos y el análisis no lineal	29
5.1. Elementos finitos.....	29
5.2. Análisis no lineal.....	31
6. Modelización del problema.....	35
6.1. Definición geométrica	35
6.1.1. Anillo.....	38
6.1.2. Núcleo	40
6.2. Malla de elementos finitos.....	43
6.3. Propiedades de los materiales	49
6.4. Condiciones de contorno	51
6.5. Acciones a considerar.....	53
7. Análisis a realizar	55
7.1. Tipo.....	55
7.2. Casos de carga considerados	57
7.2.1. Primer caso.....	58
7.2.2. Segundo caso.....	60
7.2.3. Tercer caso	61

7.3. Fatiga.....	63
8. Resultados.....	67
8.1. Primer caso.....	67
8.2. Segundo caso.....	71
8.3. Tercer caso.....	77
8.4. Fatiga.....	81
9. Propuesta de mejora del diseño.....	85
10. Conclusiones.....	95
11. Presupuesto.....	97
12. Bibliografía.....	99
12.1 Artículos.....	99
12.2 Libros.....	99
12.3 Páginas web.....	100
13. Planos.....	103
13.1 Plano 1.....	105
13.2 Plano 2.....	106
13.3 Plano 3.....	107

1. Resumen

Este trabajo se centra en el análisis mecánico del sistema de las fijaciones de snowboard *SnabbSnö*. Este producto contiene un mecanismo innovador que permite la desconexión de las fijaciones de la tabla de snowboard de una manera sencilla. El diseño de este producto se ha llevado a cabo de una forma experimental por parte de la empresa fabricante, por este motivo el producto carece de información detallada de sus características técnicas. Es por ello que se desea analizar mecánicamente este novedoso mecanismo, con el objetivo de ver su comportamiento frente al uso durante la práctica de la actividad deportiva del snowboard.

Para realizar el estudio será necesario analizar los esfuerzos a los que está sometido dicho producto durante la realización de esta actividad deportiva. Para ello se llevará a cabo una revisión bibliográfica en bases de datos científicas. A continuación se plantearán los escenarios que mejor representen los esfuerzos ejercidos durante la práctica del snowboard partir de la información obtenida de la revisión bibliográfica. Seguidamente se someterá el mecanismo de desconexión de las fijaciones a simulaciones que nos revelen el comportamiento de dicho producto ante las sollicitaciones anteriormente estimadas. Para solucionar estos análisis se empleará al método de elementos finitos. Al tratarse el mecanismo de desconexión de un ensamblaje formado por varios componentes, se optará por realizar análisis de tipo no lineal con el fin de poder estudiar cómo interaccionan los elementos entre sí en las zonas de contacto. Finalmente se analizarán los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el objetivo de estudiar su comportamiento y la posible mejora del producto original.

2. Introducción

2.1. Antecedentes

Como en todos los ámbitos, el sector del deporte sigue evolucionando y optimizando sus productos gracias al uso y experiencia de los usuarios y expertos practicantes de estos deportes. Del mismo modo ha sucedido en los deportes de nieve. En concreto, el esquí ha sufrido grandes evoluciones desde los primeros modelos que se pusieron a disposición de los practicantes de esta actividad. Tal vez por tratarse de una modalidad más joven, el snowboard no ha sufrido grandes evoluciones en el diseño de sus componentes desde que se consolidó, como estándar, el diseño de los productos que hoy en día se siguen empleando.

Sin embargo, en los últimos años los usuarios de este deporte han encontrado un inconveniente en el diseño actual de las fijaciones que sujetan las botas a la tabla de snowboard. Hay situaciones en las que la desconexión de la bota se realiza con más frecuencia y, en estos escenarios, el diseño actual de las fijaciones ocasiona que esta tarea sea excesivamente laboriosa. Puede ser el caso de monitores de este deporte, trabajadores de las estaciones de esquí o simplemente usuarios que han llegado a la conclusión de que en los escenarios en que la desconexión de la bota se realiza con más frecuencia, contar con un sistema de desanclaje más dinámico supondría un gran avance en cuanto a comodidad. La industria de este sector ha observado este problema y, por este motivo, diversas marcas comerciales están poniendo a disposición de los usuarios nuevas gamas de fijaciones que incorporan sus soluciones tecnológicas a este problema que se les ha planteado.

En este escenario se encuentra la marca nacional *SnabbSnö*. Esta empresa, gracias a la idea de un usuario experimentado de snowboard, ha desarrollado una solución que desea poner en manos de los practicantes de este deporte. Estas fijaciones de snowboard se distinguen de las fijaciones convencionales por la inclusión de un sistema que permite liberar las fijaciones de la tabla de snowboard con un sencillo movimiento. De este modo se consigue realizar de una manera más dinámica el gesto de desconexión necesario, por ejemplo, para acceder y evacuar de los remontes o facilitar el desplazamiento en zonas sin pendiente.

Este sistema consiste en un núcleo fijado a la tabla de snowboard y un anillo sujeto a la fijación que se anclará al núcleo anteriormente citado. Este núcleo se instalará donde anteriormente iba anclada la fijación, empleando el mismo sistema de sujeción que las fijaciones convencionales con el objetivo de hacerlo compatible con todas las tablas del mercado. El diseño de la fijación y sistema de sujeción de la bota seguirá manteniendo el diseño convencional.

El proceso de desarrollo de este producto se ha llevado a cabo experimentando con los prototipos de los diseños, llevándolos a las pistas de esquí para comprobar su funcionalidad hasta obtener un diseño que cumpla con el fin deseado. Por lo tanto no se han realizado cálculos mecánicos previos en su prediseño para cuantificar cómo este producto soporta los esfuerzos desempeñados durante la práctica del snowboard.

2.2. Objeto del proyecto

El objetivo de este trabajo de final de grado consiste en el análisis mecánico de las fijaciones de snowboard con mecanismo de desensamblaje rápido *SnabbSnö*.

Para la realización de este análisis mecánico se buscará la forma de cuantificar los esfuerzos a los que la fijación está sometida durante la práctica del snowboard, con el objetivo de trasladar estos esfuerzos a las solicitaciones en las piezas que componen el sistema de desconexión que se quiere estudiar. Como los esfuerzos a los que está sometido el producto durante la práctica del snowboard son de magnitudes muy variables, dependiendo de la habilidad, técnica y estilo del usuario, se buscarán varios casos que representen las condiciones más desfavorables, sobreentendiendo que, si la fijación responde bien a estos casos, no tendrá problema en soportar condiciones menos exigentes. El escenario en que nos centramos principalmente para la representación de condiciones más desfavorables es en el efecto que representa la recepción (aterrizaje) de un salto. Una vez seleccionado el escenario que represente mejor las condiciones deseadas se procederá a realizar el análisis con el que será posible conocer cómo este producto reacciona a su uso durante la práctica de esta actividad.

Puesto que se trata de un mecanismo en el que se ensamblan dos piezas, el estudio se resuelve empleando un análisis no lineal de contacto mediante el programa de diseño asistido por computadora para modelado 3D *SolidWorks*. Este tipo de análisis representa de una forma más fiel la transmisión de cargas desde una pieza a otra. Para realizar este análisis mediante software especializado será necesario realizar un modelado 3D de la geometría del ensamblaje. Finalmente se analizarán los resultados y se propondrán mejoras de las propiedades del material del cual está formado.

3. Generalidades del Snowboard

3.1. Historia del snowboard

Los inicios del snowboard se remontan a principios del siglo XX con el deseo de descender surfeando las colinas nevadas del sistema de cordilleras de Las Montañas Rocosas. Con la intención de simular el surf pero trasladado a los paisajes invernales se buscó un diseño similar a las tablas de dicho deporte acuático. En éste, el deportista se sostiene encima de un único elemento que desliza sobre la superficie deseada, frente al existente diseño del esquí donde las piernas del deportista están sujetas individualmente cada una a un esquí.

Con esta intención el surfista Sherman Poppen construyó la que sería la primera tabla de surf para la nieve en 1964. Este primer prototipo lo llevó a cabo en el garaje de su casa en Muskegon, Michigan, mediante la unión de dos esquís infantiles constituyendo una única placa ancha, de un metro y veinte centímetros de largo y una rienda de caballos atada al frente de la tabla con la que sujetarse y maniobrar, al igual que la cuerda empleada en los trineos con este mismo fin. En este momento se estaba inventando un deporte de nieve completamente innovador, aunque en sus inicios fuera tratado como un simple pasatiempo para los niños. Un año después este prototipo fue rectificado y puesto en producción con el nombre de “snurfer”, que es la contracción de snow (nieve) y surfer. De este modo el “snurfer” fue comercializado en las jugueterías donde fue recibido con gran popularidad durante los siguientes diez años. El diseño que se llevó a la producción estaba fabricado de una sola pieza de madera laminada similar a la empleada en las superficies de las boleras, lo cual le ofrecía la resistencia y flexibilidad deseadas (ilustración 1).



Ilustración 1

Pero no fue hasta 1977 cuando Jake Burton, usuario de “snurfer” durante varios años, revolucionó este objeto-juguete convirtiéndolo en el predecesor del actualmente conocido snowboard. De esta forma comenzó a optimizar el diseño del “snurfer” desechando la cuerda

empleada para sustentarse encima de la tabla y proporcionándole fijaciones para botas de esquí a la tabla, con el objetivo de crear una conexión entre ésta y el usuario y por lo tanto de servir para maniobrar la tabla. Fue al presentar esta nueva iteración del “snurfer” durante una competición de “snurfing” cuando todos los asistentes quedaron impresionados y se dio a conocer el que sería el diseño en que se basarían las tablas de snowboard hasta las actualmente conocidas.

Al mismo tiempo que Jake Burton evolucionaba el diseño del “snurfer”, el patinador Tom Sims frustrado por tener que dejar de usar su monopatín durante los meses invernales, decidió fabricar una tabla que pudiera funcionar en la nieve. Sus primeros prototipos simplemente estaban formados por una tabla de madera tapizada en la parte superior y a la cual le había fijado una chapa de aluminio en su parte inferior. Tras comprobar que este prototipo funcionaba se dedicó a optimizarlo con el objetivo de llevarlo a la producción. Posteriormente fundaría la empresa de snowboards que llevaría su apellido como marca comercial y comenzaría la comercialización de sus productos.

También en la misma época Dimitrije Milovich se deslizaba por las colinas nevadas en la costa este de Estados Unidos haciendo uso de bandejas cafetería. Fue al leer en una revista de surf sobre la nueva tendencia de surfear la nieve, cuando Milovich se decidió a probar esta actividad con una tabla y quedó impresionado. Tras un par de años probando prototipos, en 1974 obtuvo dos patentes de tablas Snow Surfboard. Comenzó a comercializar estos productos y en 1976 creó la compañía *Winterstick Company*.

Cabe decir que actualmente está surgiendo una nueva tendencia que hace un guiño al inicio del snowboard. Se están diseñando tablas de snowboard denominadas splitboard que buscan la polivalencia de combinar este producto con los esquís (ilustración 2). Pues este nuevo producto será el resultado de dividir la tabla de snowboard en dos longitudinalmente obteniendo así dos esquís. De este modo y mediante un sistema de sujeción se puede emplear este producto como tabla de snowboard cuando los dos elementos están conectados y si se desea se pueden separar obteniendo así dos esquís.



Ilustración 2

3.2. Material

La práctica del snowboard se lleva a cabo mediante el uso de una tabla, la cual es el medio de transporte que está en contacto con la superficie, principalmente nevada, que se desea recorrer. Las fijaciones de snowboard están diseñadas para poder transmitir los movimientos que permiten maniobrar la tabla sobre la superficie, creando por lo tanto un nexo de conexión entre este dispositivo y el usuario. De este modo es posible realizar una conexión estable y flexible entre la tabla y las botas, de forma que cualquier movimiento realizado por el usuario sea transmitido a la tabla y permita a la vez cierta libertad que proporcione una experiencia confortable. Estas fijaciones se anclan a unas botas especializadas para este fin con la misma virtud que las fijaciones, proporcionar el nivel de rigidez necesario para transmitir los gestos del usuario, pero a la vez el nivel de flexibilidad necesario para poder permitir libertad a la hora de efectuar estos gestos de un modo confortable. Estos tres componentes, tabla, fijaciones y botas, son los necesarios para poder desarrollar esta actividad deportiva (ilustración 3) y como a continuación se explicará las características de estos tres elementos permitirán componer un equipo con las prestaciones deseadas por el usuario.



Ilustración 3

3.2.1. Tabla de snowboard

Generalmente las tablas están fabricadas siguiendo un proceso en que la estructura final tiene el aspecto de un sándwich [1]. Este proceso consiste en compactar una serie de materiales dispuestos en capas con la intención de obtener un producto final con las características del conjunto de materiales empleados (ilustración 4). El núcleo de las tablas de snowboard está fabricado de madera. Según las características deseadas se emplea la madera de la naturaleza adecuada. Este núcleo de madera se lamina con una capa por encima y otra capa por debajo de fibra de vidrio empleando resina epoxi como elemento adhesivo. De esta manera se consigue una tabla flexible y con buena absorción de impactos gracias a la madera y a la vez resistente tanto al uso como a las condiciones ambientales gracias al uso de la fibra de vidrio, que le ofrece la dureza necesaria y consigue que la tabla no pierda la forma deseada. A esta base se le aplica también una capa superior a la que se le añaden diseños con finalidad estética y donde están los orificios para ensamblar las fijaciones. También se añade una capa inferior que es la que está en contacto con la nieve. Esta capa inferior tiene también una finalidad estética, pues también incluye diseños gráficos, pero su objetivo principal es mantener una capa de cera sujeta a la base de la tabla. Esta capa inferior está tratada con un plástico denominado P-tex que tiene una porosidad específica lo cual permite que la cera sea absorbida por esta capa con el objetivo de que siempre haya cera adherida a la base de la tabla para que el snowboard deslice mejor.

Una vez todas las capas están dispuestas se adjunta el borde, que está fabricado en acero inoxidable. El borde es afilado con el fin de que penetre en la nieve de modo que genere puntos de apoyo que sirvan para sustentar firmemente la tabla en esta superficie. De esta manera se obtiene el control de la tabla en la nieve sobretodo necesario en el caso de los giros.

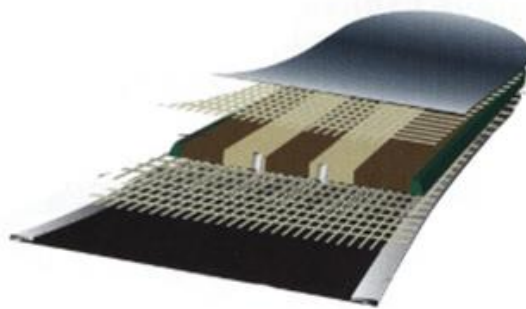


Ilustración 4

A continuación se procede a sellar y dar forma a este conjunto de capas mediante una prensa. A su vez esta prensa extrae todas las burbujas de aire que hayan podido quedar en el interior como también el exceso de resina epoxi. Este proceso curva la punta frontal de la tabla, denominada “nose” hacia arriba, con el objetivo de que facilite superar obstáculos que pueda haber en el camino. La mayoría de tablas de uso general suelen ser simétricas, “twintail”, lo

cual indica que la punta trasera de la tabla, “tail”, también será curvada al igual que la delantera. Esto permite al usuario desplazarse con la tabla también en la dirección invertida, “switch”.

La dimensión de la tabla de snowboard influye en el comportamiento de ésta, pues al igual que en otros deportes de tabla como el surf y el longboard, una tabla larga y grande es más estable y fácil de usar a mayor velocidad. Esto es resultado de la existencia de mayor área de la tabla en contacto con la superficie. Por otro lado una tabla corta y pequeña favorece los cambios de dirección, resultando una tabla más reactiva y maniobrable. Por el contrario una tabla corta es más inestable a gran velocidad. Por norma general la longitud de la tabla debe de ir acorde con el peso del usuario y su altura. Con una tabla de longitud ideal se obtiene el compromiso óptimo entre estabilidad y maniobrabilidad (ilustración 5).

TALLA (PULGADAS)	TALLA(cm)	PESO (Kg)	ALTURA (cm)
58"	147	45+	-150
60"	152	55+	150-160
61"	155	65+	160-170
63"	160	75+	170-180
64"	162	85+	180+



Ilustración 5

También la flexión de la tabla, denominada “flex”, es un factor que describe el carácter de ésta. Una tabla muy flexible es más fácil de maniobrar a bajas velocidades y es más permisiva, ideal para principiantes, pero a altas velocidades se convierte en inestable. Una tabla más rígida proporciona mejor sujeción en los bordes durante los giros y es más estable a altas velocidades. El “flex” final de la tabla está en función del peso del usuario, pues un deportista liviano ejerce menor presión sobre la tabla durante la práctica de la actividad que un usuario más pesado, lo que resulta en una menor flexión de la tabla en el caso del deportista liviano frente a una mayor flexión de la misma tabla en el caso del deportista más pesado. Es por eso que los fabricantes indican los rangos de pesos adecuados a los diferentes tarados de “flex” de las tablas con el fin de aprovechar al máximo las prestaciones de la tabla.

3.2.2. Fijaciones

Para maniobrar la tabla de snowboard en necesario crear un enlace entre ésta y el usuario lo suficientemente sólido para transmitir sus gestos a la tabla. De esta tarea se encargan las fijaciones, lo cual supone una labor de gran importancia, mantener una conexión segura y ajustada de las botas con la tabla.

Las fijaciones están ancladas a la tabla de snowboard mediante pernos siguiendo los patrones comerciales de dos, tres o cuatro tornillos situados en el centro de la base fijación. Por otro lado las botas se mantienen sujetas en la fijación por dos correas denominadas “straps”. La de mayor tamaño sujeta la bota sobre la zona del tobillo presionándolo hacia el soporte del talón denominado “heelcup” y, al mismo tiempo, la parte inferior de los gemelos hacia el “highback”. La otra correa actúa sobre la puntera de la bota (ilustración 6).



Ilustración 6

Esta última correa se puede emplear de dos modos: (i) con la correa situada encima de la puntera presionándola hacia abajo, con el fin de ejercer más presión de forma perpendicular al plano de la tabla; (ii) colocando la correa delante de la puntera, la retiene y la presiona hacia atrás asegurando así que la bota tiene la mayor superficie en contacto con la fijación. Estas correas suelen ser acolchadas con el fin de distribuir mejor la presión sobre mayor superficie.

Principalmente las fijaciones se fabrican en dos materiales: aluminio y plástico. Originalmente estas piezas están fabricadas en metal tratado para soportar la corrosión provocada por tanto la nieve natural como los aditivos usados en conjunto con la nieve artificial. Normalmente se emplea aluminio para este propósito. Este material a la vez que es resistente hace que las piezas resulten menos voluminosas. Actualmente se están realizando las fijaciones en materiales plásticos. Estos permiten la fabricación de secciones en una pieza con formas más complejas. A su vez el resultado suele ser más ligero y frente a la corrosión presenta mejores resultados. Los costes de fabricación pueden ser más económicos si se emplean materiales plásticos para la producción. Ciertas marcas combinan el uso de piezas fabricadas en plástico con otras fabricadas en aluminio con el fin de obtener un resultado óptimo.

La flexión de las fijaciones es una de sus características más importantes, pues influye en la transmisión de los gestos del usuario sobre la tabla de snowboard y a la inversa, en la percepción de estímulos en el usuario. Una fijación muy rígida transmite de forma fiel lo que el deportista demanda, tal vez siendo esto un inconveniente para usuarios poco experimentados que no ejercen sus movimientos de una forma tan precisa. Para estos últimos hay fijaciones más flexibles que resultan más permisivas y cómodas. Esta variedad en la cantidad de flexión de la fijación permite seleccionar el material que realmente el deportista requiere dependiendo de sus necesidades.

3.2.3. Botas

Finalmente las botas de snowboard, al igual que las botas de esquí, su principal función es transferir los gestos y energía que el usuario ejerce, a través de las fijaciones, a la tabla de snowboard. Obviamente al tratarse de una actividad de riesgo, otra función primaria es la de proteger los pies de movimientos bruscos o golpes manteniendo el pies bien sujetos. No se puede obviar que estos deportes se practican en ambientes invernales y en contacto con superficies nevadas y por lo tanto frías, de modo que es de gran importancia mantener el pie a una temperatura agradable con el fin de asegurar una experiencia confortable. Es por esto que una de las características principales que se buscan en unas botas es la comodidad. En este ámbito también influye el sistema de ajuste de éstas, empleando los diseños más conservadores de botas lazos mediante cordones y los diseños más innovadores soluciones tecnológicas más avanzadas. Finalmente otra característica, al igual que en las tablas y en las fijaciones es el “flex” de las botas, donde cada usuario selecciona qué compromiso quiere hacer entre rigidez y comodidad. Todos estos aspectos y el hecho de que el diseño sea similar a grandes rasgos al de una bota de calzado tradicional propician que estas botas sean mucho más confortables y polivalentes que las empleadas en el esquí, ya que con ellas es más fácil caminar por propio pie por la nieve o estación de esquí (ilustración 7).



Ilustración 7

3.3. Esfuerzos

Como en todos los deportes, cada usuario lo practica con una intensidad diferente, es por eso que es difícil cuantificar las fuerzas que ejercen los deportistas durante la práctica del snowboard y, por lo tanto, la magnitud de los esfuerzos a los que va a estar sometido el material necesario para realizar esta actividad, más concretamente el componente que es objeto de nuestro análisis, las fijaciones. Será diferente el uso que le da un deportista que desciende de forma relajada las pistas de la estación de esquí zigzagueando, del uso que le da un usuario en el “snowpark*” donde se practican saltos de gran altura. A su vez, también el uso que le da un deportista que recorre la montaña fuera de pista será diferente, pues la superficie es más abrupta y se realizan saltos donde la recepción no está bien acondicionada.

Cuantificar las acciones que aplican los usuarios durante la práctica del snowboard es necesario para poder aplicar estas solicitaciones a la fijación que posteriormente se analizará mecánicamente mediante la ayuda de la herramienta informática *SolidWorks*. Con el objetivo de estimar estos esfuerzos ejercidos durante la práctica del snowboard se ha realizado una revisión bibliográfica. Otro método para recopilar esta información hubiera sido mediante el uso de sensores que revelaran las fuerzas que aplica un usuario durante la práctica de snowboard, pero este método empírico se escapa de las posibilidades de este trabajo de final de grado.

La fuente de información más próxima a nuestro campo de investigación que puede proporcionar datos acerca de los esfuerzos que se generan durante la práctica del snowboard y, por tanto, los esfuerzos a los que están sometidas las fijaciones, es la información que pueden facilitar las empresas del sector comercial que fabrican fijaciones. En este sector podemos dividir las fuentes entre (i) las empresas que se dedican a producir fijaciones con el diseño de anclaje convencional y (ii) empresas que implementen soluciones técnicas para ofrecer un diseño que incorpore mecanismos para hacer más dinámica la acción de desconexión de las botas o fijaciones. Estas empresas podrían tener información que les permita realizar fijaciones de snowboard con diseños eficientes, que resistan a este uso agresivo a la vez que sean ligeras y cómodas, pero no han estado interesadas en facilitar la información demandada.

*El snowpark es un área habilitada para la realización de saltos y trucos que los esquiadores y los usuarios de snowboard pueden encontrar en la mayoría de las estaciones de esquí. Esta zona toma como referencia el skatepark, área habilitada con el mismo fin ubicada próxima a los núcleos urbanos donde los usuarios de skateboard pueden realizar saltos y trucos.

En los snowparks se suelen encontrar elementos sobre los cuales se puede deslizar el esquiador o el usuario de snowboard, como barandillas o cajones con diferentes geometrías. También montículos de nieve y módulos preparados donde se pueden realizar saltos como el “half-pipe”. La geometría de esta zona recuerda a un tubo el cual ha sido seccionado longitudinalmente por el centro, como indica su nombre. Para formar esta estructura, se puede excavar la zona central hasta obtener una sección plana entre las dos rampas o bien se puede acumular nieve a ambos lados de una superficie plana con la intención de crear las dos rampas cóncavas, situadas una frente a la otra. Este módulo puede estar formado también por solo uno de las dos secciones, llamándose “quarter-pipe”.

Dentro del ámbito de esta actividad deportiva las empresas productoras de tablas de snowboard también podrían tener información acerca de las acciones que estas tablas tienen que soportar durante la práctica del snowboard. Estas solicitaciones podrían servir de guía para estimar las fuerzas necesarias para simular el uso de las fijaciones. Del mismo modo que ha sucedido con las empresas productoras de fijaciones, no se ha podido obtener esta información.

Por este motivo la fuente de información que se emplea para delimitar los esfuerzos ejercidos durante la práctica de snowboard será la información obtenida a través de estudios relacionados con este deporte, publicados en bases de datos científicas accesibles informáticamente. Para ello se ha realizado una búsqueda intensiva en varias de ellas. En concreto, en *Teseo*, la base de datos del Ministerio de Educación de las Tesis Doctorales realizadas en universidades españolas, *Dialnet*, base de datos de contenidos científicos en lenguas iberoamericanas, *Scopus*, base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas, *Web of Science*, servicio en línea de información científica y *PubMed*, base de datos de citas y resúmenes de artículos de investigación biomecánica.

En estas bases de datos se han encontrado artículos sobre estudios biomecánicos en los que se analizan lesiones en las extremidades inferiores ocurridas durante la práctica del snowboard y se comparan con lesiones en las mismas extremidades provocadas por el esquí [2, 3]. La información que se ha encontrado en estos artículos está relacionada con el diseño de prótesis para las extremidades inferiores con el fin de ser usadas para la práctica del snowboard. Sin embargo, en los estudios citados los autores no aportan información sobre los valores de los esfuerzos.

Con el fin de complementar esta información se ha investigado en campos que están relacionados con el sistema de desconexión de una manera tangencial. De este modo se ha recurrido al skateboard, pues esta actividad comparte el elemento principal, que es una tabla, y a la vez también diferentes escenarios en que la cinética de los movimientos realizados es similar a la de los movimientos realizados en el snowboard, como es el caso de los impactos debido a la recepción de saltos [4, 5]. En los artículos citados tampoco se muestra información relacionada con los valores de los esfuerzos.

También se ha investigado acerca de los pedales automáticos utilizados en el ciclismo. Estos pedales están dotados de un sistema de calas que les permite desanclarse ejerciendo un movimiento de rotación similar al empleado por el sistema de desconexión de las fijaciones *SnabbSnö*. Del mismo modo que en los casos anteriores, no se ha encontrado información acerca de los valores de los esfuerzos.

Como resultado de esta revisión bibliográfica en bases de datos científicas se concluye que durante la práctica del snowboard los esfuerzos de mayor magnitud vienen dados por la recepción de saltos. Esta conclusión se ha obtenido estudiando un artículo donde se analiza cómo, según la segunda ley de Newton, el impacto vertical producido por el aterrizaje de un salto produce una fuerza normal ejercida por la superficie del aterrizaje [6]. Esta fuerza normal resultante está determinada por las condiciones de cuatro factores: la altura del desnivel que se salta, la pendiente del área de aterrizaje del salto, la flexión de las piernas y por último la dureza de la nieve. Para comprobar este planteamiento, el autor del artículo estudia el efecto

que tiene la modificación de los parámetros de la altura del salto y el desnivel del área de aterrizaje, manteniendo constante el valor de la flexión de las piernas así como de la dureza de la nieve, de este modo la absorción de energía que suponen estos dos últimos factores se mantiene constante.

El resultado de los cálculos muestra que, efectivamente, la variación de estos parámetros influye en el resultado de la fuerza normal. Al mismo tiempo se comprueba como la variación de estos resultados sigue una relación en que la magnitud de la fuerza normal resultante es directamente proporcional a la altura del salto e inversamente proporcional al desnivel del área de aterrizaje.

Como conclusión se observa que la combinación de una altura de salto máxima y un desnivel del área de aterrizaje mínimo, una superficie horizontal, producen el caso más desfavorable ya que la fuerza normal resultante es la de mayor magnitud.

Por este motivo se ha seleccionado para representar los esfuerzos más desfavorables durante la práctica de snowboard, en este trabajo de final de grado, la fuerza resultante del aterrizaje de un salto sobre una superficie plana. El resultado de un salto desde una altura de 2m con los factores anteriormente citados es una fuerza normal de tres veces el peso del conjunto. El esquema de este escenario se ve representado en la siguiente ilustración (ilustración 8).

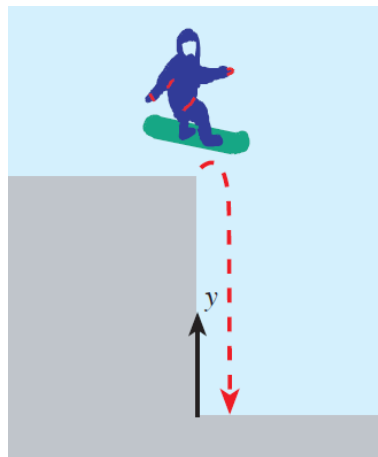


Ilustración 8 [1]

4. Diseño innovador de las fijaciones Snabbsnö

Como anteriormente se ha explicado, con el objeto de transmitir los movimientos que ejerce el usuario de la tabla de snowboard para hacerla maniobrar de la forma deseada, es necesario crear un vínculo entre la tabla de snowboard y el deportista. De esta tarea se encargan las fijaciones. También es cierto que estas fijaciones no pueden crear una sujeción de carácter permanente y han de permitir al usuario la liberación de las botas respecto de la tabla para permitir ciertas acciones.

En el caso del esquí, para permitir desplazarse en superficies donde la pendiente de la colina no ejerce efecto favorable (gravedad) se emplean los bastones. También son necesarios éstos a la hora de utilizar los remontes. El usuario de snowboard no dispone de estos bastones, es por ello que ha de permitirse soltar un pie para poder impulsarse, sirviéndose de la misma técnica que un patinador emplea con un monopatín para desplazarse por zonas sin pendiente.

Por un lado, las fijaciones se sujetan mediante pernos a la tabla de snowboard para formar una unión desmontable. Este método de unión es la empleada habitualmente en todas las fijaciones, pues éstas son componentes que se pueden reemplazar por desgaste o rotura y por tanto han de ser removibles. Al mismo tiempo las fijaciones son elementos que no se va a desmontar frecuentemente, es por eso que el método más empleado son los pernos. Este método permite realizar un anclaje potente y desmontable.

En la configuración más empleada por las marcas comerciales, la tabla de snowboard esta provista de cuatro agujeros roscados siguiendo un patrón estándar cuadriforme. Hay tablas que incluyen más orificios con el fin de ofrecer mayor personalización a la hora de seleccionar la posición de las fijaciones en la tabla, siempre respetando el patrón anteriormente citado.

El núcleo del mecanismo de desconexión incorpora cuatro guías con forma de arco concéntrico al núcleo separadas 90° entre ellas. Estas guías están diseñadas con el mismo propósito, ofrecer el mayor grado de ajuste de la posición a la hora de montar las fijaciones. Una vez seleccionada la posición en que se desea anclar, se procede a atornillar los cuatro pernos con la tensión requerida. Esto asegura un correcto y duradero anclaje de la fijación a la tabla.

Por otro lado, las botas se sujetan a la fijación mediante el uso de correas, esto permite una fijación ajustable. Se emplean dos correas de sujeción, una que asegura la puntera de la bota y otra que sostiene el tobillo. La desventaja de este diseño es que cada vez que se desea liberar un pie de la fijación se han de soltar las dos correas y una vez que se desea volver a sujetar la bota en la fijación se han de colocar, ajustar y tensar las dos correas de nuevo.

Este proceso es el que desea solventar el sistema innovador *Snabbsnö* (ilustración 9). Este producto mantiene la estructura clásica de la fijación, con dos correas ajustables para crear la unión entre la bota y la fijación, pero a su vez el nexo entre la tabla de snowboard y la fijación se convierte en una conexión de liberación rápida frente a la unión permanente mediante pernos del diseño original. De esta forma el usuario siempre tiene la fijación conectada a la bota con la disposición y tensión de las correas deseada y le permite a la vez conectar y desconectar el conjunto bota-fijación de la tabla de snowboard con un simple gesto, haciendo esta tarea más dinámica y cómoda.



Ilustración 9

El sistema de conexión de liberación rápida *Snabbsnö* está compuesto por un núcleo que se atornilla de forma permanente a la tabla en el lugar que lo haría una fijación tradicional y un anillo que se ancla a la fijación mediante tornillos de forma permanente (ilustración 10). El anillo situado en la fijación se ensambla de una forma concéntrica con el núcleo colocado en la tabla formando una unión desmontable. Este mecanismo tiene una funcionalidad similar a los pedales automáticos de una bicicleta y el método de ensamble, una rosca de tres filos, puede recordar al que encontramos en el tapón de un envase de bebidas, añadiendo un sistema para asegurar que la desconexión sólo se realiza cuando lo desea el operario y no es posible una desconexión involuntaria.



Ilustración 10

Para llevar a cabo el ensamblaje el usuario debe de disponer la fijación sobre la tabla de snowboard encima del núcleo en la posición deseada. A continuación rotar la fijación sobre el eje del anillo, que a su vez es virtualmente el mismo que el del núcleo si se han situado correctamente de forma concéntrica, hasta encontrar el punto de entrada del filo. En este punto la fijación estará situada en el mismo plano que el núcleo y se podrá rotar en la dirección inversa hasta la posición original. El arco de giro es aproximadamente de 20 grados y una vez la fijación está en la posición final el sistema de seguridad se activa automáticamente, corroborando que se ha ensamblado correctamente.

Para liberar la fijación se procede a realizar el proceso anterior pero en orden inverso. Con la excepción de que primero es necesario operar el gatillo del sistema de seguridad para poder rotar la fijación respecto del núcleo. Si no se acciona el mecanismo de seguridad se puede comprobar que es imposible realizar ningún movimiento. Una vez presionado el gatillo del sistema de seguridad se puede rotar la fijación en el sentido inverso que el ejercido al ensamblar el mecanismo. Al finalizar esta rotación, que aproximadamente demora 20 grados es posible extraer la fijación de la tabla de snowboard completando así la tarea de liberación del conjunto.

5. Generalidades del método de los elementos finitos y el análisis no lineal

5.1. Elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) es la técnica de discretización dominante en la resolución de problemas mecánicos. Este método sirve, a grandes rasgos, para aproximar las soluciones a ecuaciones diferenciales parciales de forma que se obtenga unos resultados lo más próximos a la realidad, de modo que no sea necesario llevar a cabo la materialización del modelo que se desea estudiar y someterlo a las condiciones reales en que se desea conocer su comportamiento.

Este método se puede interpretar tanto desde un punto de vista físico como matemático, pues el concepto básico del MEF es la subdivisión del modelo que se desea estudiar en componentes discretos de geometría simple denominados elementos finitos. Estos elementos finitos están interconectados mediante una serie de puntos llamados nodos y el conjunto de elementos finitos y nodos encargados de representar la geometría del modelo que se desea analizar se denomina malla (ilustración 11). Los cálculos se realizan sobre esta malla, por lo tanto su generación se realiza en un paso previo a los cálculos.

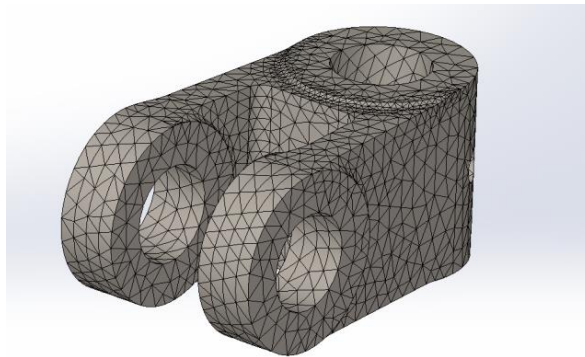


Ilustración 11

La relación de conectividad entre los diferentes nodos y elementos finitos que forman la malla define el valor de un conjunto de variables incógnitas denominadas grados de libertad. El modelo continuo que se desea analizar presenta infinitos grados de libertad, mientras que el modelo discretizado según el MEF, mediante geometrías simples, presenta un número de grados de libertad finito. No obstante las ecuaciones que rigen el comportamiento del modelo continuo también rigen el comportamiento del modelo discretizado. De este modo se consigue pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad regido por una o un conjunto de ecuaciones diferenciales a un sistema regido por una o un conjunto de ecuaciones con un grado de libertad finito.

El conjunto de ecuaciones que rigen el comportamiento del modelo discretizado con un grado de libertad finito forman un sistema de ecuaciones que es proporcional al número de elementos necesarios para discretizar el modelo continuo que se desea analizar. Este sistema de ecuaciones expresado en una matriz se llama matriz de rigidez del sistema.

De este modo el MEF convierte en un problema matricial el que inicialmente sería un problema de ecuaciones diferenciales sobre un medio continuo. Esto se lleva a cabo por medio de la subdivisión del modelo en un número elevado de elementos finitos, resolviendo de forma correcta el análisis para este número finito de puntos e interpolando posteriormente la solución al modelo continuo. De este modo se obtiene una solución numérica aproximada.

5.2. Análisis no lineal

El comportamiento del modelo discretizado mediante el MEF está descrito según la siguiente ecuación matricial (ecuación 1). La matriz de rigidez $[K]$ depende de la geometría, las propiedades del material y las restricciones. En el caso en que se indique que la rigidez del modelo no varía, según la suposición del análisis lineal, la resolución de esta ecuación matricial solo se realiza una vez, sin necesidad de actualizar la matriz de rigidez $[K]$ mientras el modelo se está deformando.

$$[F] = [K]x[d] \quad (\text{ecuación 1})$$

$[F]$ es el vector conocido de cargas nodales

$[K]$ es la matriz de rigidez conocida

$[d]$ es el vector desconocido de desplazamientos nodales

Sin embargo, los problemas mecánicos que se desean resolver mediante el método de elementos finitos (MEF) pueden presentar características que varíen con el tiempo. Este es el caso de los análisis que se desean realizar en este trabajo de final de grado, en que los elementos que se van a estudiar pueden interaccionar entre ellos en las zonas donde contactan. Para resolver estos problemas es necesario, por lo tanto, recurrir a un análisis de elementos finitos no lineal.

Este planteamiento requiere que se abandone la idea de rigidez constante. En su lugar, la rigidez cambia durante el proceso de deformación y la matriz de rigidez $[K]$ debe actualizarse durante del análisis no lineal, siguiendo un proceso de resolución iterativa. Estas iteraciones aumentan el tiempo computacional necesario para obtener resultados precisos.

Las no linealidades pueden estar relacionadas con las cargas que se aplican al modelo, las características del material del cual están fabricadas las piezas de éste, la geometría del modelo y como anteriormente se ha mencionado, los contactos entre diferentes piezas.

La primera no linealidad tiene lugar cuando existen cargas dinámicas en el problema, es decir, la forma de su aplicación es dependiente del tiempo. Un tipo de carga no lineal es la carga de impacto, que se aplica y suprime de modo repentino (ilustración 12). Otro tipo de carga no lineal actúa por periodos más prolongados de tiempo pero varía su intensidad, este tipo de carga se denomina carga fluctuante (ilustración 13).

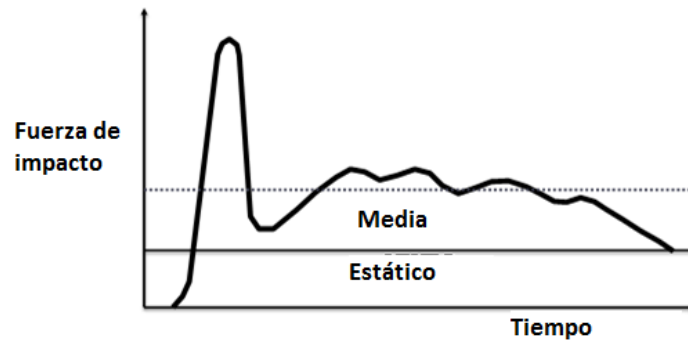


Ilustración 12

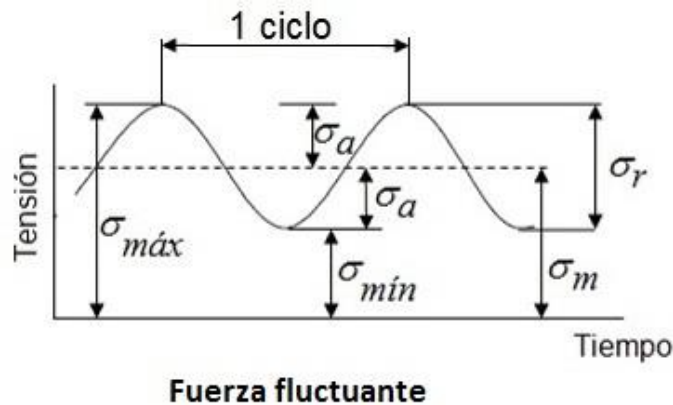


Ilustración 13

El segundo tipo de análisis no lineal se da cuando las ecuaciones constitutivas del material no son lineales. Las ecuaciones constitutivas son una relación entre las variables termodinámicas o mecánicas de un sistema físico como la presión, el volumen, la tensión, la deformación, la temperatura, la densidad, la entropía, etc. Las ecuaciones constitutivas son características de cada material o sustancia específica, pues dicha relación sólo depende de la organización molecular interna.

En un modelo de material lineal la deformación unitaria es proporcional a la tensión aplicada sobre éste. De este modo se puede esperar que cuanto más elevada sea la carga aplicada, más altas sean las tensiones y por lo tanto la deformación del modelo (ilustración 14). También se presupone que las deformaciones producidas por las tensiones no serán de carácter permanente y que, una vez que la carga se haya eliminado, el modelo retornará a su geometría inicial.

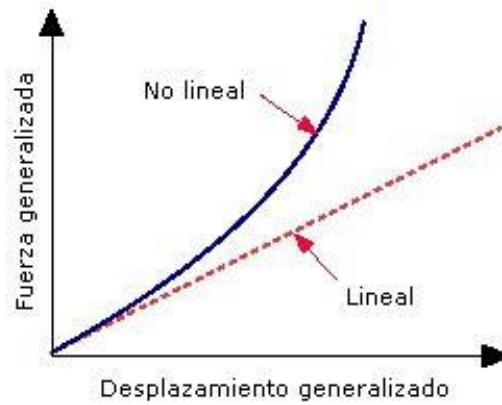


Ilustración 14

Esta simplificación es aceptable en análisis donde se busca aproximaciones al comportamiento real del modelo, pues la respuesta natural de los materiales es no lineal. Esto significa que en el caso de que las cargas sean suficientemente elevadas provocarán deformaciones permanentes en el modelo, como es el caso en la mayoría de los materiales plásticos. Del mismo modo se debe utilizar un modelo de material no lineal si las deformaciones unitarias son muy elevadas (a veces > 50%), como sucede con cauchos y elastómeros.

El tercer tipo de no linealidad se produce cuando la variación en la geometría del problema producida, por ejemplo por las cargas aplicadas, afectan de manera significativa a la relación tensión–deformación, independientemente de que las ecuaciones constitutivas del material sean elástico–lineales.

Finalmente, la cuarta no linealidad está relacionada con las tensiones de contacto que se desarrollan entre dos superficies en contacto. Cuando ocurre un contacto entre dos superficies la zona de contacto y la rigidez de la zona de contacto se desconocen antes de la solución. Independientemente del tamaño de la zona de tensión de contacto en relación con el tamaño del modelo global, el cambio en la rigidez de la zona de contacto requiere un análisis de tipo no lineal.

Dentro de la no linealidad de contacto se puede distinguir la condición de impenetrabilidad, llamada contacto geométrico, y la condición de fricción, denominada contacto friccional. La condición de impenetrabilidad entre cuerpos se considera como un tipo de no linealidad geométrica, pues dos cuerpos no pueden ocupar la misma posición en el espacio. La segunda condición modela el desplazamiento tangencial entre dos superficies de contacto y se considera como un tipo de no linealidad material.

6. Modelización del problema

6.1. Definición geométrica

El objeto de este trabajo de final de grado es el análisis mecánico de las fijaciones de snowboard. Para ello recurriremos a la herramienta informática *SolidWorks* para simular las condiciones de uso y ver así cómo responde a dichas solicitaciones. Es necesario modelar las piezas del producto para poder hacer uso de esta herramienta, así como las acciones que se van a considerar.

El producto que comercializa *SnabbSnö* consta de dos partes claramente diferenciadas. Por un lado el sistema de desconexión formado por el núcleo y el anillo y por otro lado la fijación. El sistema de desconexión es el mecanismo creado por *SnabbSnö* para facilitar la conexión y desconexión de la fijación respecto de la tabla e snowboard. Por otra parte la fijación tiene la función de conectar y adaptarse a las botas mediante dos correas, una que actúa sobre la punta del pie y otra que actúa sobre el tobillo, presionado el talón sobre el soporte posterior. Esta fijación es genérica, de diseño convencional, adquirida por *SnabbSnö* de una empresa ajena.

Hay que tener en cuenta que para este análisis nos centramos únicamente en el sistema de desconexión de las fijaciones formado por el núcleo y el anillo, ya que este sistema es el elemento innovador del producto. Por lo tanto el sistema que desempeña la función de conectarse y adaptarse a las botas, la fijación de diseño convencional, no forma parte de los objetivos de este estudio.

El mecanismo de desconexión se realiza mediante el proceso de fabricación por fundición a partir de un molde basado en el modelo del producto diseñado digitalmente. Con el proceso de fundición se obtiene un acabado de buena calidad, con gran cantidad de detalle fiel a la geometría del producto, por este motivo los moldes han de contener todos los detalles que se desean plasmar. Para la elaboración de estos moldes se emplea un modelo del producto de alta resolución. Este nivel de detalle no es necesario para nuestro estudio, más bien es contraproducente, pues hace que el diseño sea excesivamente complejo de analizar. Gran parte de los detalles externos del diseño son puramente estéticos y, por lo tanto, prescindibles.

El programa con el que se ha realizado el modelado 3D de la geometría del producto para llevarlo a la producción, *NX Siemens*, no es completamente compatible con *SolidWorks*. Como consecuencia de esta incompatibilidad hay geometrías que el programa con el que se realizarán los análisis, *SolidWorks*, no reconoce y por tanto estos diseños importados del programa de origen no son útiles y por ello que se ha tenido que realizar de nuevo el modelado geométrico del producto. Como el nuevo modelo que se va a realizar desde cero se llevará a cabo con el objetivo de ser analizado, la geometría que se quiere reflejar será fiel con la original, pero tomando las consideraciones necesarias para reflejar el nivel de detalle justo para que no resulte excesivamente complejo y así no ralentizar los cálculos necesarios para el estudio en el análisis. De este modo se buscará un compromiso en el diseño que permita tener

el máximo nivel de detalle de la pieza sin excesivas complejidades que permitan un análisis fluido.

Ejemplo de elementos que pueden ser elididos son los grabados realizados sobre la superficie del anillo y del núcleo (ilustración 15). Un ejemplo de estos elementos es el que indica de qué pie es cada una de las fijaciones mostrando una “R”, que sugiere el término inglés “Right” para el pie derecho. También en el núcleo de la fijación izquierda se puede observar el grabado “L”, que sugiere el término inglés “Left” para referirse a la pieza izquierda. Tampoco el emblema de la empresa en el centro del núcleo será representado en el modelo que se va a analizar. Algunos redondeos existentes en el diseño comercial para dar un aspecto más estético al producto tampoco serán reflejados en el modelo de la pieza que se desea estudiar. Finalmente, en el diseño que se ha llevado a la producción se ha realizado un orificio en cada núcleo. El objetivo de este orificio es conectar mediante un gancho un cordón que se anudará a la bota, de forma que cuando se libera la fijación de la bota este cordón de seguridad impida que se pueda escapar la tabla deslizándose sin control. Este orificio tampoco será representado en el diseño que se desea estudiar. Como posteriormente se explicará, el sistema de seguridad que impide la desconexión involuntaria del sistema que va incorporado en el anillo no será representado en la geometría que se va a analizar.

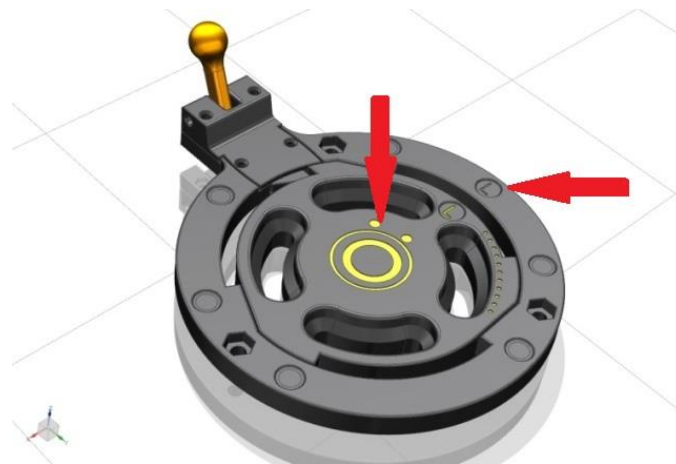


Ilustración 15

Otro elemento de las fijaciones cuyo funcionamiento no va a ser analizado y por lo tanto no va a ser modelizado, está contenido en el propio sistema de desconexión. Se trata en este caso del dispositivo de seguridad que evita la desconexión de las fijaciones de la tabla de modo involuntario (ilustración 16). Este sistema está compuesto por un gatillo y su funcionamiento es similar al de una cerradura. Este gatillo se mantiene cerrado mediante un resorte. A la hora de conectar la fijación a la tabla, mediante el giro que es necesario para llegar a este fin, el gatillo es empujado por uno de los filos hasta llegar al final donde el resorte lo fuerza a desplazarse. De este modo bloquea este filo e impide la rotación de la fijación, la cual provocaría la desconexión del ensamblaje. Por lo tanto cuando se desea desconectar el sistema es necesario hacer retroceder el gatillo manualmente mediante la palanca diseñada con este fin. Siendo por lo tanto esta tarea imposible de realizar involuntariamente, asegurando así que no se va a desensamblar el sistema.

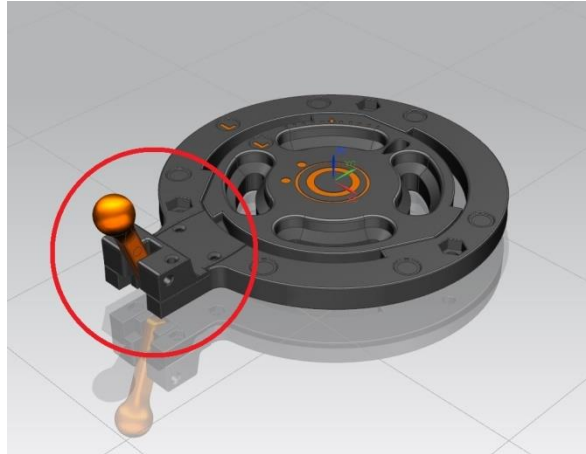


Ilustración 16

El dispositivo de seguridad no va a ser analizado, pues no está influenciado por el uso de la fijación durante la práctica del deporte en los diferentes escenarios propuestos. Por lo tanto las solicitaciones que se han estimado que afectan al mecanismo durante la práctica del snowboard no son aplicables a este sistema. Su utilización está delimitada por la intención del usuario de conectar y desconectar el sistema mediante la realización de un desplazamiento lineal del gatillo, acción que no se ve influenciada por el uso de la fijación durante la práctica de este deporte.

6.1.1. Anillo

Una vez decidido el nivel de detalle que la pieza va a tener se procede a la realización del diseño mediante la herramienta de modelado en 3D *SolidWorks*. Esta herramienta permite importar el diseño original realizado con el programa *NX Siemens*, de modo que se pueden tomar geometrías como referencia para el nuevo diseño que se va a realizar partiendo de éstas. Comenzando por el anillo, la primera geometría que se toma prestada es el perímetro de esta pieza, el anillo. Esta geometría se croquiza en el plano frontal. De este modo se obtiene el perímetro de todo el bloque que conforma el anillo con el núcleo incorporado.

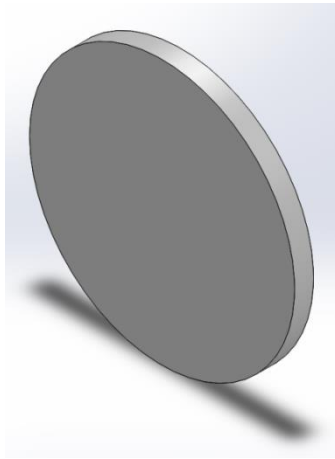


Ilustración 17

Seguidamente, mediante la operación de extrusión, se le da volumen a la geometría plana anterior seleccionando el espesor deseado con el objetivo de conformar un bloque macizo (ilustración 17). Posteriormente se procede a realizar el vaciado que permite la inserción del núcleo. Esta geometría con forma de arandela incluye los tres filos que permiten la conexión de las dos piezas, el anillo concéntricamente en el núcleo (ilustración 18). Para ello se toma como referencia el perímetro de este vaciado y se realiza un corte pasante por extrusión, indicando la profundidad del corte igual al espesor d la pieza.

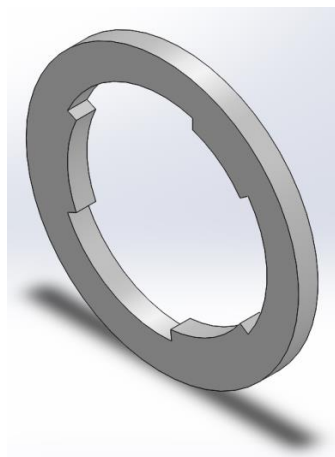


Ilustración 18

A continuación, mediante geometrías auxiliares se puede dar la forma definitiva que tiene la guía del filo. La complejidad de esta geometría se encuentra en que el saliente de la guía no es uniforme. Esto no se puede apreciar desde la vista de planta, sino que es necesario recurrir a una vista frontal o lateral del interior del anillo para observar que su altura varía según la pendiente que tiene. Es por esto que el corte de la guía no se puede extruir desde arriba, pues la profundidad de corte no es uniforme y por lo tanto se ha de recurrir a una geometría auxiliar con el negativo de la forma de la guía que permita retirar el material excedente según esta geometría (ilustración 19).

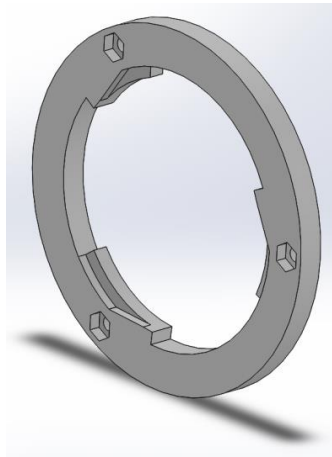


Ilustración 19

Finalmente se lleva a cabo el taladro para los pernos que sujetan el anillo a la fijación y el vaciado que permite la incrustación de las tuercas hexagonales (plano 1). Esta geometría requiere su representación, pues será necesaria para indicar el tipo de condiciones de contorno de esta pieza.

6.1.2. Núcleo

El mecanismo de desconexión está formado por dos piezas: el anillo, que ya hemos diseñado, y el núcleo, el diseño del cual se realizará a continuación. Esta pieza con forma de disco se fija mediante cuatro pernos a la tabla de snowboard y está provista de tres filos que engranan con las guías ubicadas en el anillo. Para ello se toma como referencia la geometría del perímetro del núcleo con los filos incluidos y se plasma en el plano frontal del croquis. Seguidamente se extruye este croquis con el espesor deseado para formar el anillo macizo (ilustración 20).

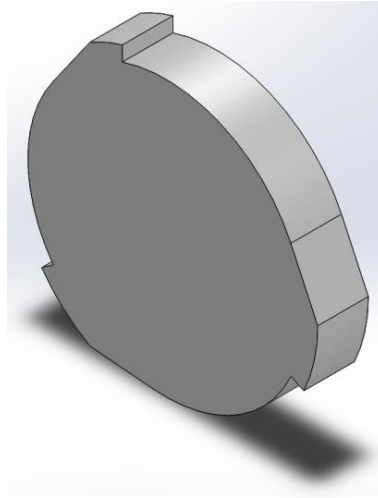


Ilustración 20

A continuación, mediante una geometría auxiliar, se realiza el corte de los filos con el fin de darles el espesor adecuado (ilustración 21). Esta operación, al igual que la practicada en el anillo, tiene un nivel mayor de complicación al tratarse del filo una geometría de espesor no constante, sino que disminuye progresivamente. El núcleo es una figura cilíndrica, tratándose por lo tanto de una complicación añadida.

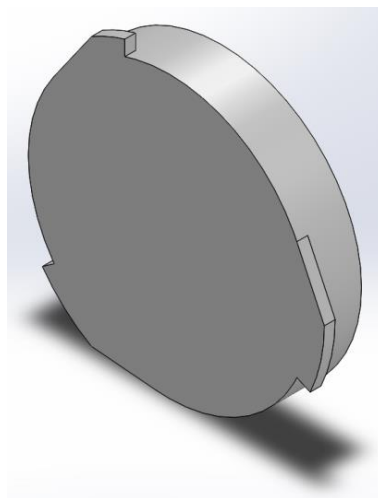


Ilustración 21

Con el fin de conseguir una pieza más ligera, el núcleo contiene un vaciado con forma de tronco de cono en la parte inferior de esta pieza. Para realizar este vaciado se crea un croquis en el plano de vista lateral. Se incluye un eje en el centro de la pieza que sirve para realizar un corte alrededor de este eje con la geometría de revolución del vaciado. Este vaciado puede debilitar el núcleo por lo tanto se incluye un nervado en el interior del vaciado. Se crea un plano paralelo al del fondo del vaciado separado por la profundidad que tendrán los nervios. De este modo se croquiza sobre este plano auxiliar la geometría del nervado y se extruye hasta el plano del fondo del vaciado (ilustración 22).

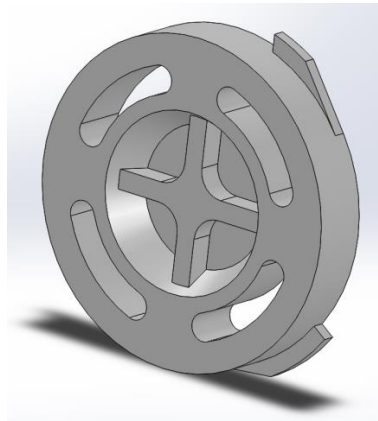


Ilustración 22

Finalmente se realizan los cortes pasantes por extrusión de la geometría que forma la guía donde el perno puede ser situado para anclar este núcleo a la tabla de snowboard (plano 2). Se ejecutan cuatro guías de este tipo situadas desfasadas 90º entre ellas.

6.2. Malla de elementos finitos

Para el cálculo de elementos finitos es necesario representar las geometrías deseadas mediante elementos finitos conectados. Estos elementos finitos deben reproducir fielmente la geometría del sistema continuo formado por la pieza diseñada. Al mismo tiempo se debe buscar un compromiso entre el número de elementos finitos que se va a crear, suponiendo que mayor número de elementos implica mayor detalle del diseño, pero mayor tiempo computacional que va a demorar este proceso (ilustración 23). El tiempo que la herramienta va a dedicar al proceso de cálculo será proporcional a la densidad de elementos finitos con que se representa el diseño.

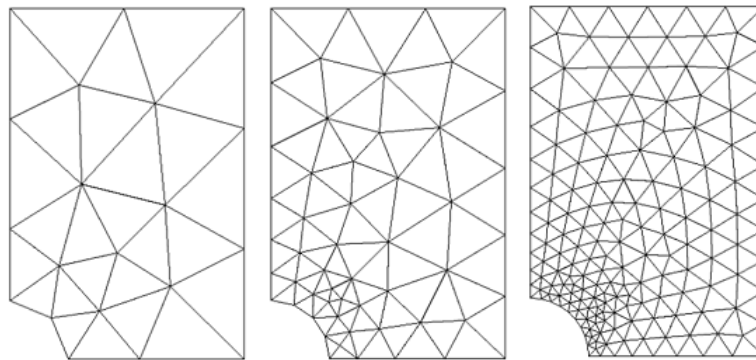


Ilustración 23

Para certificar la teoría anteriormente descrita se realiza un análisis de sensibilidad de malla. Para ello se lanzan simulaciones con mallados de diferente nivel de detalle realizados con la herramienta encargada de realizar el mallado de las piezas que lleva incorporado el software *SolidWorks*. Esta herramienta realiza el mallado de forma autónoma siguiendo las indicaciones que le da el operario. El usuario puede indicar, a través de una barra deslizadora, cualquier posición entre una malla con el menor nivel de detalle, 100% grueso, hasta el otro extremo en que el mallado es el más detallado que proporciona esta herramienta, 100% fino (ilustración 24).

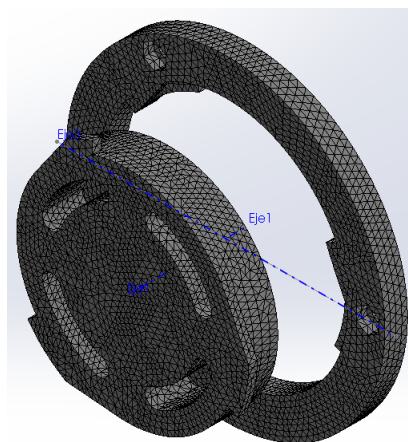


Ilustración 24

Las simulaciones que se realizan para llevar a cabo el análisis de independencia de malla parten de un modelo representado con mallado 100% grueso, 70% grueso, 50% grueso-fino, 70% fino y 100% fino. Cabe especificar que para estas simulaciones se mantienen todas las condiciones iguales para todos los análisis, pues se trata en todos los casos de un análisis no lineal en que se aplica una carga vertical distribuida sobre las superficies superiores de las dos piezas del mecanismo de desconexión: anillo y núcleo. Estas dos piezas están formadas por el mismo material, sujetos a las mismas condiciones de contorno y con cargas de la misma naturaleza y magnitud en todas las simulaciones. De este modo el único elemento que cambia en estas simulaciones es el mallado de las piezas.

A su vez, tomando como base los resultados del análisis realizado con un mallado automático al 50% grueso-fino, se comparan estos con los resultados obtenidos de una simulación con el mallado al 50% grueso-fino y seleccionando la opción “utilizar por tamaño de pieza”. Seleccionando esta opción el programa asigna el tamaño de elemento a cada componente o sólido en función de su volumen individual. También se compara con la opción de un mallado al 50% grueso-fino con controles de malla en las zonas donde se desea obtener más detalle, como son las guías, los filos.

Tabla 1

Tamaño de la malla(barra)	Número total de nodos	Número total de elementos	Cociente de aspecto < 3	Cociente de aspecto > 10	Tensión max (N/m ²)	Desplazamiento max(mm)	Tiempo (min)
Grueso 0%	25148	15045	98,2	0,206	3,42E+08	0,328765	11
Grueso 30%	47496	29452	99	0,129	3,28E+08	0,320883	36
Grueso-Fino 50%	125624	82278	99,6	0,0425	5,54E+08	0,311296	60
50% repetido	125624	82278	99,6	0,0425	5,54E+08	0,311296	62
50% + ajuste por tamaño de malla	39485	24311	99,2	0,128	3,14E+08	0,329508	32
50% + control malla	127612	83521	99,6	0,0587	5,50E+08	0,3116	40
Fino 70%	208406	139497	99,7	0,0358	5,77E+08	0,306574	70
Fino 100%	833920	576510	99,8	0,00989	-*	-*	160

Se puede observar el resultado de estas simulaciones en la tabla anterior en que se muestran las características más relevantes: el tamaño de la malla, número total de nodos, número total de elementos, los coeficientes de aspecto, la tensión máxima alcanzada así como el desplazamiento máximo y el tiempo de computación (tabla 1).

*Ha sido imposible realizar el análisis con el mallado 100% fino debido a falta de potencia del ordenador empleado para realizar estos análisis. El nivel de requisitos necesarios para llevar a cabo el análisis es superior al disponible. Una vez alcanzado el 14% del proceso del análisis, tras 160 minutos, una alerta de emergencia ha obligado a detener el análisis, de modo que no ha sido posible conocer la tensión máxima ni el desplazamiento máximo.

Observando los detalles del mallado se puede comprobar que hay una relación entre el número de elementos que definen la malla de las piezas y la deformación de estos elementos. Esto indica que cuando se emplea un mayor número de elementos para representar la geometría deseada, estos elementos sufren deformaciones menores. Esto es interesante ya que se desea que los elementos tetraédricos sean lo más regulares posibles, y tengan las aristas iguales. Estas condiciones son las ideales pero son poco probables, ya sea porque aparecen aristas, discontinuidades, o por la transición de un tamaño de mallado pequeño a otro grande, como ocurre con los controles de mallado. Es por eso que se busca que el porcentaje de elementos deformados sea el menor posible. Esto lo indica el cociente de aspecto y se puede observar que cuando hay mayor número de nodos y elementos que forman la malla, mayor es el porcentaje de elementos deformados con cociente de aspecto < 3 (ilustración 25) y menor el porcentaje de elementos deformados con cociente de aspecto > 10 (ilustración 26). Por tanto se puede afirmar que cuanto mayor es el número de nodos y elementos que forman el mallado de una pieza, más fiel es la representación de esta geometría.

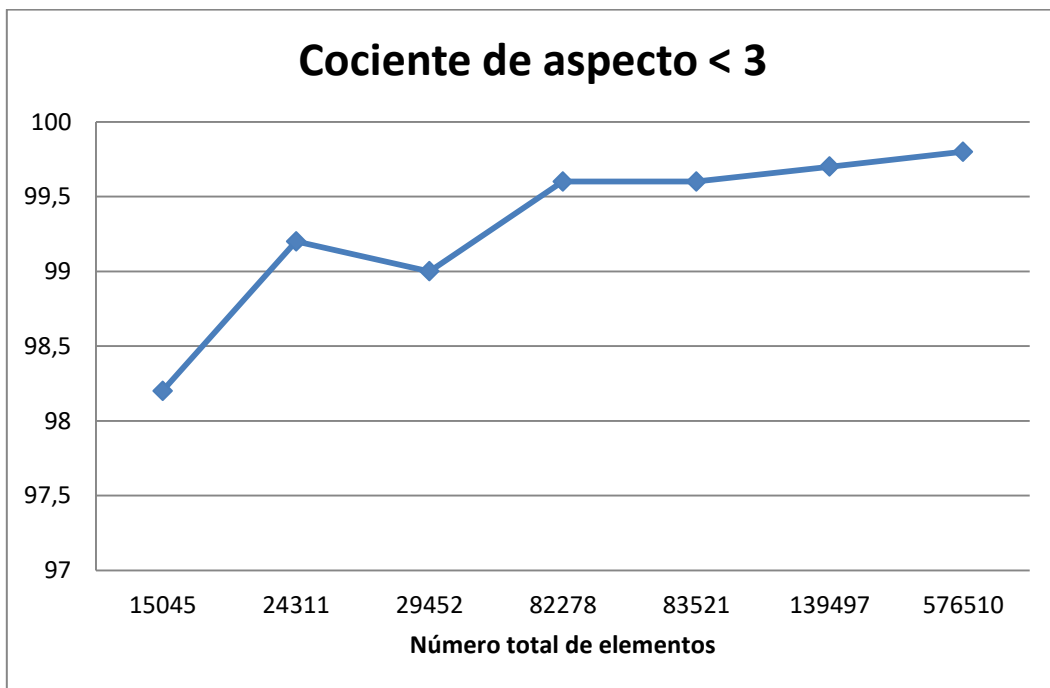


Ilustración 25

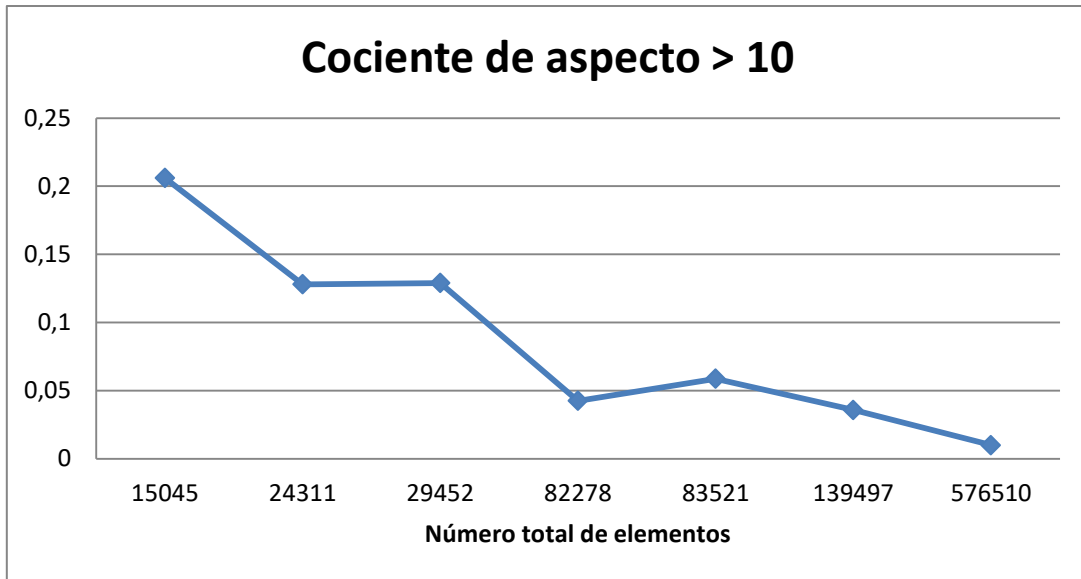


Ilustración 26

También se puede observar que hay una relación entre el número total de nodos y elementos que forman la malla de las piezas que se desean simular y el tiempo de computación que el software *SolidWorks* requiere para realizar el análisis demandado (ilustración 27).

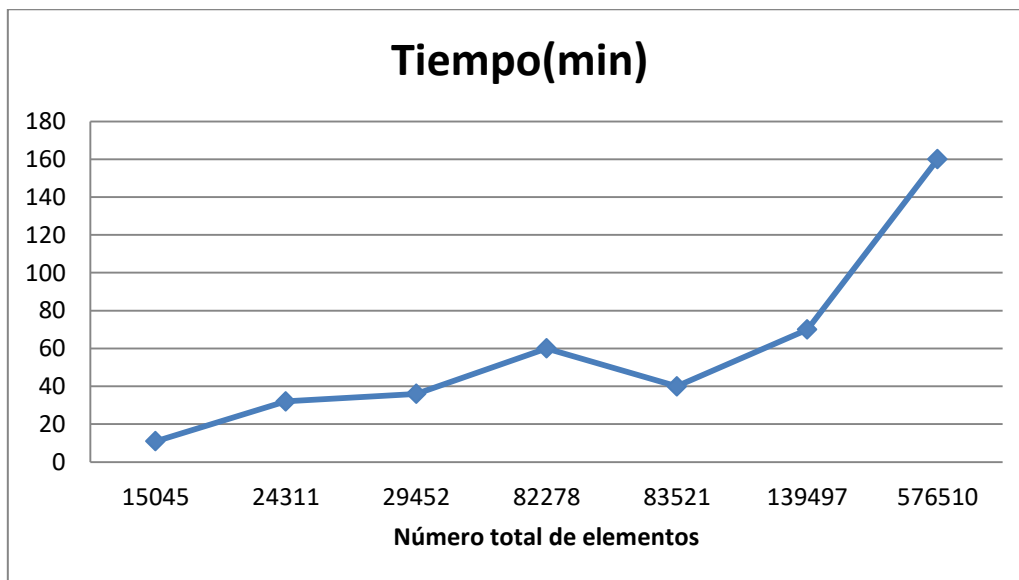


Ilustración 27

Finalmente se puede comprobar que una vez las piezas están malladas con suficiente nivel de detalle los resultados del análisis, más concretamente el resultado de la tensión máxima (ilustración 28) y el desplazamiento máximo (ilustración 29), no sufre variaciones superiores al 5% entre análisis con mallas de diferente nivel de detalle, mostrando así una cierta independencia de la malla.

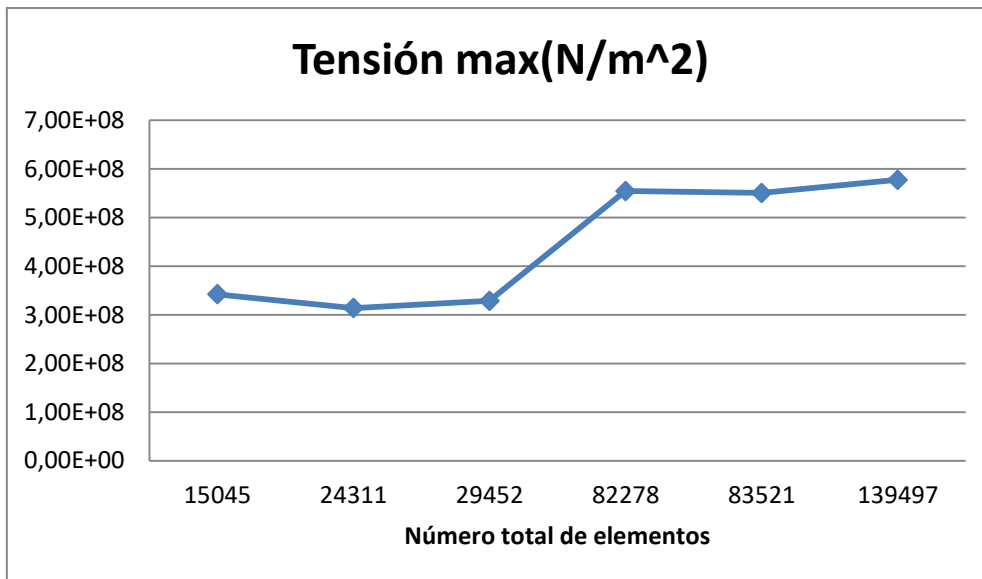


Ilustración 28

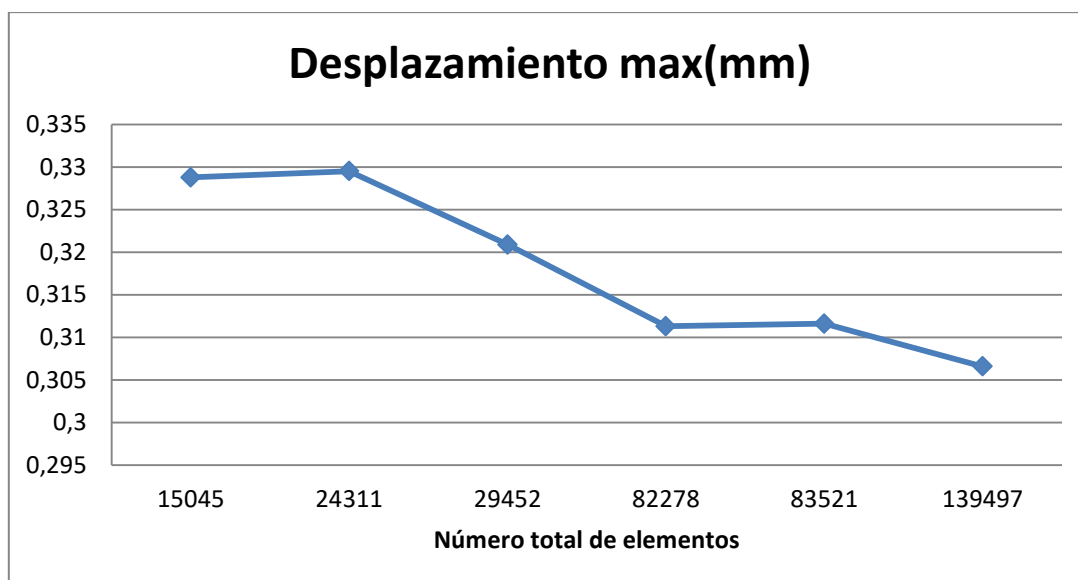


Ilustración 29

Es por este motivo que la estrategia más adecuada para abordar este problema es emplear elementos finitos de diferentes tamaños. En las áreas donde el diseño carece de complicaciones se pueden emplear elementos finitos de mayor tamaño, con el objetivo de reducir la cantidad de elementos finitos necesarios para representar este sector de la pieza. Donde el diseño del producto es más complejo y se desea representar con mayor grado de detalle se pueden emplear elementos finitos de menor tamaño y por tanto la densidad de elementos finitos en esta área será mayor. Siempre que se desea emplear esta estrategia es necesario crear una transición suave entre los elementos de diferentes tamaños.

Para realizar el mallado de estas piezas, el núcleo y el anillo, se emplean elementos finitos de diferentes tamaños. De este modo se malla el conjunto de las piezas con el tamaño de malla que se crea adecuado y se aplica un control de malla que permita crear un mallado con mayor detalle en las zonas deseadas. Estas zonas son las áreas colindantes a los elementos de fijación, pernos, tuercas, etc. Por otro lado las zonas que se quieren representar con mayor detalle y por tanto de las que se quieren recibir más información, son las áreas de contacto entre el núcleo y el anillo, los tres filos y guías donde estas dos geometrías se engranan (ilustración 30).

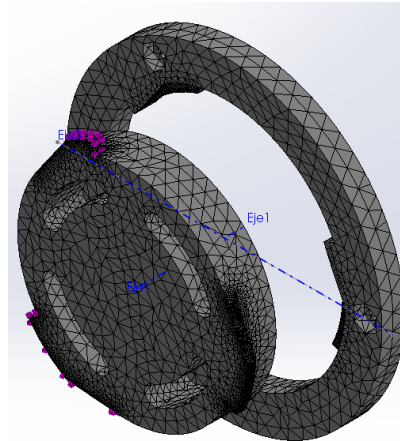


Ilustración 30

La malla del ensamblaje de las piezas está formada por un total de 125.857 nodos que forman 82.720 elementos tetraédricos. Estos elementos tienen un tamaño máximo de 4.35837 mm y un tamaño mínimo de 1.45277 mm. De esta forma se obtiene un mallado en que el 97.5% de los elementos tienen un cociente de aspecto menor que tres y los elementos con un cociente de aspecto mayor que diez solo alcanzan el 0.353% (tabla 2). El tiempo computacional con estas características de la malla es de aproximadamente 40 minutos.

Tabla 2

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Malla (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 puntos
Control de malla	Definida
Tamaño máx. de elemento	4.35837 mm
Tamaño mín. de elemento	1.45277 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	125857
Número total de elementos	82720
Cociente de aspecto máximo	34.54
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	97.5
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0.353
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:08
Nombre de computadora	WINDOWS-PC

6.3. Propiedades de los materiales

El mecanismo de desconexión es un componente técnico que va a sufrir ciertos esfuerzos durante su uso y éste va a ser en ambientes de baja temperatura y alta humedad. Por esta razón y por la importancia de obtener un producto lo más ligero posible, la empresa productora ha seleccionado el aluminio como material base para su fabricación. Más concretamente la aleación de aluminio EN AC-46000. Esta aleación está especialmente destinada para su aplicación en procesos de fundición según la Euronorma (EN) 1706:2010. Este estándar europeo especifica la composición química de aleaciones de aluminio para fundición y las propiedades mecánicas de estas aleaciones.

Esta aleación de aluminio denominada por la norma ISO como $AlSi_9Cu_3$ (Fe) no está registrada en la biblioteca de materiales de la herramienta informática *SolidWorks*. Tampoco está registrado ningún material equivalente con características similares según otras normas, como es el caso de las aleaciones denominadas por la norma japonesa (JIGS) ADC10 o ADC12. Tampoco la aleación A383.0 designada por la ASTM, la norma americana, está presente en la biblioteca de este software. Del mismo modo ocurre con la aleación 226D según la norma alemana VAR y con la aleación nombrada LM24 por la BS, la norma de Reino Unido.

Al no estar presente este material es necesario modelizar en la biblioteca de materiales de *SolidWorks* la aleación de aluminio $AlSi_9Cu_3$ (Fe) con las propiedades específicas del EN AC-46000. Estas características son el módulo elástico (módulo de Young), el coeficiente de *Poisson*, el módulo cortante, la densidad de masa, el límite de tracción, el límite elástico, el coeficiente de expansión térmica, la conductividad térmica y el calor específico. Estas especificaciones definen las propiedades del material según la biblioteca de materiales de esta herramienta informática (tabla 3).

Tabla 3

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	75000	N/mm ²
Coeficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	26900	N/mm ²
Densidad de masa	2790	kg/m ³
Límite de tracción	240	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	140	N/mm ²
Coeficiente de expansión térmica	2.1e-005	/K
Conductividad térmica	109	W/(m·K)
Calor específico	850	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Puesto que el proceso de fabricación de este producto seleccionado por la empresa productora es la fundición, este material cumple todos los requisitos necesarios. El proceso de fabricación mediante fundición permite obtener productos de geometrías complejas de una sola pieza y a la vez reúne propiedades que otorgan al producto un buen acabado. Este conjunto de características unido a que este proceso de fabricación no es excesivamente complejo de llevar a cabo y se puede realizar de forma automatizada, conforman un compromiso entre calidad del producto final, complejidad del proceso de fabricación y coste económico que ha favorecido la selección de este proceso de producción.

Los dos componentes del conjunto, el anillo y el núcleo están fabricados en la aleación de aluminio EN AC-46000 (AlSi9Cu) mediante fundición.

6.4. Condiciones de contorno

La pieza a la que se le van a aplicar condiciones de contornos es el núcleo. La otra pieza del conjunto, el anillo, se ensambla conectando sus guías a los filos del núcleo. Los esfuerzos que se aplican sobre el anillo se transmiten al núcleo mediante el ensamblaje. El núcleo está sostenido fijamente a la tabla de snowboard mediante cuatro pernos.

Con el objetivo de realizar un análisis con características conservadoras se representa la superficie donde aterriza el usuario, idealmente nieve, como una superficie totalmente rígida. De este modo esta superficie no absorbe energía del impacto. Del mismo modo la tabla también es representada como un elemento totalmente rígido que tampoco absorbe ninguna energía del impacto.

Por lo tanto la configuración del anclaje del núcleo se modeliza seleccionando una sujeción fija aplicada sobre la base del núcleo, donde ésta contacta con la tabla de snowboard y a su vez contacta la base de la tabla con la superficie donde se aterriza (ilustración 31).

La sujeción fija restringe las traslaciones en los tres ejes relativos al plano de la base de la fijación y a su vez impide la rotación de esta base respecto a los ejes normales a los tres planos en que esta referenciada esta geometría. De este modo no es posible que exista ningún movimiento en la base del núcleo.

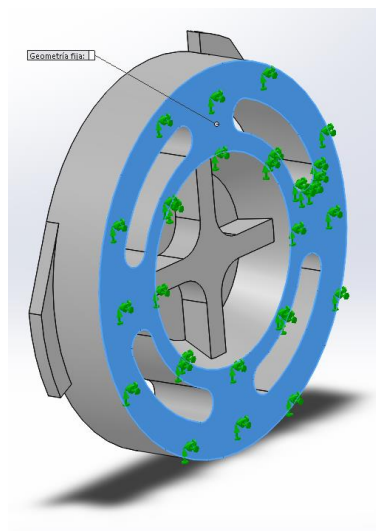


Ilustración 31

Al tratarse de un análisis de dos piezas que están en contacto, se deben especificar las características de estas áreas de contacto. Para ello se seleccionan todas las áreas donde va a existir este contacto, las caras externas de los tres filos del núcleo y las caras de los tres filos del anillo donde contactan las partes anteriores (ilustración 32). También se indica que la naturaleza del contacto será sin penetración. De este modo si la deformación durante la simulación es suficiente para causar autointersección, los sólidos no penetran entre sí.

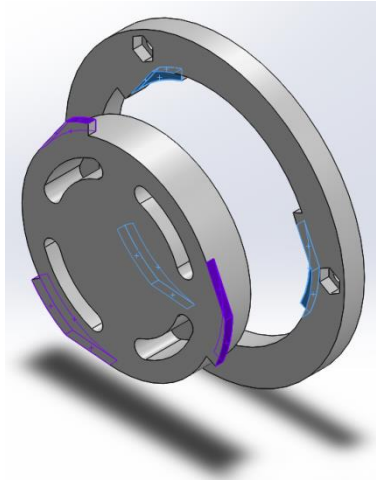


Ilustración 32

6.5. Acciones a considerar

Como anteriormente se ha citado, tras la información obtenida en la revisión bibliográfica de estudios relacionados con el snowboard en bases de datos científicas, el valor de la carga que se empleará como referencia para representar el efecto de una recepción de un salto es tres veces el peso del deportista con la equipación necesaria para practicar el snowboard (ecuación 2). Formará parte de este material la tabla de snowboard, las fijaciones, las botas y el casco. La masa de este equipo se estima en 8kg. Para delimitar la masa del usuario promedio se recurrirá al INE, Instituto Nacional de Estadística. Aquí se muestra, según datos tomados en 10 países de Europa y dentro de un rango de entre 25 y 34 años, que el valor medio de la masa de los varones es de 77kg. Por lo tanto la masa del conjunto del usuario y equipo necesario es de 85kg. Para trasladar esta masa a peso y por tanto fuerza se hace uso de la segunda ley de Newton, que indica que para calcular la fuerza que ejerce un objeto, se ha de multiplicar la masa de este cuerpo por la aceleración del campo gravitacional g (ecuación 3). De este modo se multiplicará la masa, 85kg, por la aceleración de la gravedad, 9.8 m/s^2 .

$$F = 3xW \quad (\text{ecuación 2})$$

$$W = mxg \quad (\text{ecuación 3})$$

$$85kg \rightarrow 2500N$$

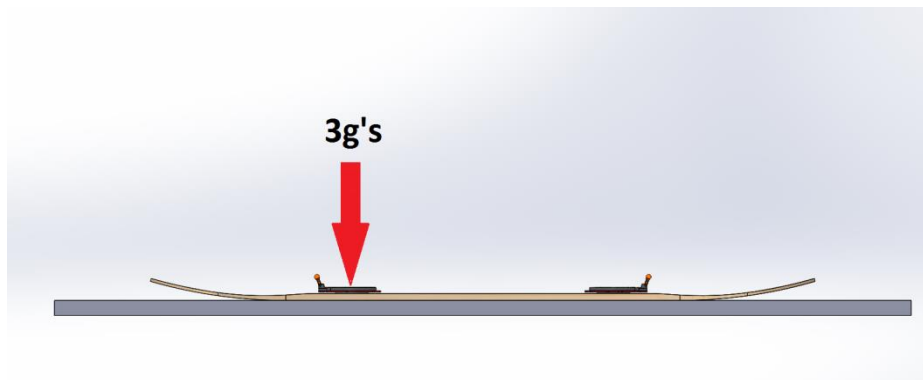


Ilustración 33

Esta fuerza vertical F se aplicará sobre el mecanismo de desconexión en el análisis que simula una caída vertical (ilustración 33). A su vez se transformará en una carga inclinada en los análisis que simulen la caída de la tabla, y por tanto del mecanismo de desconexión, formando un ángulo α con respecto del plano que representa la superficie de aterrizaje. En estas simulaciones esta carga se aplicará a una distancia d del punto de contacto entre la tabla de snowboard y la superficie de impacto, creando por lo tanto un momento flector que se aplica sobre el mecanismo de desconexión (ilustración 34).

Esta distancia d es la existente entre el punto de contacto y el mecanismo de desconexión, 0.35m. Este momento será el resultado de multiplicar la carga F por la distancia d , calculada empleando el coseno del ángulo α que forma el mecanismo de desconexión con la superficie de aterrizaje (ecuación 4).

$$M_f = F \cdot d \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{ecuación 4})$$

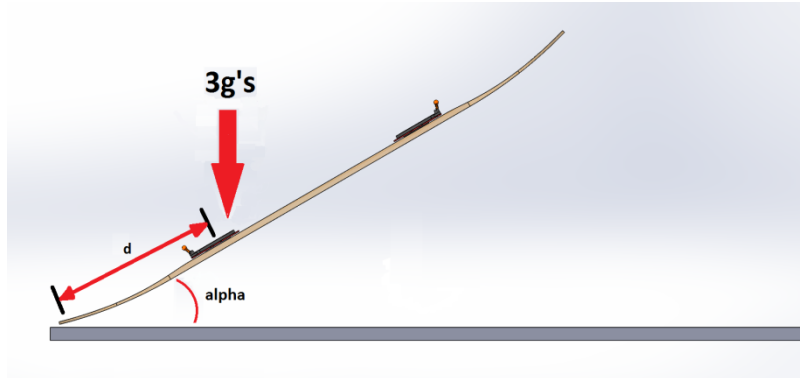


Ilustración 34

También se simulará el mecanismo de desconexión en una caída en que la tabla de snowboard forma un ángulo α distinto de cero con respecto del plano que representa la superficie de aterrizaje con la diferencia del caso anterior que en esta simulación la posición de la tabla será girada 90 grados respecto al eje longitudinal de la tabla (ilustración 35). De este modo el plano de la base de la tabla será perpendicular al plano de la superficie aterrizaje. Es decir, la tabla caerá sobre su canto metálico. Al aplicarse la carga F a una distancia (d) del punto de contacto entre la tabla y la superficie de aterrizaje se generará un momento torsor M_t sobre el mecanismo de desconexión. Como en el caso anterior, Este momento será el resultado de multiplicar la carga F por la distancia d . Esta distancia se calculará empleando el coseno del ángulo α que forma el mecanismo de desconexión con la superficie de aterrizaje (ecuación 5).

$$M_t = F \cdot d \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{ecuación 5})$$

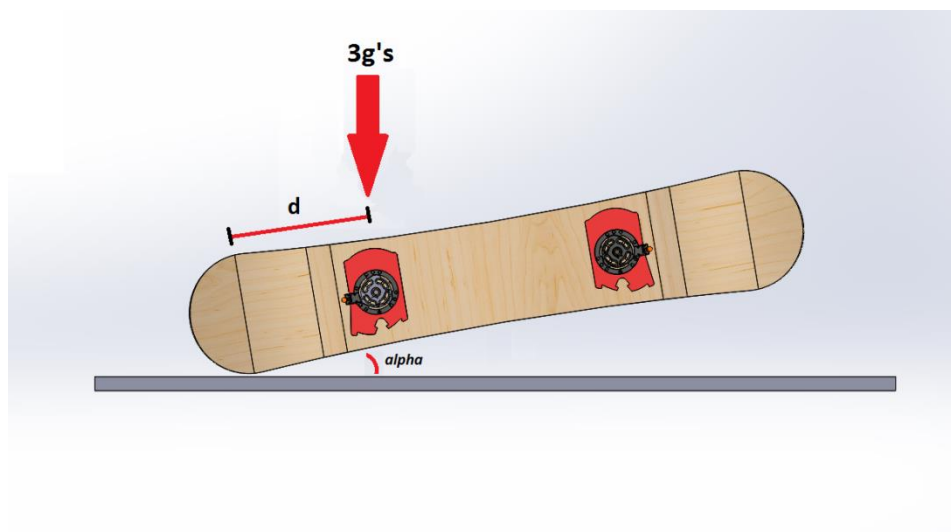


Ilustración 35

7. Análisis a realizar

7.1. Tipo

Tras modelizar el problema se puede comenzar a realizar los análisis, objetivo de este trabajo de final de grado. Como anteriormente se ha delimitado en apartado de la modelización del problema, la fijación (correas y soporte talón) no se llevará a estudio, al tratarse de un diseño genérico realizado por una tercera marca y por ello no es necesario que su funcionamiento sea analizado. Podemos suponer que la empresa que comercializa estas fijaciones ya ha llevado a cabo este tipo de análisis y el producto que comercializan es capaz de soportar las sollicitaciones generadas durante la práctica de este deporte. Por ese motivo se ha delimitado que el objeto de estudio será el sistema de desconexión, que es la tecnología novedosa que *Snabbsnö* introduce con su producto.

Una vez delimitado el conjunto de componentes que va a ser estudiado nos podemos centrar en el sistema de desconexión. Este sistema está formado por dos piezas, las cuales van a ser objeto de estudio. Por una parte el núcleo, sujeto fijamente sobre su superficie inferior. Por otra parte el anillo, que se enrosca al núcleo concéntricamente. El núcleo y el anillo constan de un conjunto de tres filos dispuestos según una disposición espaciada angularmente por 120°. Estos filos sirven para crear esta conexión a modo de tapón de rosca de botella.

Al tratarse, el estudio, de un análisis del funcionamiento del producto durante su uso en la práctica del snowboard, al sistema de desconexión se le aplican unas cargas que simulan las sollicitaciones ejercidas en el escenario que se crea más adecuado en cuanto a la representación de las condiciones más desfavorables. Estas cargas se aplican sobre las dos partes que conforman el mecanismo de desconexión, el anillo y el núcleo, de modo que se genera una interacción entre las piezas. Por lo tanto el resultado de la transmisión de esfuerzos está relacionado con las áreas de contacto entre las dos piezas y con la deformación de ambas. Esto significa que un análisis de elementos finitos lineal mostraría un resultado que no sería suficientemente realista, pues la evolución de las cargas aplicadas en las áreas de contacto está relacionada con la deformación de las piezas y con estas áreas de contacto a su vez. Esto provoca que, debido a que en el análisis sucede una interacción entre dos elementos, las condiciones de la simulación varíen respecto a las condiciones iniciales. Por este motivo el análisis que se lleva a cabo, mediante el software informático *SolidWorks*, es un análisis de elementos finitos no lineal de contacto.

El análisis de elementos finitos no lineal de contacto muestra la respuesta ante las cargas que representan un escenario de forma aislada, pero durante la práctica del snowboard este escenario puede suceder en repetidas ocasiones, por ello se realizará también un estudio aplicando las cargas de los casos anteriores de una forma cíclica mediante un análisis de fatiga.

7.2. Casos de carga considerados

Como anteriormente se ha explicado, una de las grandes dificultades de este trabajo ha sido delimitar los esfuerzos que se aplican al mecanismo de desconexión durante el estudio. Esto se debe a que se carece de información de gran precisión acerca de la naturaleza de los estudios que se deben realizar para simular los esfuerzos a los que el mecanismo de desconexión está sometido durante la práctica del snowboard. Pues para ello es necesario conocer la mecánica de los movimientos que se realizan durante la práctica de este deporte. A su vez también se ha de tener en cuenta la variabilidad de estos movimientos y de la fuerza que aplica cada usuario en cada escenario diferente. Por este motivo es necesario diseñar estos análisis con el fin de simular esta actividad deportiva, siguiendo los criterios obtenidos de la revisión bibliografía a estudios relacionados con el snowboard en bases de datos científicas.

De este modo se han seleccionado tres análisis que serán simulados mediante el software *SolidWorks* con diferentes cargas con el fin de obtener la combinación que genere las sollicitaciones más desfavorables. De esta forma, si el análisis del producto con las características más desfavorables revela unos resultados favorables se podrá extrapolar que el resultado de todos los casos en que se usa la fijación de un modo más moderado también es favorable. Estos tres análisis hacen referencia al mismo escenario, el aterrizaje de un salto sobre una superficie plana y con velocidad horizontal cero. El esfuerzo que genera el efecto del aterrizaje se representa como una fuerza vertical de 3g's aplicada sobre un único mecanismo de desconexión. De este modo se representa una condición más desfavorable, pues en una situación real de recepción de un salto las cargas serían soportadas con las dos piernas, realizándose por tanto, una distribución de las cargas entre los dos mecanismo de desconexión.

Para simular los diferentes esfuerzos que causa el efecto del aterrizaje de un salto se ha diseñado tres casos en que se analizará individualmente como responde el mecanismo de desconexión a la aplicación de una carga vertical, la aplicación de un momento flector y la aplicación de un momento torsor.

7.2.1. Primer caso

El primero de los análisis que se realiza es el más sencillo de todos, donde se simula el efecto de una caída vertical sobre una superficie plana. Para ello se aplica la fuerza F de 2500 N de forma vertical con sentido negativo. Esta carga se aplica de forma uniforme sobre la superficie superior del núcleo simulando la presión homogénea que ejerce la bota sobre esta pieza (ilustración 36). Como anteriormente se ha mencionado, con el fin de realizar los estudios más conservadores, se aplica todo el peso sobre el mecanismo de desconexión de una fijación.

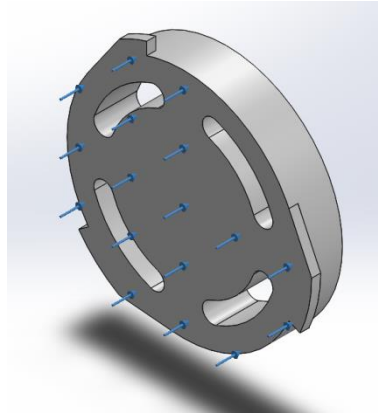


Ilustración 36

En este análisis se ha considerado que no hay interacción entre el anillo y el núcleo, por este motivo se prescinde del análisis no lineal de contacto y se emplea un análisis lineal únicamente del núcleo. Esto se debe a que el anillo del mecanismo de desconexión está ensamblado sobre un orificio practicado en la base de la fijación y acondicionado para albergar esta pieza (ilustración 37). La base de esta fijación está fabricada en un material metálico a la que se le ha adherido una capa de material plástico la cara inferior. La finalidad de esta capa inferior es evitar que durante el anclaje de las fijaciones, mediante el mecanismo de desconexión, a la tabla de snowboard se provoquen daños a la superficie de la tabla. Otra finalidad de esta capa de material plástico es la de aumentar la fricción entre la base de la fijación y el suelo nevado, facilitando así los desplazamientos sobre esta superficie. La tercera finalidad es aumentar el confort durante la práctica del snowboard al actuar este material como amortiguador situado entre la tabla de snowboard y las botas absorbiendo vibraciones y pequeños impactos que pueda transmitir del firme.

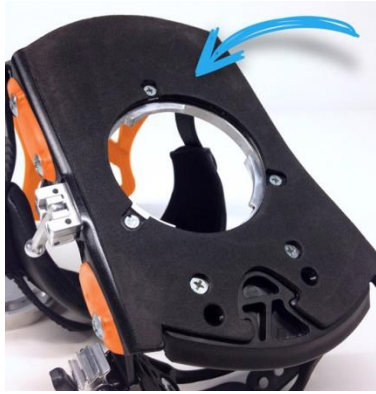


Ilustración 37

En conclusión, se emplea un material plástico para estas finalidades debido a que es más blando que el material metálico del que está fabricada la base de la fijación y la aleación de aluminio de que está fabricado el mecanismo de desconexión. Esto influye en la transmisión de cargas estáticas sobre el mecanismo de desconexión, pues del mismo modo que absorbe vibraciones e impactos provenientes de la tabla, ocurre lo mismo con las cargas aplicadas sobre el mecanismo de desconexión. En este caso, durante la aplicación de una carga vertical, los esfuerzos que se apliquen sobre el núcleo verticalmente provocarán que el material de menor rigidez (plástico) absorba parte estas cargas y se comprima, provocando un desplazamiento vertical descendente de esta capa de material plástico y por tanto del anillo del mecanismo de desconexión. Esto significa que la carga que se aplica sobre el anillo ejerce una interacción insignificante con el componente del mecanismo de desconexión que permanece fijo, el núcleo. Por lo tanto tiene lugar un contacto despreciable entre en anillo y el núcleo durante la aplicación de esta carga, siendo posible simular este caso mediante un análisis lineal únicamente aplicando carga al núcleo.

7.2.2. Segundo caso

El segundo caso representa el efecto de una caída vertical sobre una superficie plana, pero en esta ocasión la tabla de snowboard forma un ángulo α respecto del suelo. Por este motivo en el impacto no contacta la base de la tabla con el firme sino que lo hace el canto de la tabla. De este modo se ejerce en el mecanismo de desconexión un momento flector generado por la fuerza F , 2500 N, aplicada de forma vertical con sentido negativo multiplicada por la distancia d entre la fijación y punto de contacto entre la tabla de snowboard y la superficie.

Para simular este caso se aplica la carga inclinada F distribuida sobre la superficie superior del anillo y del núcleo formando ángulo α con respecto del eje vertical. Al mismo tiempo se aplica un momento flector M_f sobre la superficie del anillo y del núcleo (ilustración 38).

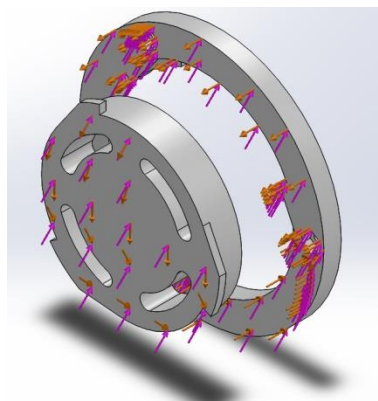


Ilustración 38

Con el objetivo de observar la influencia del ángulo que forma la tabla de snowboard con la superficie de contacto, se realizan cuatro análisis de este segundo caso aplicando en cada ocasión diferentes ángulos, de 15° , 30° y 45° . Esto significa que en cada análisis el ángulo de aplicación de la carga inclinada F varía, así como la magnitud del momento flector M_f respectivamente, $845 \text{ N}\cdot\text{m}$, $758 \text{ N}\cdot\text{m}$ y $619 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Excepcionalmente se añade un caso donde el ángulo α entre la superficie de la tabla de snowboard y el suelo es de cero grados. Con este caso se quiere analizar la reacción del mecanismo de desconexión ante la aplicación del momento flector M_f de mayor magnitud que puede aparecer en este escenario, $875 \text{ N}\cdot\text{m}$. Aunque es difícil imaginar un escenario donde el impacto de la tabla de snowboard, formando cero grados con la superficie, genere un momento flector M_f , este caso se puede dar en el efecto de una caída vertical con la tabla de snowboard plana sobre un montículo situado en el extremo de la tabla. De este modo se ejercerá un momento flector resultado de combinar la fuerza vertical F con sentido negativo multiplicada por la distancia d desde la fijación al punto de contacto entre la tabla y el montículo.

7.2.3. Tercer caso

En los casos anteriores se han simulado los esfuerzos creados por una carga distribuida y un momento flector aplicados ambos sobre la superficie superior de todo el mecanismo de desconexión, el anillo y el núcleo. En el tercer caso se quiere estudiar el efecto que tiene la introducción de un momento torsor en el mecanismo de desconexión a través de su aplicación en el anillo.

El ensamblaje del anillo en el núcleo se efectúa rotando el anillo respecto del núcleo que permanece unido fijamente a la tabla de snowboard. La rotación del anillo respecto del núcleo está limitada por el contacto de las pestañas del núcleo sobre las guías del anillo, de este modo el ensamblaje se ha completado cuando las guías del anillo hacen tope contra las pestañas del núcleo. En este momento no es posible seguir rotando el anillo respecto del núcleo.

Este tercer cálculo se representa mediante el efecto de una caída vertical con la tabla de snowboard sobre un montículo situado en el extremo de la tabla, como el último análisis del caso anterior, pero en esta ocasión con la tabla formando un ángulo de 90 grados respecto del suelo aplicados sobre su eje longitudinal (ilustración 39).

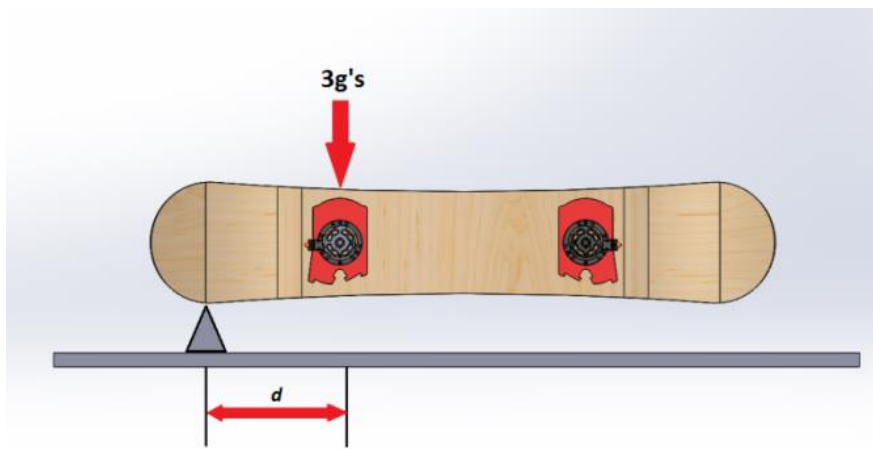


Ilustración 39

En esta simulación se representa el esfuerzo que supone un momento torsor aplicado sobre los tres orificios del anillo, que sirven para ensamblar el anillo del mecanismo de desconexión a la fijación mediante el uso de pernos. Este momento actúa en sentido horario, de forma que genere una torsión del anillo frente al núcleo que permanece fijo, creando así presión en el conjunto de las pestañas y las guías. A diferencia del caso anterior, donde el ángulo α formado entre la tabla de snowboard y la superficie tiene relación con el ángulo de incidencia de la carga distribuida, así como este ángulo α implica que varíe la distancia desde el punto de contacto de la tabla con la superficie y por tanto la magnitud del momento flector, en este

caso no ocurre del mismo modo. El ángulo α solo provoca que varíe la magnitud del momento torsor M_t . Por este motivo se va a realizar el análisis para el caso más desfavorable, en que el ángulo α es cero y por tanto la distancia d es máxima y por lo tanto la magnitud del momento torsor M_t , 857 N·m. De este modo se ejerce un momento torsor de sentido horario resultado de multiplicar la fuerza vertical F con sentido negativo por la distancia d desde la fijación al punto de contacto entre la tabla y el montículo y aplicado en los orificios para los tornillos (ilustración 40).

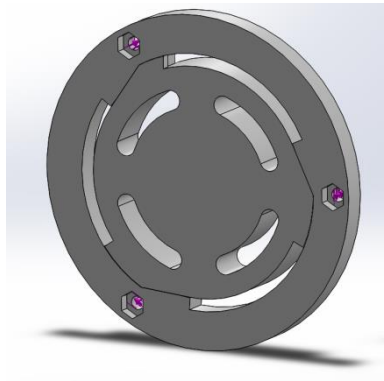


Ilustración 40

7.3. Fatiga

Anteriormente se ha analizado el mecanismo de desconexión con el objetivo de mostrar cómo responde frente a las diferentes combinaciones de cargas que se ha delimitado para simular el efecto del aterrizaje de un salto. Todas las cargas aplicadas en estos análisis son estáticas, es decir, simulan el efecto de un salto de forma discreta. Sin embargo durante la práctica del snowboard este tipo de impactos no se producen en una ocasión aislada, sino que, dependiendo del uso que le dé el deportista, puede que ocurra de forma frecuente. Por lo tanto se va a simular la aplicación de las cargas de los casos anteriores de una forma repetida, cíclica. Este análisis se denomina análisis de fatiga.

Conocer cómo responde el mecanismo ante este escenario cíclico también es de gran importancia, pues este tipo de aplicación de tensiones, en que se carga y descarga repetidamente el modelo, incluso cuando las tensiones inducidas son considerablemente inferiores a los límites de tensión críticos para cargas estáticas, debilitan los objetos a lo largo del tiempo. Este fenómeno es conocido como fatiga y se estudia mediante el análisis de fatiga de *SolidWorks*.

En este análisis se busca conocer si los puntos de concentración tensiones que se han observado en los análisis carga estática, por la repetición de estas cargas llegan a al punto de fluencia y se generan grietas microscópicas. La existencia de estas grietas podría provocar la fractura de esta pieza, pues su tamaño aumentará gradualmente con cada ciclo de esfuerzo a lo largo de los planos normales a la tensión máxima de tracción. Esto significa que en cada ciclo disminuye la sección resistente del material donde están siendo aplicadas las tensiones, hasta que esta sección no es capaz de soportar el esfuerzo, provocando que se rompa de manera súbita produciendo una fractura frágil.

SolidWorks permite estudiar el fallo por fatiga mediante el método de vida-tensión, modelo adecuado para el análisis de diseños de piezas que van a ser sometidas a regímenes de un número elevado de ciclos, en que la vida de la pieza es mayor de mil. Para realizar este análisis las tensiones que se desean aplicar han de ser conocidas.

La resistencia a la fatiga se define como la tensión en la que ocurre el fallo por fatiga tras cierto número de ciclos. Esta se determina aplicando distintos los niveles de tensión cíclica y midiendo el número de ciclos hasta el fallo. Representando gráficamente la amplitud de estos niveles de tensión cíclica, S , en el eje vertical, frente al número de ciclos hasta el fallo, N , en el eje horizontal, se obtiene la curva típica S-N (ilustración 41).

En el análisis a fatiga las muestras se someten a niveles de tensión de magnitud decreciente hasta que se determina la tensión para la que no aparece ningún fallo en el modelo tras un número de ciclos máximo de aplicación (habitualmente unos 10 millones de ciclos). Se dice que la muestra tiene una vida infinita para las cargas de magnitud inferior a esta.

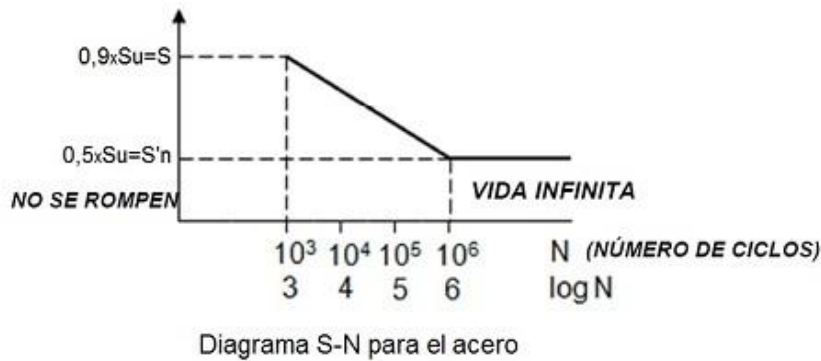


Ilustración 41

Como anteriormente se ha explicado, ha sido necesario modelizar el material ya que este no se encontraba disponible en la biblioteca de materiales del programa *SolidWorks*. Del mismo modo ha ocurrido con la curva S-N de este material. Esta herramienta informática tiene una opción mediante la cual puede obtener la curva S-N automáticamente basándose en las curvas S-N de acero austenítico ASME y en los módulos de elasticidad de éste material y del material deseado. Para ello divide cada valor de tensión de la curva S-N del acero austenítico ASME por el módulo de elasticidad del material ASME y lo multiplica por el módulo de elasticidad del material deseado.

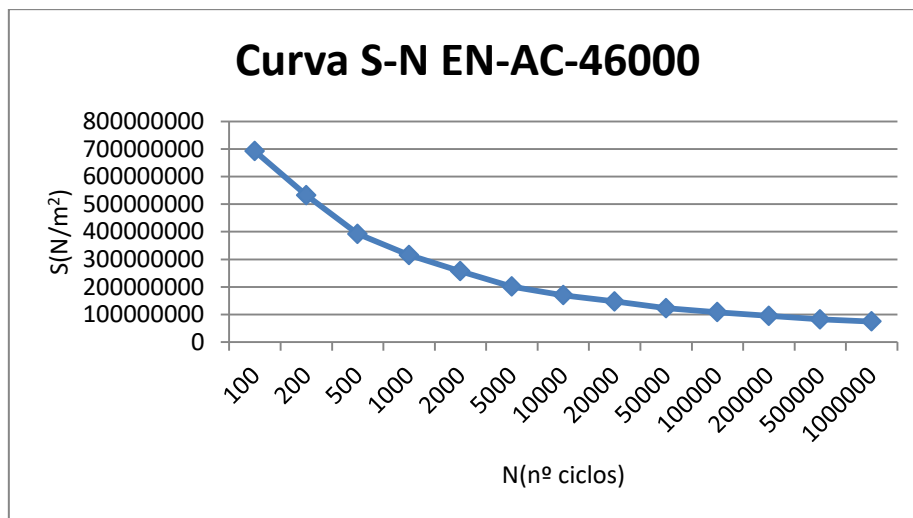


Ilustración 42

Como se puede observar en este diagrama, se toma como referencia el módulo elástico (75000000 N/m², 75MPa) para obtener el nivel de carga por debajo del cual no se produce ningún daño en la pieza (ilustración 42). Esto quiere decir que las tensiones resultantes de los análisis que aparezcan por debajo de este valor no suponen ningún problema, independientemente de los ciclos que estén aplicadas, pues está en la franja donde las condiciones son de vida infinita.

La intensidad con que se aplican estas cargas sigue el patrón de una onda senoidal, de forma que el pico superior del ciclo de aplicación está definido por el valor máximo de las tensiones alcanzadas en ese análisis y el pico inferior del ciclo de aplicación está definido por cero. De forma que la magnitud de la carga varía senoidalmente entre cero y el valor de la tensión máxima (ilustración 43).

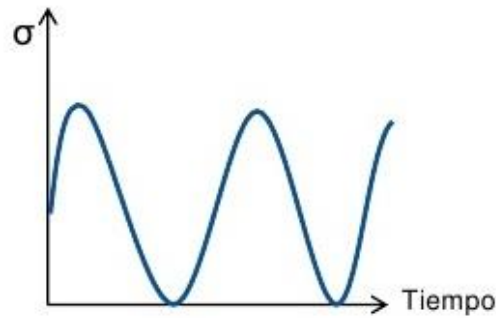


Ilustración 43

Las cargas dinámicas se aplican siguiendo este método en dos casos: en primer lugar cuando la carga es vertical y en segundo lugar cuando la carga es inclinada y se aplica un momento torsor. La justificación de seguir este método es que no tiene sentido aplicar una carga vertical de signo contrario, positivo en el eje Y, pues en un impacto la carga principal que se quiere representar solo se ejerce en un sentido. Del mismo modo ocurre en la simulación en que se aplica el momento torsor, solo actúa en el sentido horario, generando una presión en las zonas de contacto entre el anillo y el núcleo. Si este momento actuara en sentido antihorario no tendría lugar este contacto, pues es la dirección en que se debe rotar el anillo para llevar a cabo el desensamblaje del mecanismo. Por este motivo no tiene sentido ejercer el momento torsor en esta dirección.

Por contrario, no ocurre así en la simulación en que se aplica un momento flector en el mecanismo de desconexión. En este análisis si se podrá aplicar la carga haciendo coincidir el pico del ciclo de la onda senoidal con la el valor de la tensión máxima y hacer coincidir el valor del pico inferior de la onda senoidal con el valor de la tensión máxima pero con signo negativo (ilustración 44). Esto simulara un movimiento momento flector en las dos direcciones, horario y antihorario.

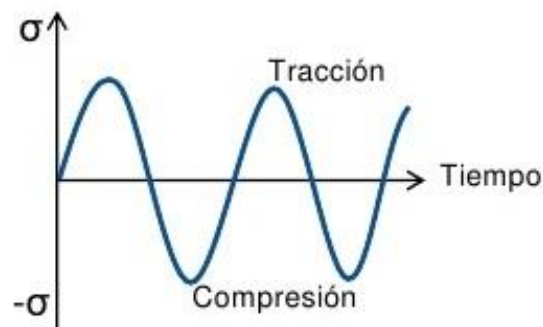


Ilustración 44

8. Resultados

En los siguientes apartados se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas de los anteriores casos. El software *SolidWorks* se basa en la teoría de von Mises-Hencky en lo que a tensiones se refiere y por tanto emplea el criterio de máxima tensión de von Mises en sus análisis. La teoría de von Mises-Hencky también es conocida como teoría de la energía de distorsión máxima. La tensión de von Mises, referida a las tensiones principales s_1 , s_2 y s_3 , se expresa de la siguiente manera:

$$S_{vonMises} = \{[(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_1 - s_3)^2]/2\}^{(1/2)}$$

Según esta teoría un material dúctil que ha alcanzado una tensión de von Mises igual a una tensión límite sufre una distorsión elástica. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como tensión límite. Sin embargo, el software le permite utilizar la carga de rotura o establecer su propia tensión límite.

$$S_{vonMises} \geq S_{limite}$$

8.1. Primer caso

En este primer estudio se analiza el efecto que produce el efecto de una caída vertical sobre una superficie plana. Para ello se realiza un análisis lineal aplicando la fuerza F de $3g$'s de forma vertical paralela al eje Y con sentido negativo distribuida de forma uniforme sobre la superficie superior del núcleo simulando la presión homogénea que ejerce la bota sobre esta pieza.

Como se puede concluir de los resultados obtenidos, esta pieza no sufre daños debidos a la aplicación de este caso de carga, pues en ninguna zona se alcanza un estado de tensión que supere el límite elástico del material (140MPa) y por tanto tampoco se supera el límite de tracción (240 MPa) que indica el nivel de tensión máxima que se le puede aplicar a un material antes de que se rompa. En las zonas donde el nivel de carga es máxima para este análisis los valores de la tensión que se alcanzan son de aproximadamente 5.5 MPa (ilustración 45).

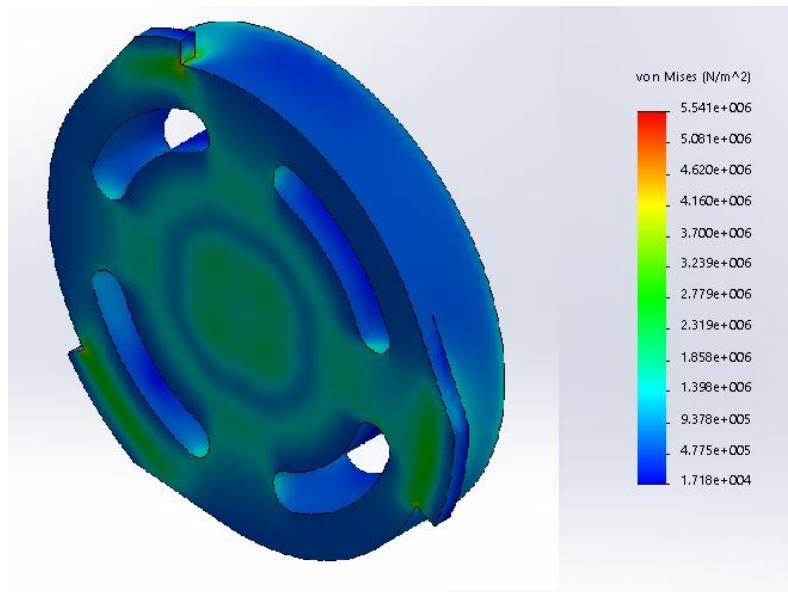


Ilustración 45

El diagrama de tensiones nos permite visualizar las zonas donde se han concentrado las tensiones según el criterio de von Mises (ilustración 46). En este diagrama se pueden distinguir claramente tres zonas donde existen concentraciones de tensiones: la aligeración, el nervado y las pestañas. La zona donde más tensiones se concentran corresponde a la transición entre la aligeración y la geometría de refuerzo, esto indica que con el objetivo de aligerar esta pieza mediante el vaciado practicado en la zona inferior, la extracción de material ha debilitado la geometría.

Con el objetivo de reforzar esta aligeración el diseño del núcleo incluye unos nervios que sirven para absorber las tensiones de esa zona. En el diagrama se puede apreciar el funcionamiento de nervado en la zona donde se ha extraído material. Este refuerzo absorbe parte de las tensiones pero se puede apreciar como en los cambios de sección se concentran tensiones.

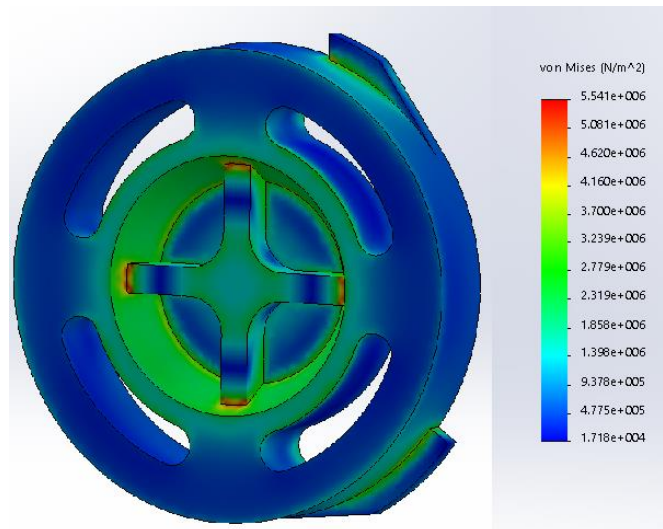


Ilustración 46

Finalmente, las pestañas también concentran las tensiones en sus cambios de sección, donde estos cambios son más bruscos, como es el final del filo donde existen ángulos bastante agudos. También se concentran tensiones, aunque de menor magnitud, en la zona de transición entre la geometría del núcleo y la pestaña, por donde se flexiona la pestaña en la dirección de la carga, tanto en la zona superior donde sufre tracción, como la inferior donde sufre compresión.

En cuanto a las deformaciones, observando el diagrama de desplazamientos (ilustración 47), se puede comprobar cómo estas deformaciones están ubicadas en las áreas donde hay acumulación de tensiones, en concordancia con el diagrama de tensiones. Las deformaciones máximas están situadas en el centro del núcleo, donde está practicada la aligeración y el valor es de $1.122e^{-3}$ mm.

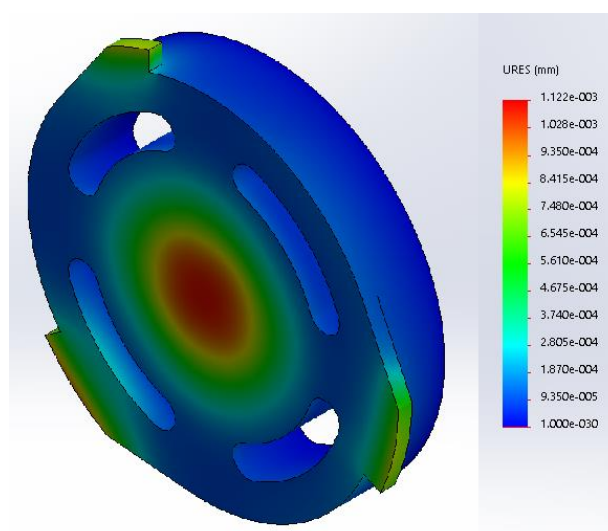


Ilustración 47

8.2. Segundo caso

El segundo caso representa el efecto de una caída vertical sobre una superficie plana, pero en esta ocasión la tabla de snowboard forma un ángulo α respecto del suelo. Por este motivo en el impacto no contacta la base de la tabla con el firme sino que lo hace el canto de la tabla. Como anteriormente se ha mencionado, en este caso se realizan análisis con α igual a 45, 30, 15 y 0 grados.

De nuevo, el mecanismo de desconexión es capaz de soportar las cargas que supone este caso para todas las variantes de ángulos α . Esto se puede afirmar observando los resultados de los análisis, pues en ninguno de estos casos el mecanismo presenta áreas donde las tensiones han alcanzado el límite de tracción (240MPa) y tampoco el límite elástico (140MPa). Esto significa que la combinación de esfuerzos formados por la carga inclinada y el momento flector no provoca daños y la deformación debida a estas cargas retomara su geometría original al retirar las cargas.

Como se puede observar en los diagramas de las tensiones de los cuatro casos, el patrón de las zonas de concentración de cargas es el mismo y tan solo varía la magnitud de las tensiones de forma proporcional a la magnitud de las cargas aplicadas. Estas áreas más cargadas son próximas a las resultantes del caso de la carga vertical. Se tratan del vaciado para el aligeramiento, la geometría de refuerzo de este vaciado y principalmente la pestaña superior del núcleo. En menor grado también se puede observar que existe concentración de tensiones en las pestañas inferiores del anillo.

La primera simulación se realiza con las condiciones menos desfavorables, dadas por el ángulo α de 45 grados. En este escenario las cargas están inclinadas en mayor grado y la distancia d donde se aplica la carga es la menor, creando un momento flector menor. El resultado de esta combinación son tensiones cuyo mayor valor alcanzado es de 52 MPa (ilustración 48).

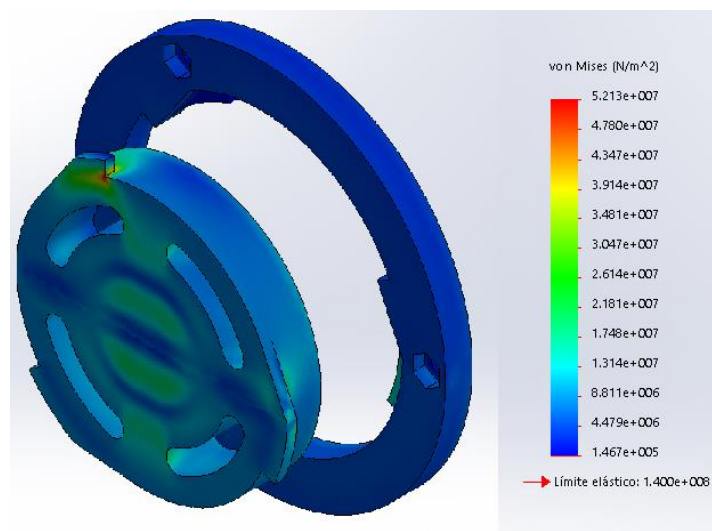


Ilustración 48

La segunda simulación se realiza disminuyendo el ángulo de la carga inclinada hasta alcanzar los 30 grados y aumentando la magnitud del momento flector, debido al aumento de la longitud de la distancia d desde el punto de contacto entre la tabla de snowboard hasta el punto de aplicación de la carga. Se puede observar como las zonas afectadas son las mismas pero la magnitud de las tensiones resultantes son mayores que en el caso anterior, así como el valor de la tensión máxima alcanzada, 65MPa (ilustración 49).

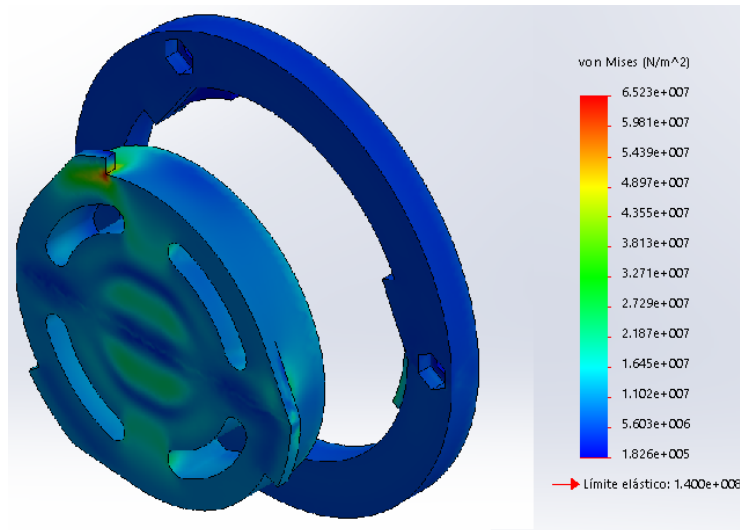


Ilustración 49

La tercera simulación se realiza llevando a cabo el mismo proceso que en la variante anterior, disminuyendo ángulo que forma la carga con la superficie superior del mecanismo de desconexión, hasta alcanzar en esta ocasión los 15 grados y aumentando la magnitud del momento flector. Las áreas cargadas siguen el mismo patrón que las variantes anteriores pero con magnitudes superiores. El punto de mayor tensión alcanza los 74MPa en esta ocasión (ilustración 50).

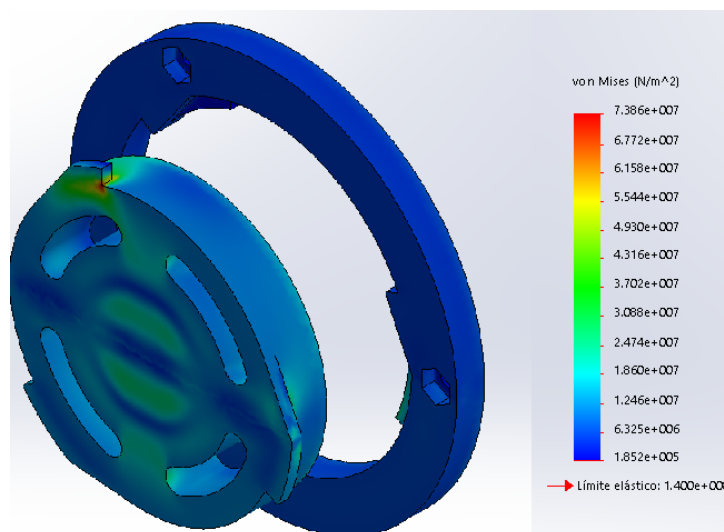


Ilustración 50

Finalmente la última simulación donde el ángulo α formado entre la tabla de snowboard y la superficie de aterrizaje es 0 grados se realiza aplicando la carga totalmente perpendicular a las caras de aplicación, las superficies superiores del anillo y el núcleo. De este modo se obtiene la distancia d máxima y por tanto el momento flector máximo así como el mayor valor en las tensiones resultantes, 78MPa (ilustración 51).

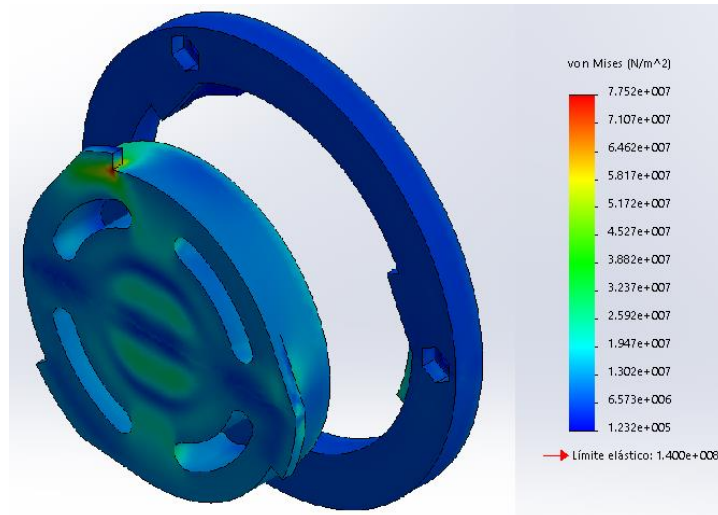


Ilustración 51

Como anteriormente se ha mencionado las zonas de concentración de tensiones son las mismas para las cuatro simulaciones, tan solo varían la magnitud de las tensiones. Se puede observar que la zona donde estas tensiones son mayores son los cambios de sección formados por la pestaña superior con la geometría cilíndrica del núcleo. Esta pestaña es la más afectada debido a la dirección de la carga inclinada. Esta carga provoca que la pestaña se presione contra el anillo. A su vez la aplicación de la combinación del momento flector y la carga distribuida sobre esta pestaña generan una flexión en la dirección de aplicación de las cargas, creando un área de tensiones a tracción en la cara superior de la pestaña donde se conecta con el núcleo, y un área de tensión a compresión en la zona de conexión inferior entre la pestaña y el núcleo (ilustración 52).

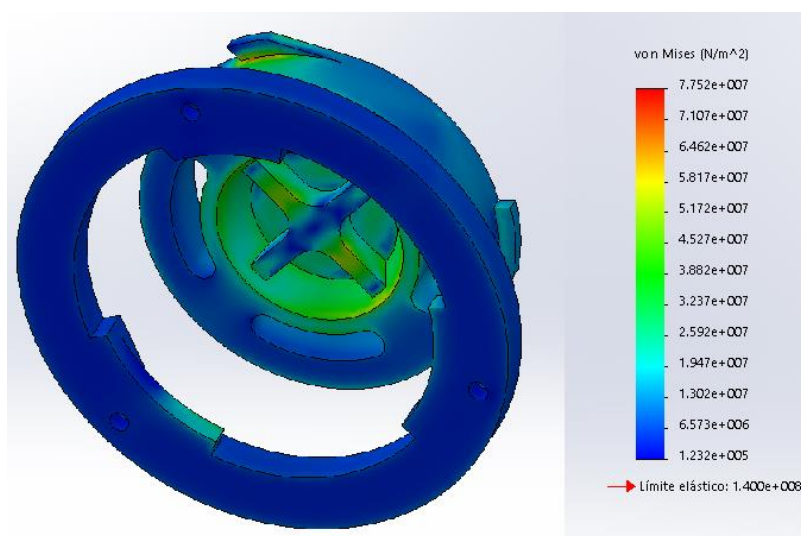


Ilustración 52

También el vaciado inferior recibe gran parte de la carga, pues se puede observar en el diagrama la concentración de tensiones que aparece en esta zona y el refuerzo de esta zona. Como es de esperar, los brazos longitudinales del refuerzo están más cargados que los transversales debido a la dirección del momento flector (ilustración 53).

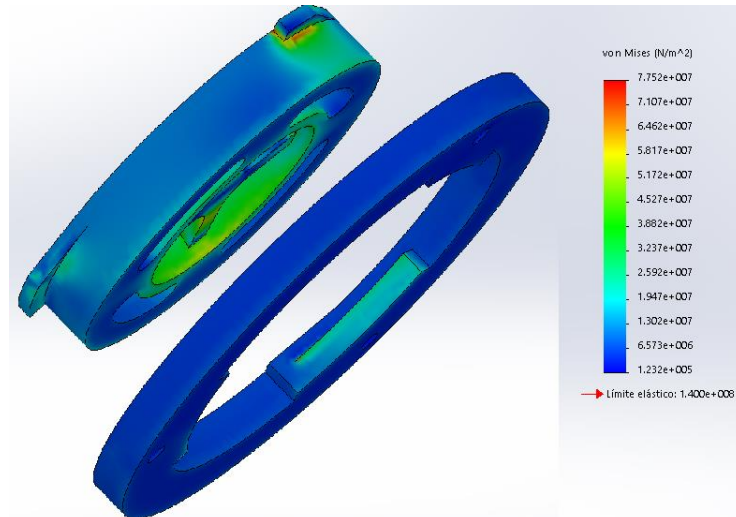


Ilustración 53

Finalmente se puede apreciar otro efecto causado por el momento flector, la presión resultante en las áreas de contacto entre las guías del anillo y las respectivas pestañas situadas en el núcleo, provocando esto que se generen las tensiones mostradas en el diagrama (ilustración 54). Los valores alcanzados en estas áreas, del orden de los 30 MPa, provocarán leves deformaciones temporales que volverán a su geometría original al cesar la carga, ya que las magnitudes de estas cargas no alcanzan valores superiores al límite elástico (140 MPa).

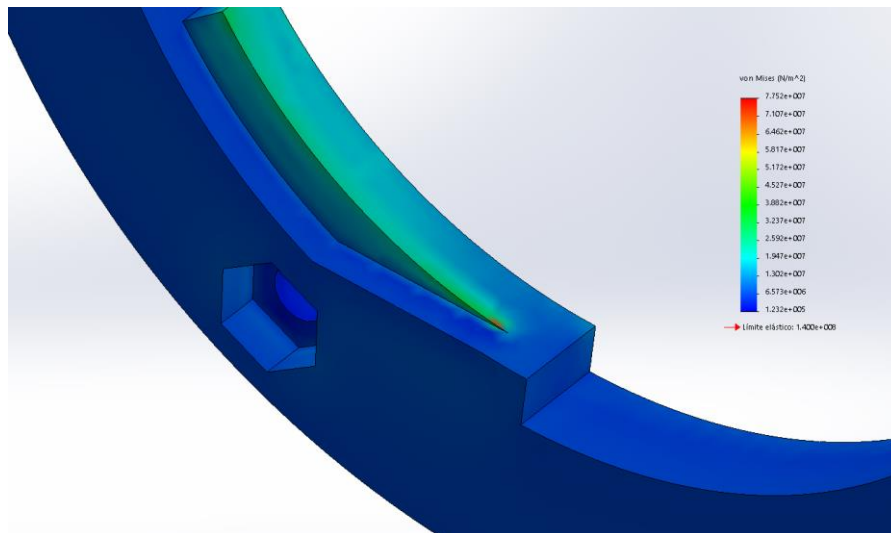


Ilustración 54

Como se puede observar en el diagrama de desplazamientos, la distribución de las áreas que sufren deformaciones está relacionada con las zonas donde se acumulan tensiones, como es el caso de la pestaña superior del núcleo así como la zona central de este. También sufren leves deformaciones las pestañas inferiores del anillo. El valor máximo de la deformación es de 1.645×10^{-4} mm (ilustración 55).

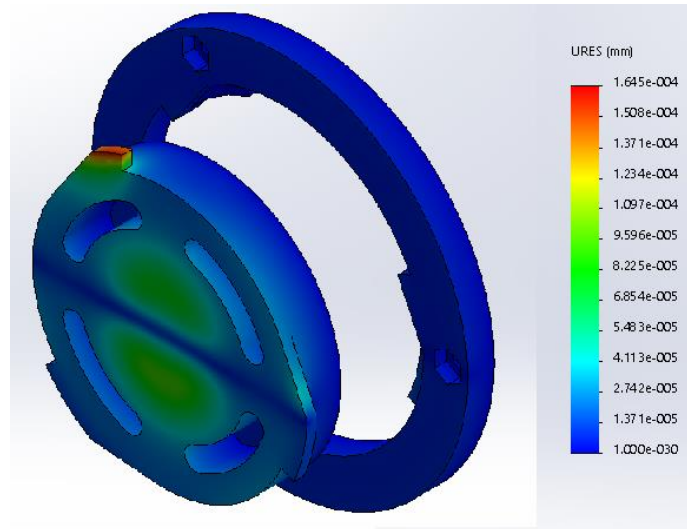


Ilustración 55

8.3. Tercer caso

Este tercer cálculo representa el efecto de una caída vertical con la tabla de snowboard sobre un montículo situado en el extremo de la tabla, como el último análisis del caso anterior, pero en esta ocasión con la tabla formando un ángulo de 90 grados respecto del suelo aplicados sobre su eje longitudinal. Este caso es el más desfavorable de todos los anteriores, como se observa en los resultados del análisis (ilustración 56). Estos resultados indican que en las zonas que contactan entre el anillo y el núcleo debido a esta carga se alcanzan valores superiores a la carga de rotura (240MPa). Esto significa que en estas zonas se provocarían daños irreversibles.

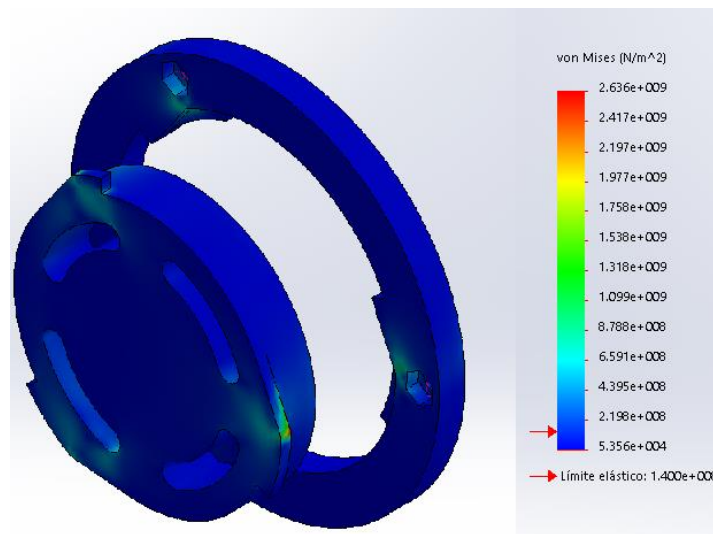


Ilustración 56

Como en los casos anteriores, las condiciones en que se han realizado estos análisis son las más desfavorables, convirtiéndose así en unos análisis considerablemente conservadores. En estas condiciones se especificaba que tanto las extremidades del usuario, como la tabla de snowboard y la superficie de aterrizaje, idealmente nieve, no iban a absorber energía del impacto, convirtiéndose en elementos totalmente rígidos. Otra condición indica que la carga de todo el conjunto del usuario y el material necesario para practicar esta actividad era aplicada en un único mecanismo de desconexión. A estas condiciones se debe añadir que la geometría del producto final del mecanismo de desconexión contiene redondeos y radios de acuerdo que sirven para facilitar el proceso de extracción de los moldes del proceso de fabricación y a su vez dar un aspecto visual más estético. Esta solución geométrica al mismo tiempo tiene la virtud de disminuir la concentración de tensiones en estas zonas de contacto entre anillo y el núcleo.

Teniendo estas condiciones en cuenta se ha decidido realizar el análisis del mismo caso pero disminuyendo la magnitud de las cargas. De esta forma el análisis que se ha realizado es menos conservador pero los resultados obtenidos están enmarcados en una escala que permiten ser analizados en las mismas condiciones que los casos anteriores.

Una vez modificada la magnitud del momento (10% del original) y realizado el análisis se puede observar el resultado. En esta ocasión el valor de tensión máxima alcanzada es de aproximadamente 400 MPa. Este valor es superior al límite elástico y la carga de rotura lo cual significa que los daños que se produjeran serían irreversibles.

Se puede observar en el diagrama de tensiones que las zonas afectadas por los valores máximos están situados en los puntos de contacto entre el anillo y el núcleo ocurridos al presionar el anillo, mediante el momento torsor horario, contra el núcleo sujeto fijamente (ilustración 57).

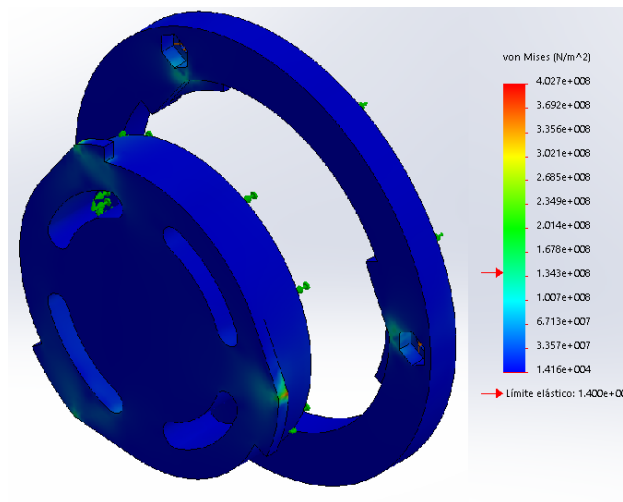


Ilustración 57

Aun siendo un análisis con condiciones menos desfavorables que las previas se siguen encontrando zonas donde los niveles de tensión alcanzados provocarían deformaciones permanentes incluso fracturas. Estas zonas se pueden observar en la siguiente ilustración, donde se muestran las áreas donde se han alcanzado tensiones cuyo valor es superior al de la carga de rotura (240MPa). Estas áreas corresponden con el vértice de la geometría, siendo por lo tanto muy localizadas y de un tamaño relativamente pequeño (ilustración 58).

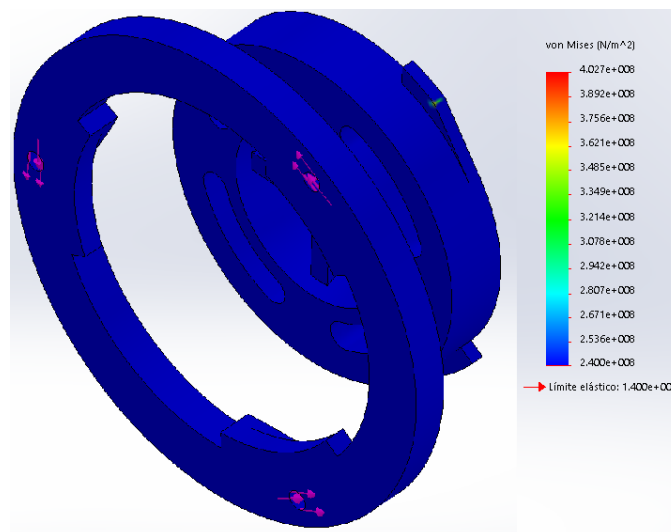


Ilustración 58

El siguiente diagrama se muestra las zonas donde los valores de la tensión son menores a la carga de rotura (240MPa). Las áreas coloreadas sufrirían deformaciones permanentes (ilustración 59).

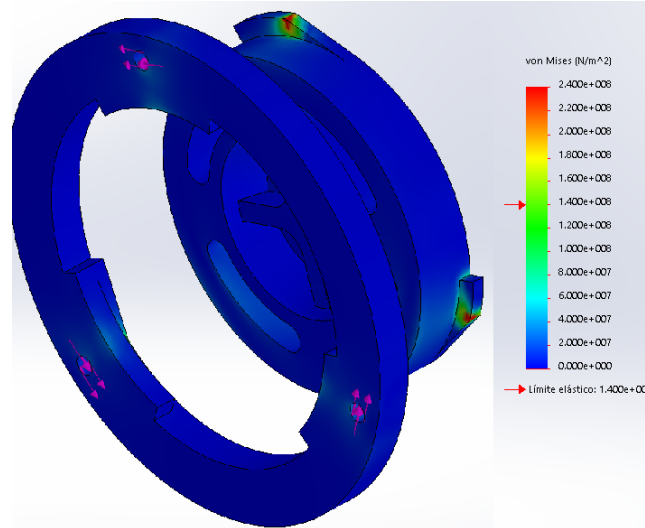


Ilustración 59

Finalmente en el siguiente diagrama se muestran coloreadas las áreas en que los niveles de tensión no alcanzan el límite elástico (140MPa) de forma que las deformaciones ocasionadas volverían a su geometría original al cesar la carga (ilustración 60).

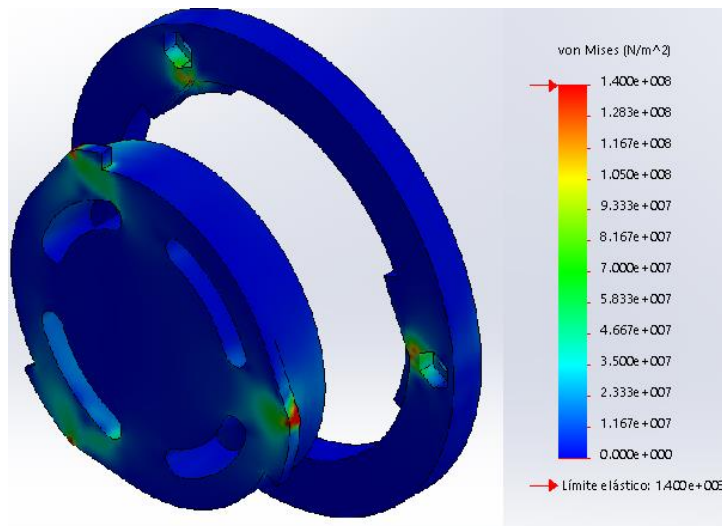


Ilustración 60

8.4. Fatiga

Del mismo modo que se han revisado los resultados de los análisis donde la aplicación de las cargas es estática, se procede a revisar los resultados del postproceso que emplea la herramienta informática *SolidWorks* para estudiar la fatiga en el mecanismo de desconexión a través de la aplicación cíclica de las cargas anteriormente citadas hasta alcanzar el computo de $10e+6$ repeticiones, cifra que representa la vida infinita de la pieza.

Para poner en contexto la magnitud de esta cifra, si los $10e^6$ ciclos de aplicación de carga representaran $10e^6$ saltos, un usuario profesional que practicara snowboard los 365 días del año durante 24h y si se estimara agotar la vida útil del mecanismo de desconexión en 4 años, estimación de la duración aproximada que se le da a estos productos, el usuario debería realizar 28 saltos a la hora (es decir, prácticamente un salto de 3g's cada 2 minutos), durante 24h los 365 días del año durante esos 4 años.

Otra perspectiva, un usuario amateur que practica snowboard todos los fines de semana durante la temporada de invierno, supongamos medio año y por tanto 26 semanas. Esto significa que practica 52 días al año. Se hace una estimación de que realiza un salto de las características que se definen en este trabajo, 3g's, cada 10 minutos (6 saltos cada hora) y las estaciones permanecen abiertas 8h al día. Esto supone 48 saltos al día, durante los 52 días que practica, un total de 2496 saltos que podemos aproximar a 2500. Si se divide el número de ciclos de vida infinita, $10e^6$, entre los 2500 saltos a este usuario amateur necesitaría practicar esta actividad durante 400 años para alcanzar esa cifra. Por lo tanto podemos verificar la estimación de que un número de ciclos mayor que $10e^6$ representa la vida infinita de la pieza.

Como se puede observar en el resultado de los análisis estáticos, ninguno de los casos que representan el efecto de una caída vertical provocan ningún daño en el mecanismo de desconexión, pues los niveles de tensión alcanzados son inferiores al límite elástico y por tanto a la tensión última de rotura, con la excepción del caso donde se aplica un momento torsor en que si se supera este valor. Así mismo se puede observar, mediante los diagramas, los resultados de los análisis de fatiga en que se aplican los casos anteriores de carga de forma cíclica. El mecanismo de desconexión es capaz de superar la aplicación de estas cargas un número de ciclos $N > 10e^6$, es decir, no sufre daños por fatiga. Para estos niveles de tensión se puede suponer que puede alcanzar una vida infinita del mecanismo. Esto quiere decir que el número de ciclos de tensión necesarios para causar un fallo es prácticamente infinito.

Por este motivo y para facilitar la observación de las zonas afectadas por la fatiga, se ha empleado el diagrama de factor de carga pues tanto en el diagrama de daño como el de vida no se puede apreciar con claridad las zonas afectadas, al ser mínimas. Sin embargo el diagrama de factor de carga muestra las zonas de la pieza que estarían afectadas por fatiga si se aplicara un factor de mayoración en las cargas aplicadas.

Como se puede apreciar en el diagrama de factor de carga del análisis por fatiga de la carga vertical, sería necesario aplicar una carga vertical aproximadamente cinco veces superior para provocar daños por fatiga (ilustración 61). Es decir, daños que debilitaran la pieza durante la aplicación de esta carga $10e^6$ ciclos.

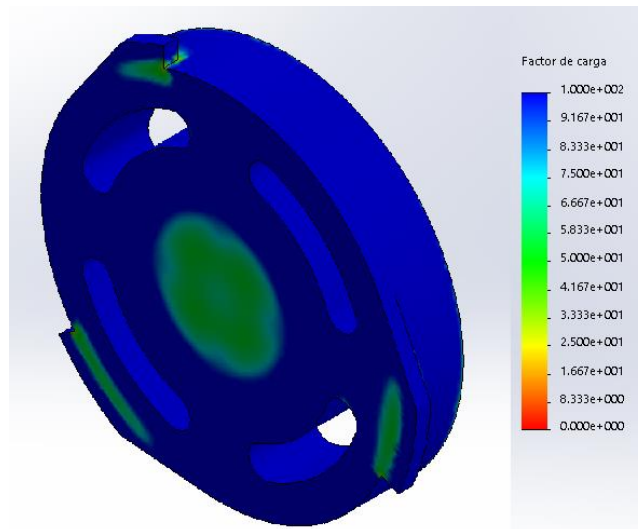


Ilustración 61

Del mismo modo que en el caso de la aplicación de la carga vertical de forma estática, la fatiga de esta pieza afecta las mismas zonas, señaladas en verde: las pestañas, la aligeración y el refuerzo de la aligeración (ilustración 62).

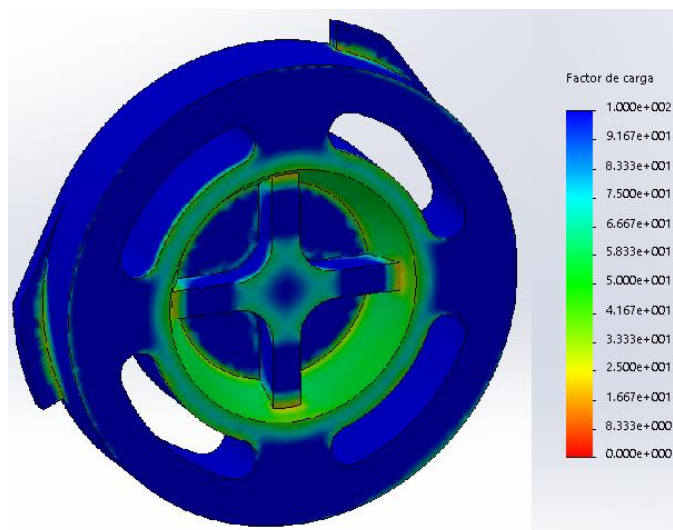


Ilustración 62

También se puede observar como los cambios de sección entre la aligeración y el refuerzo y también entre las pestañas y la geometría cilíndrica del núcleo están marcados ligeramente en rojo. Esto indica que serían las únicas zonas que se verían ligeramente afectadas por el análisis a fatiga con la carga original, sin haber sido ésta mayorada.

Para el segundo caso, en que la caída genera un momento flector y la carga distribuida se aplica de forma inclinada, empleando el diagrama de factor de carga se puede observar que sería necesario que las cargas del caso fueran de una magnitud en una escala cinco veces superior, del mismo modo que ocurre en el caso de la carga vertical, para provocar daños por fatiga (ilustración 63).

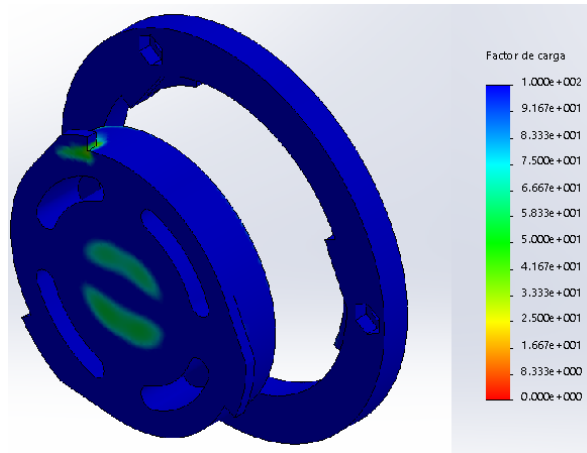


Ilustración 63

Así mismo se puede apreciar que las zonas afectadas, coloreadas en verde, concuerdan con las áreas de concentración de tensiones cuando la aplicación la carga inclinada y el momento flector se realiza de forma estática: la pestaña superior, las paredes y los brazos de los nervios superior e inferior del núcleo así como levemente las caras superiores de las guías inferiores del anillo (ilustración 64).

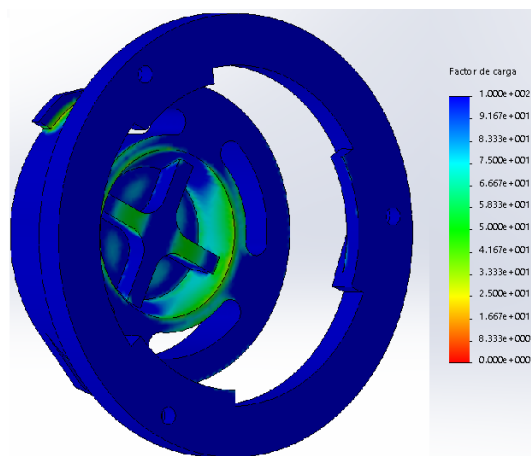


Ilustración 64

Finalmente cabe recordar que los resultados del tercer caso, en que se aplica el momento torsor, alcanzan valores de las tensiones superiores a las cargas de rotura provocando en ciertas áreas daños irreversibles. Por este motivo no tiene relevancia realizar un análisis en que se aplican estas cargas de forma repetida, pues tras una única aplicación de la carga las piezas ya sufren daños.

9. Propuesta de mejora del diseño

La propuesta de mejora podría haber estado relacionada con el ámbito del diseño geométrico del producto, como podría ser el refuerzo de ciertas zonas donde las simulaciones han mostrado que sufren mayores tensiones o el aligeramiento de áreas donde se haya observado en el resultado de los análisis que las tensiones alcanzadas no son críticas para la integridad de la pieza y por tanto se pueda retirar material, tal vez excesivo. Sin embargo, tras recibir la sugerencia de la empresa productora SnabbSnö, el campo donde se realiza la optimización del diseño original es en el uso de un material diferente para la construcción de este producto.

Originalmente el mecanismo de desconexión está fabricado en la aleación de aluminio EN AC-46000. Tras los análisis realizados en este trabajo se puede concluir que las características mecánicas de esta aleación cumplen con creces las necesidades que requiere la labor que desempeña. Es por este motivo que se ha optado por utilizar un material de otra naturaleza, como es la poliamida. Actualmente hay una clara tendencia en que las empresas productoras de componentes del snowboard, como son las fijaciones, están fabricando sus artículos mediante el uso de materiales plásticos, más concretamente Nilón. De este modo se consigue utilizar procesos de producción más sencillos y económicos. A su vez la densidad de este material es inferior a la de la aleación de aluminio, con lo que habitualmente se consigue un producto final más ligero.

Por este motivo se ha decidido realizar las mismas simulaciones de la misma geometría, el mecanismo de desconexión, pero empleando un material de estas características. Más concretamente Nilón 66, que recibe este nombre por estar compuesto de dos monómeros formados por seis átomos de carbono cada uno. A su vez se le ha realizado la adición de un 30% fibra de vidrio a este Nilón, con lo que se consigue un importante aumento de la resistencia, de la rigidez, de las temperaturas de distorsión por calor, de la resistencia a la abrasión así como de la estabilidad dimensional. Por estos motivos se ha creído oportuno emplear este material como sustituto de la aleación de aluminio actualmente utilizada para fabricar el mecanismo de desconexión. Este material recibe la denominación de PA66-30GF.

Tabla 4

	EN AC-46000	PA66-30GF
Módulo elástico (N/mm ²)	75000	9700
Coefficiente de Poisson	0.33	0.35
Módulo cortante (N/mm ²)	26900	3600
Densidad de masa (kg/m ³)	2790	1350
Límite de tracción (N/mm ²)	240	140
Límite de compresión (N/mm ²)	-	160
Límite elástico (N/mm ²)	140	150
Alargamiento en la rotura (%)	1	5
Coef. expansión térmica (/K)	2.1e-5	3,00E-05
Conductividad térmica (W/(m·K))	109	0.27
Calor específico (J/(kg·K))	850	1500

Como se puede observar según las características de los materiales, la diferencia de módulo elástico es notable, pues el módulo elástico del EN AC-46000 es aproximadamente ocho veces mayor (tabla 4). Para valores de tensión por debajo del rango del límite elástico, donde las deformaciones producidas al aplicar ésta tensión son reversibles completamente, el valor del módulo elástico se define como el cociente entre la tensión aplicada y la deformación aparecida en dicho elemento. Esto significa que en las zonas donde ciertas cargas provoquen tensiones del mismo valor a ambos materiales, siempre por debajo del límite elástico, las deformaciones resultantes en el PA66-30GF serán aproximadamente ocho veces mayores que las deformaciones en el EN AC-46000. También será mayor el alargamiento que sufre el material en el momento de la rotura en el PA66-30GF (ilustración 65).

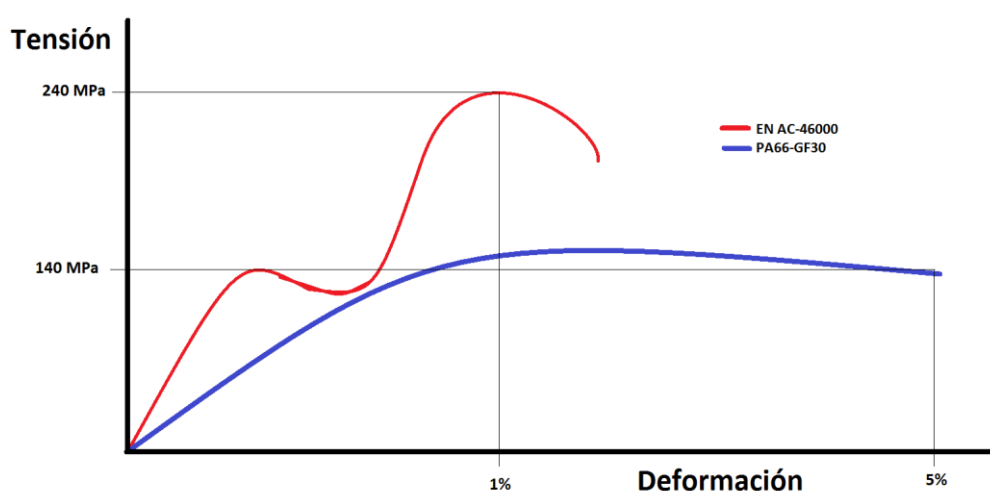


Ilustración 65

Sin embargo la densidad del PA66-30GF es aproximadamente el doble a la densidad del EN AC-46000. Esto significa que si fabricamos dos productos idénticos, con el mismo volumen, de los dos materiales, el realizado en PA66-30GF pesará aproximadamente la mitad. Esto se puede observar en el caso que nos concierne, el mecanismo de desconexión (tabla 5 y 6).

Tabla 5

EN AC-46000	Anillo	Núcleo
Masa(kg)	0.0946469	0.136117
Volumen(m ³)	3.39236e-005	4.87873e-005

Tabla 6

PA66-GF30	Anillo	Núcleo
Masa(kg)	0.0457969	0.0658629
Volumen(m ³)	3.39236e-005	4.87873e-005

El mecanismo de desconexión fabricado en la aleación de aluminio EN AC-46000 pesa 230.76g mientras que el fabricado en el polímero PA66-30GF tan solo alcanza los 111.65g. Cabe recordar que en una tabla de snowboard se emplean dos fijaciones, una para cada pie. Por lo tanto son necesarios dos mecanismos de desconexión, de modo que este ahorro de peso es más notable aun.

Tras estas reflexiones y una vez realizadas las simulaciones se procede al análisis de sus resultados. Siguiendo el mismo orden, en el primer caso que se ha realizado se aplica la carga vertical F sobre la superficie superior del núcleo y se analiza de forma lineal. Como se puede observar en el diagrama de tensiones el valor máximo de esta es similar a alcanzado con el núcleo fabricado con EN AC-46000, 5.5MPa (ilustración 66).

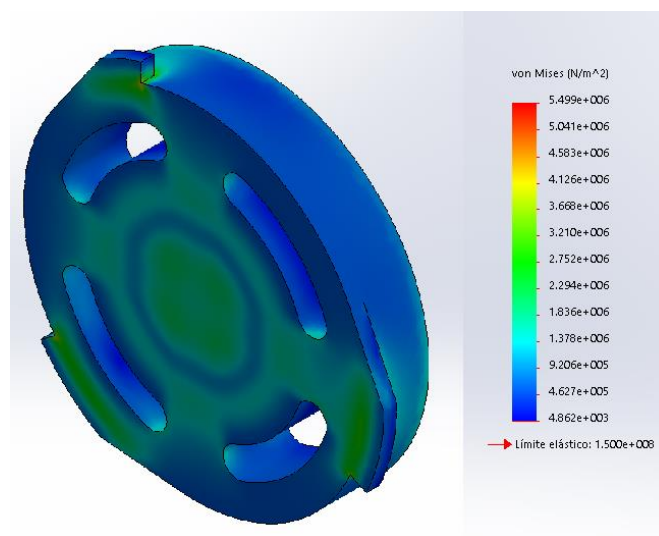


Ilustración 66

También se puede observar que las áreas donde se han acumulado las tensiones son similares a las áreas donde se acumulan las tensiones en el núcleo fabricado con EN AC-46000 encontrándose estas tensiones alrededor de las pestañas, la aligeración y el cambio de geometría donde ésta entra en contacto con el refuerzo (ilustración 67).

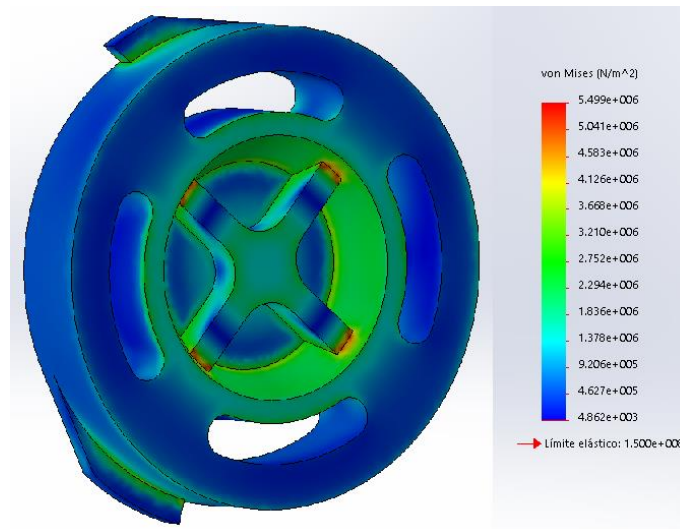


Ilustración 67

Sin embargo se puede observar, como era de esperar según el valor del módulo elástico, que la magnitud de las deformaciones es mayor, en este caso, frente al caso del núcleo fabricado en EN AC-46000. Se puede observar que el valor de la deformación máxima es de $8.570e^{-3}$ mm frente a los $1.122e^{-3}$ mm en el caso del núcleo de EN AC-46000 (ilustración 68).

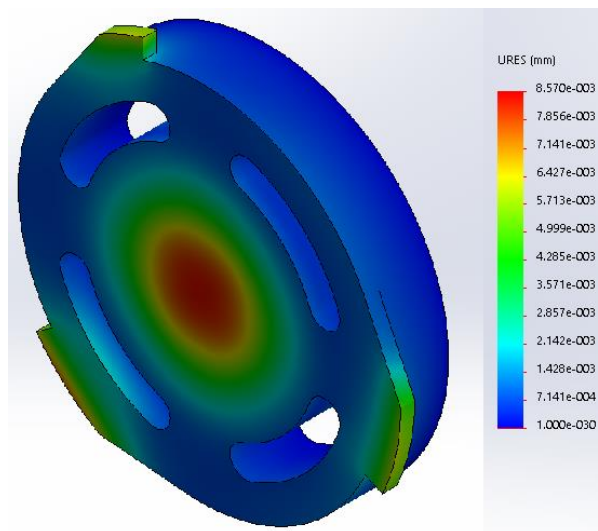


Ilustración 68

Del mismo modo que las zonas donde se acumulan las tensiones, las áreas deformadas están localizadas en los mismos lugares que en el caso del núcleo fabricado en EN AC-46000, las pestañas y el centro de la pieza donde se encuentra la aligeración (ilustración 69).

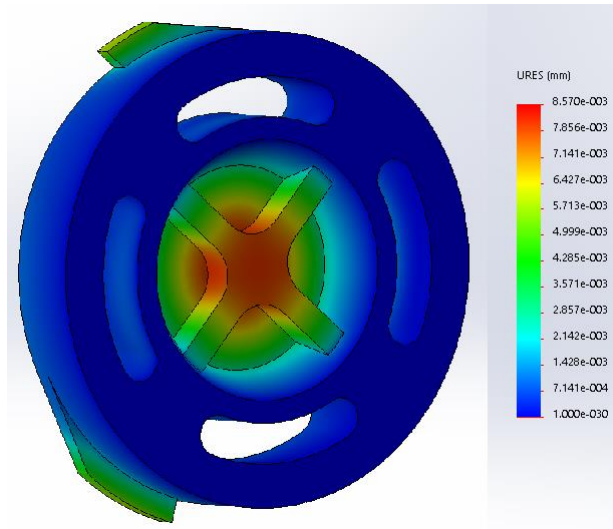


Ilustración 69

Seguidamente se analizan los resultados del segundo caso, en que se aplica un momento flector M_f en adición de una carga inclinada F . Se ha realizado únicamente el caso más desfavorable, en que α es igual a cero y por lo tanto la carga F se aplica de forma perpendicular a la superficie superior y el momento flector M_f es el máximo. Del mismo modo que en el caso anterior, de la carga vertical, el valor de la tensión máxima es próximo al obtenido en el mismo análisis del mecanismo de desconexión fabricado en EN AC-46000, 77 MPa (ilustración 70).

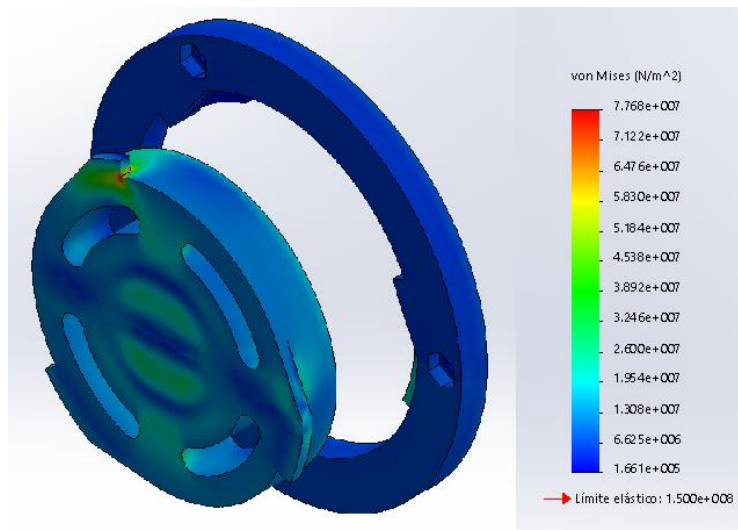


Ilustración 70

También se puede observar como las tensiones se acumulan en las mismas zonas coincidiendo con el resultado obtenido tras analizar el mecanismo de desconexión fabricado con EN AC-

46000. Estas áreas son las pestañas del núcleo, la aligeración y los nervios superior e inferior así como las guías inferiores del anillo (ilustración 71).

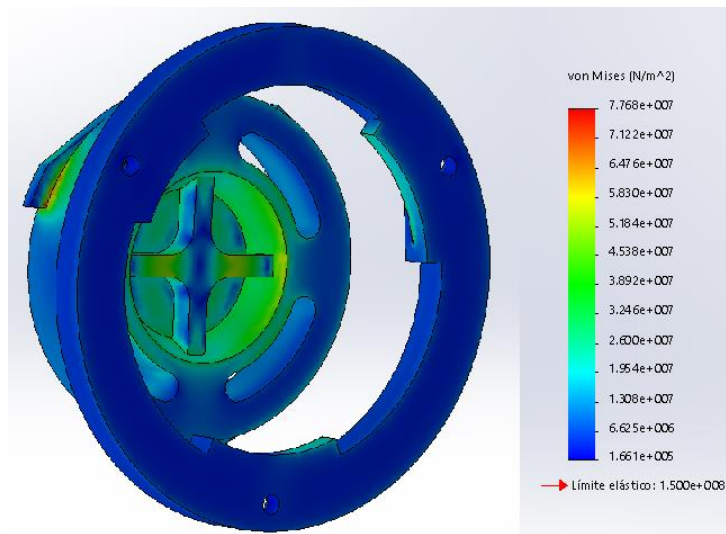


Ilustración 71

Como se puede apreciar en el diagrama donde se muestran las zonas que sufren deformaciones, el valor de la deformación máxima es de $1.267e^{-3}$ mm frente al valor máximo alcanzado en el mecanismo de desconexión fabricado en EN AC-46000, $1.645e^{-4}$ mm (ilustración 72).

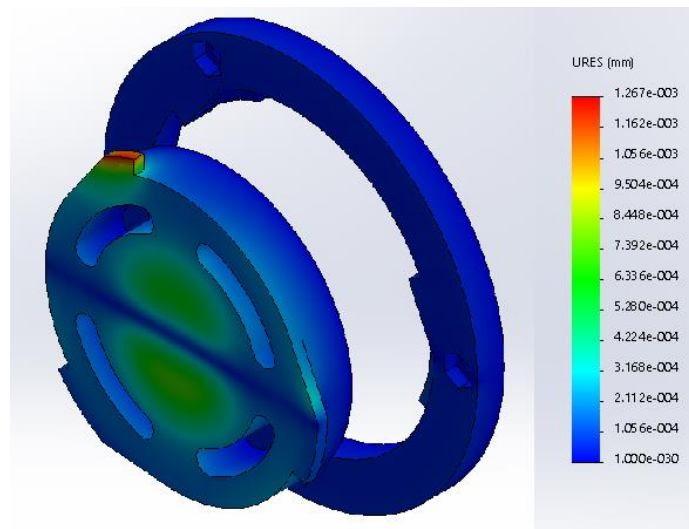


Ilustración 72

La localización estas áreas deformadas es la misma que en el caso del mecanismo de desconexión fabricado en EN AC-46000, la pestaña superior del núcleo así como la zona central donde se encuentra la aligeración y el refuerzo (ilustración 73).

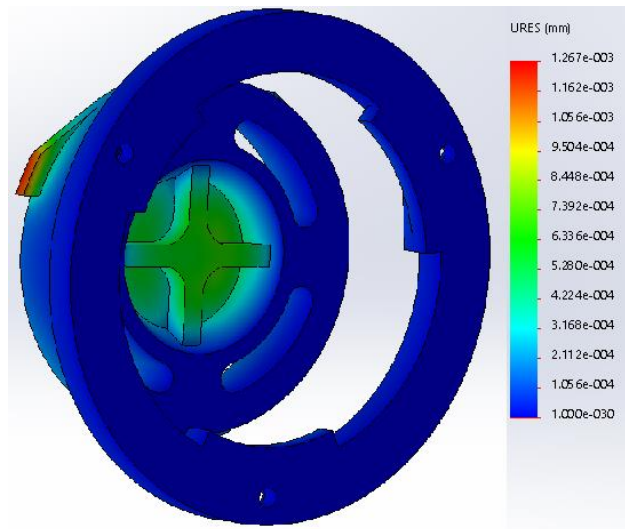


Ilustración 73

Finalmente se realiza el último caso, en que se aplica un momento torsor M_t sobre el anillo. Se puede observar, en el diagrama de tensiones, como las zonas localizadas donde se alcanzan las máximas tensiones, el valor de éstas es inferior al del caso en que el mecanismo de desconexión está fabricado con EN AC-46000, 287 MPa frente a los 400 MPa alcanzado anteriormente. Del mismo modo, las tensiones alcanzadas en estas áreas son superiores a la carga de rotura 140 MPa, lo que significa que se provocarían fracturas en estas áreas y deformaciones permanentes en todas las zonas donde se alcanzan valores de tensión que superen el límite elástico, 150 MPa (ilustración 74).

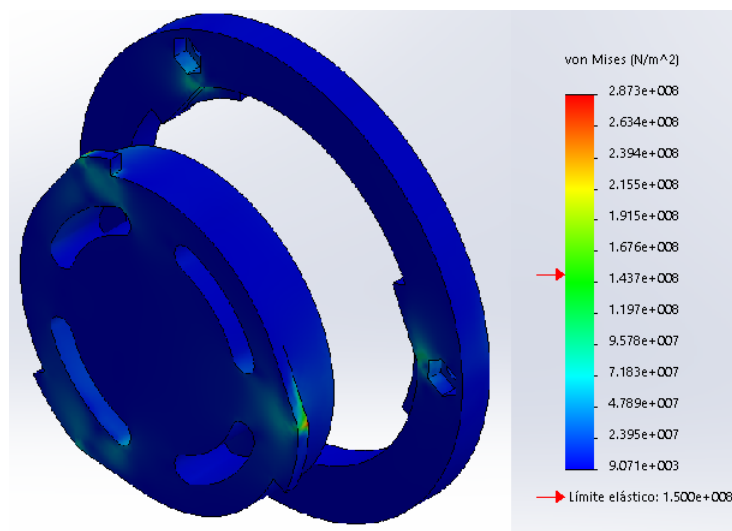


Ilustración 74

Del mismo modo que se han realizado los análisis estáticos se va a realizar el estudio a fatiga, aplicando las cargas anteriores repetidamente durante $10e^6$ ciclos. También se empleará el diagrama de factor de carga para mostrar los resultados, pues tampoco sufre a fatiga el mecanismo de desconexión fabricado en PA66-30GF, tras la aplicación de las cargas $10e^6$ veces. Por lo tanto este diagrama ayudara a visualizar las zonas que sufrirían si se aplicara una carga multiplicada por el factor indicado.

Como se puede observar en el diagrama, tras $10e^6$ ciclos de aplicación de la carga vertical F toda la pieza sufriría en fatiga mayor grado si el valor de esta carga fuera aproximadamente el doble en comparación con el mismo análisis realiza con al mecanismo de desconexión fabricado en EN AC-46000, pues se puede comprobar que la mayoría de la pieza esta coloreada en tonos naranjas y amarillos. Aun así cabe recordar que, para la magnitud de la carga aplicada, el conjunto no sufre fatiga (ilustración 75).

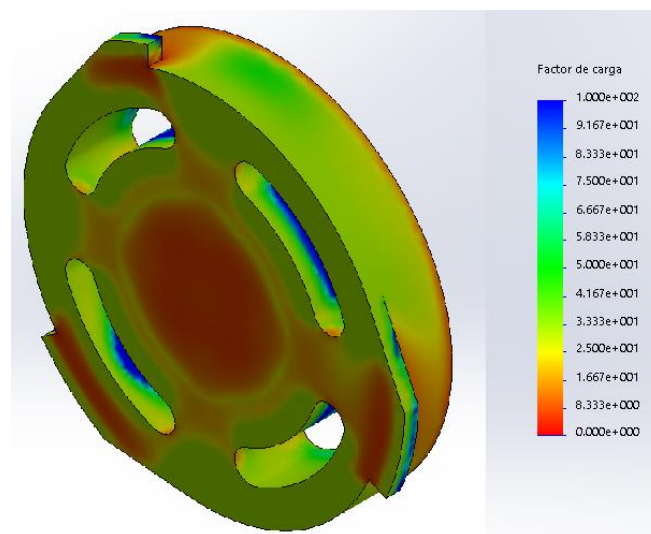


Ilustración 75

También se puede observar como las pestañas y la aligeración, así como el refuerzo son las áreas más propensas a sufrir daños por fatiga si se aumentara la magnitud de las cargas aplicadas (ilustración 76).

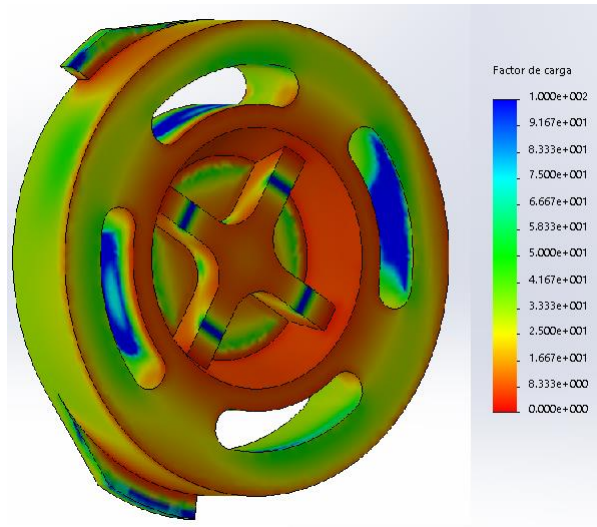


Ilustración 76

Por otro lado, el análisis de fatiga del segundo caso, en que se aplica de forma cíclica el momento flector M_f y la carga vertical F , también afectaría en mayor grado a este mecanismo de desconexión del mismo modo que ocurre en el caso anterior. Gran parte de la geometría del núcleo está coloreada en un tono azul claro, mientras que en el resultado obtenido tras realizar este análisis al mecanismo fabricado en EN AC-46000 estas zonas están coloreadas en azul oscuro (ilustración 77).

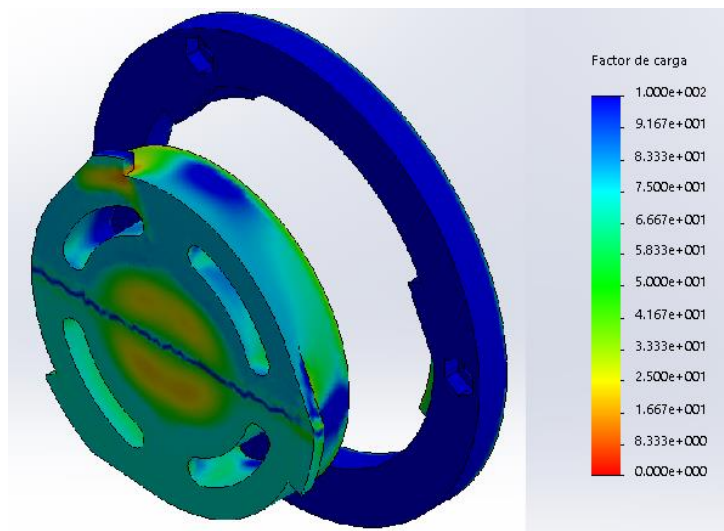


Ilustración 77

También se puede observar que el área central del núcleo, la aligeración y los nervios superior e inferior, sufriría daños a fatiga si se aplicaran cargas de aproximadamente 2.5 veces mayores así como la pestaña superior del núcleo. También sufrirían daños por fatiga las pestañas inferiores del anillo si se aplicaran cargas 5 veces mayores (ilustración 78).

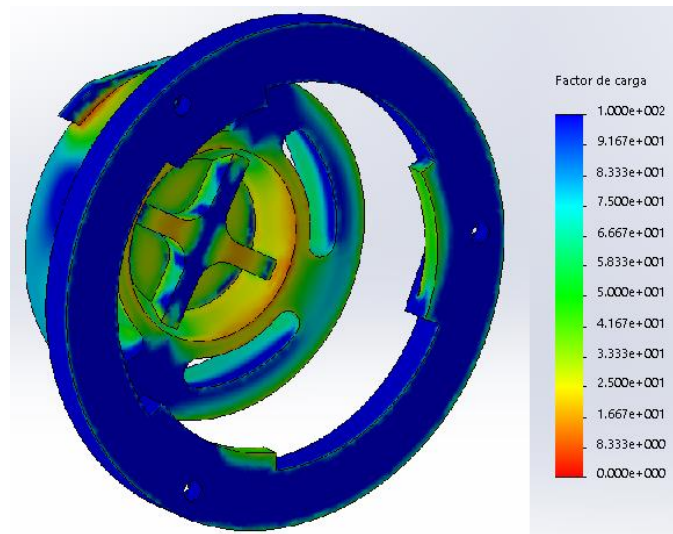


Ilustración 78

Del mismo modo que ocurría con el mecanismo de desconexión fabricado en EN AC-46000 cabe recordar que los resultados del tercer caso, en que se aplica el momento torsor, muestran que existen áreas donde los valores de tensión alcanzados son superiores a la cargas de rotura provocando en daños irreversibles. Por este motivo tampoco tiene relevancia realizar un análisis en que se aplican estas cargas de forma repetida, pues tras una única aplicación de la carga las piezas ya sufren daños.

10. Conclusiones

Tras el análisis mecánico realizado al mecanismo de desconexión de las fijaciones de snowboard *SnabbSnö*, objeto de este trabajo de final de grado, en que se han simulado las condiciones que representa el efecto de un aterrizaje sobre una superficie plana, se puede concluir que los resultados obtenidos en estas condiciones no representan un peligro para la integridad del mecanismo. Esto se debe a que los resultados de estas simulaciones muestran que en ningún caso se han alcanzado valores de tensión que superen la carga de rotura, por lo tanto no se producen daños en el mecanismo de desconexión. Los valores de tensión alcanzados son inferiores al límite elástico, de modo que las deformaciones producidas por estas tensiones son reversibles. Esto significa que las áreas deformadas, afectadas por estas tensiones, retornan a su geometría original tras el cese de aplicación de la carga.

Del mismo modo las resoluciones de los análisis en que se han aplicado las cargas de forma cíclica han mostrados resultados favorables. Esto indica que la aplicación de estas cargas repetidamente $10e^6$ ciclos no producen daños en el mecanismo de desconexión, sino que sería necesario aplicar cargas con el doble de magnitud, como mínimo, para que se produjeran daños a fatiga en este producto.

Excepcionalmente el caso en que se ha aplicado un momento torsor sobre el anillo del mecanismo de desconexión, ha mostrado resultados menos favorables. Esto puede ser debido a que las áreas de contacto entre el anillo y el núcleo, donde concentran las tensiones resultantes de las cargas de este caso, son muy inferiores a las áreas de contacto aparecidas en los casos anteriores. También puede ser debido a que la geometría que se ha empleado para llevar a cabo las simulaciones no contiene radios de acuerdo, mientras que la geometría real sí que los incluye. Estos radios de acuerdo pueden reducir la concentración de tensiones en estas áreas.

Independientemente de este último resultado negativo, los casos en que se han realizado los análisis representan las condiciones más desfavorables. Por este motivo, en la práctica, con unas condiciones realistas, el mecanismo debería de desempeñar sus funciones de una forma correcta.

Teniendo en cuenta estos resultados se puede concluir que los esfuerzos que representan el efecto del aterrizaje de un salto sobre una superficie plana no son la causa de fallo del mecanismo de desconexión, tanto aplicados de forma discreta como repetidamente.

Tal vez durante un uso prolongado de este producto, ensamblar y desensamblar el anillo del núcleo pueda provocar un desgaste de las áreas de contacto entre el anillo y el núcleo. Este desgaste podría ser el causante de holguras en el mecanismo de desconexión que impidieran su correcto funcionamiento, al tratarse de un sistema en que se requiere ensamblaje ajustado para garantizar una transmisión de movimientos y gestos precisos durante la práctica de snowboard.

El resultado de someter el mecanismo de desconexión fabricado con el material plástico propuesto, PA66-30GFR, a las mismas simulaciones también ha sido favorable, pues se han obtenido unos resultados que muestran valores de tensión similares a los valores alcanzados en el mecanismo de desconexión fabricado con EN AC-46000.

Sin embargo, los resultados de los análisis realizados al mecanismo de desconexión fabricado en este material plástico, han mostrado que en las áreas deformadas a causa de las cargas aplicadas las deformaciones son de mayor magnitud. No obstante, el valor máximo de deformación que se ha registrado es inferior a la centésima de milímetro. Como se puede observar en los planos del mecanismo, se emplean holguras del orden de la décima de milímetro en las zonas donde van a estar en contacto el anillo con el núcleo, de modo que las deformaciones producidas por las cargas no deben de suponer un factor peligroso para el correcto funcionamiento del mecanismo de desconexión.

Con la utilización de este material plástico, de menor densidad, se ha obtenido un producto más ligero que el original. Esta reducción en la masa es de aproximadamente la mitad del peso del mecanismo de desconexión fabricado con la aleación de aluminio EN AC-46000. Esto resulta favorable en la práctica del snowboard, ya que un producto más ligero ofrece menor resistencia y menores inercias durante su uso, consiguiendo así unas propiedades dinámicas mejores.

Finalmente, el aspecto visual de un producto fabricado con un material plástico técnico, como propone esta optimización, puede concordar más con la estética del resto de componentes que conforma el equipo necesario para practicar snowboard. Por el contrario, el mecanismo de desconexión metálico original de las fijaciones de snowboard *SnabbSnö* se puede mostrar más inapropiado, en cuanto al aspecto estético se refiere, asemejándose a un componente del sector industrial.

11. Presupuesto

En este apartado se presenta el presupuesto necesario para el desarrollo de este estudio. Este presupuesto tiene como misión determinar el coste económico, en unidades monetarias, de la ejecución material del objeto de este proyecto. Para ello se ha desglosado en cuatro apartados: coste personal, coste de los softwares empleados, coste del equipo y costes fungibles.

Coste personal

Cantidad(h)	Descripción	Precio/unidad*(€/h)	Precio total(€)
250	Total horas de ingeniería	12	3000
60	Documentación		
30	Modelización CAD		
60	Análisis MEF		
40	Análisis de resultados		
60	Redacción documento		

*El coste unitario de las horas de ingeniería no incluyen el coste de los materiales necesarios para llevar a cabo el proyecto. El coste de estos materiales se ven desglosados en las siguientes tablas.

Coste software

Cantidad(h)	Descripción	Precio licencia(€/año)	Precio/unidad*(€/día)	Precio Total(€)
90	Pack MS Office	149	0.60	6.75
150	SolidWorks	138	0.55	10.31
				17.06

*El coste unitario del software se ha calculado teniendo en cuenta el coste de la licencia anual para estudiante. Para ello se ha dividido el coste de la licencia entre el periodo laborable anual, 250 en días. Para cambiar la unidad de la cantidad, de horas a días, que se ha empleado el software se divide ésta ente las horas laborables de un día, 8 horas.

Coste equipo

Cantidad(h)	Descripción	Precio(€)	Precio/unidad*(€/día)	Precio total(€)
400	Ordenador	1000	4	200

*El coste unitario del ordenador se ha calculado teniendo en cuenta un periodo de amortización de cuatro años. Para ello se ha dividido el coste de compra del ordenador entre el periodo de amortización en días laborables, 250 días. Para cambiar la unidad de la cantidad, de horas a días, que se ha empleado el equipo se divide ésta ente las horas laborables de un día, 8 horas.

Coste fungible

Cantidad	Descripción	Precio/unidad (€/ud.)	Precio total(€)
1	Encuadernación*	50	50

*En este apartado se incluye la impresión del documento, las tapas así como el mecanismo de encuadernación (canutillo o espiral).

Coste total

Descripción	Precio total(€)
Coste de personal	3000
Coste software	17.06
Coste equipo	200
Coste fungible	50
Coste Total (sin IVA)	3267.06
IVA (21%)	686.08
Presupuesto Total	3953.14

El presupuesto de ejecución material para el análisis mecánico de las fijaciones de snowboard con mecanismo de desensamblaje rápido SnabbSnö, asciende a la cantidad de TRES MIL NOVECIENTOS CINCUENTA Y TRES EUROS CON CATORCE CÉNTIMOS DE EURO.

12. Bibliografía

12.1 Artículos

- [1] Borsellino C., Calabrese L., Passari R., Valenza A. *Study of snowboard sandwich structures*. 2004
- [2] Miriam Klous, Erich Müller, Hermann Schwameder. *Three-Dimensional Lower Extremity Joint Loading in a Carved Ski and Snowboard Turn: A Pilot Study*. 2014
- [3] A.L.M. Minnoye, D. H. Plettenburg. *Design, fabrication, and preliminary results of a novel below knee prosthesis for snowboarding: A case report*. 2010
- [4] Jeremy J. Determan, Edward C. Frederick, Joseph S. Cox, Matthew N. Nevitta. *High impact forces in skateboarding landings affected by landing outcome*. 2009
- [5] Edward C. Frederick, Jeremy J. Determan, Saunders N. Whittlesey, Joseph Hamill. *Biomechanics of Skateboarding: Kinetics of the Ollie*. 2006
- [6] Michael J O'Shea. *Snowboard jumping, Newton's second law and the force on landing*. 2004

12.2 Libros

- Gómez González, Sergio. *SolidWorks: Office profesional*. Marcombo. 2008
- Shih, Randy H. *Introduction to finite element analysis using SolidWorks Simulation 2014*. Schroff Development Corp., cop. 2014
- Zienkiewicz, O. C. *El Método de los elementos finitos*. CIMNE, cop. 1994-1995
- Akin, J. E. *Finite elements for analysis and design*. Academic Press, cop. 1994
- Sabina de Lis, José Claudio. *Análisis no lineal: curso de introducción: aplicaciones*. Universidad de La Laguna. Servicio de Publicaciones. 2005

12.3 Páginas web

<http://www.real-world-physics-problems.com/physics-of-snowboarding.html>

<http://snowboardmountaineer.com/forces-effecting-movement-on-the-snow/>

https://www.researchgate.net/figure/221723820_fig1_Figure-1-Graphical-depiction-of-the-set-of-forces-acting-in-the-lateral-direction

https://www.researchgate.net/figure/221723820_fig2_Figure-2-System-of-forces-acting-on-the-ground-during-a-ski-turn

https://www.researchgate.net/figure/221723820_fig3_Figure-3-Dynamometrically-measured-reaction-force-FZt-and-measured-variables-Example

https://www.researchgate.net/figure/221723820_fig4_Figure-4-Graphical-depiction-of-force-variables

<https://skimoves.me/tag/ground-reaction-force/>

<http://americanhistory.si.edu/blog/2009/09/inventor-sherman-poppen-snurfing-his-way-into-history.html>

<http://jupiter.plymouth.edu/~brkoelsch/CSDI1200/Sherman%20Poppen.html>

<http://www.bulgariaski.com/snowboarding.shtml>

<http://www.summitdaily.com/news/snowboarding-history-dimitrije-milovich-and-the-winterstick/>

<http://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-AC-46000-46000-F-ALSi9Cu3Fe-Cast-Aluminum>

<http://www.stacast-project.org/sc/docs/european-standards>

<http://stenaaluminium.com/PageFiles/8085/CAST%20ALLOYS%20IN%20ALUMINIUM%202013.pdf>

<http://stenaaluminium.com/PageFiles/6015/eng-EN%20AB-46000.pdf>

http://www.stacast-project.org/sc/docs/deliverables/deliverable_3_1.pdf

http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1244

<http://www.goodfellow.com/S/Poliamida-Nilon-6-6-reforzado-con-30-fibra-de-vidrio.html>

<http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/poliamida-66-pa-66/8>

<http://www.automatecsistemas.com/Descargas/PlasticosCaracteristicas.pdf>

https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/sites/default/files/gallery-files/aircreation_materialdata_pa66-gf.pdf

<http://www.nilit.com/plastics/appfiles/nilitplastics-polyamideproductlitelature.pdf>

http://help.SolidWorks.com/2015/spanish/SolidWorks/sldworks/c_introduction_toplevel_topi c.htm

<https://forum.SolidWorks.com/thread/108839>

<http://grupocarman.com/blog/SolidWorks-simulation/>

http://www.ehowenespanol.com/consejos-mallas-simulacion-SolidWorks-info_204787/

<http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/>

[http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/4000005506/Elementos%20Finitos\(1\).pdf](http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/4000005506/Elementos%20Finitos(1).pdf)

<http://soluciones.ibermatica.com/vdoc/resource/filecenter/document/042-000025-00l/1.0%20An%C3%A1lisis%20no%20lineal>

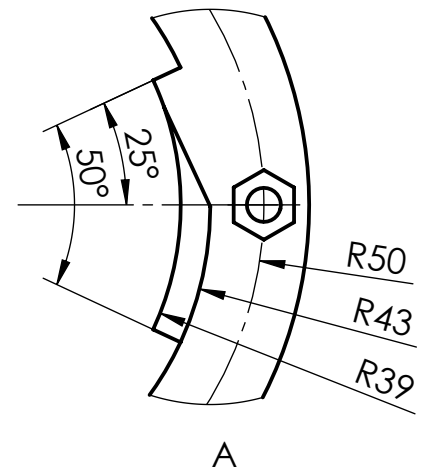
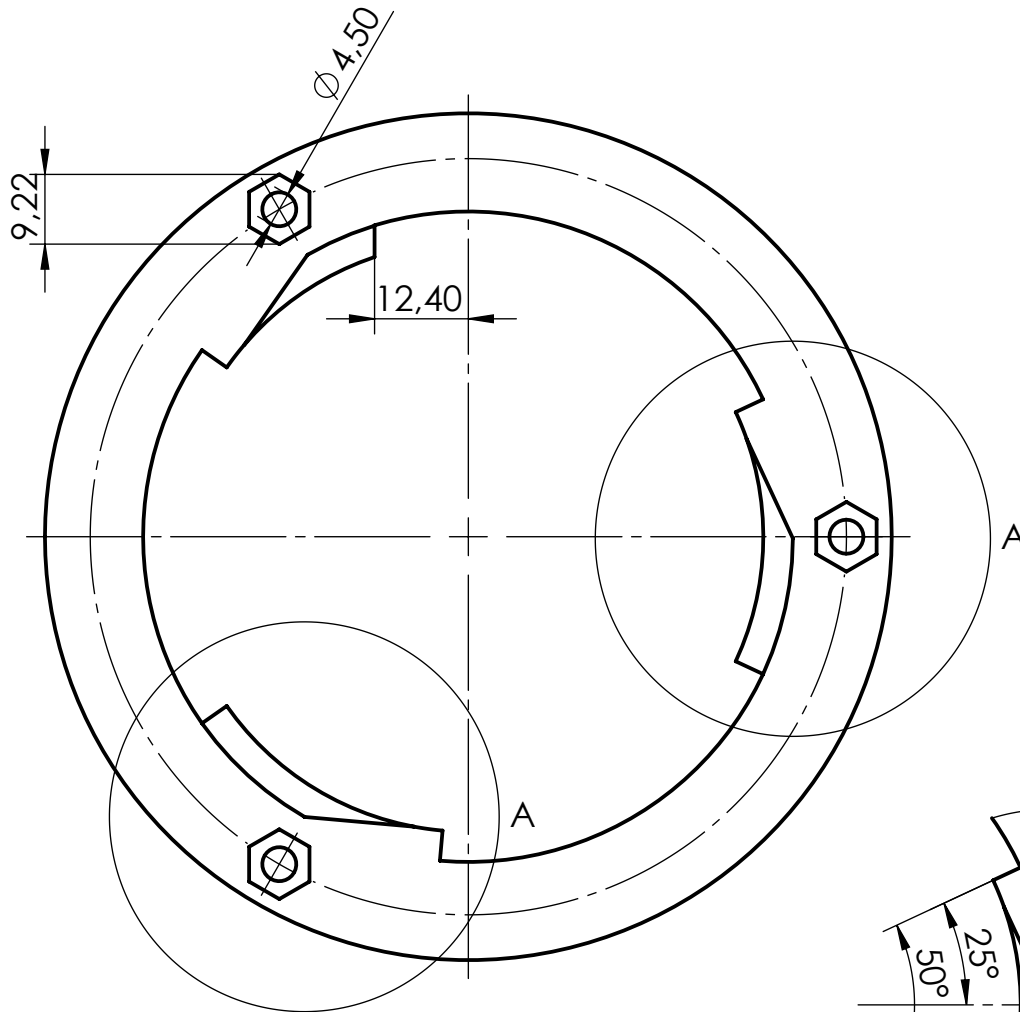
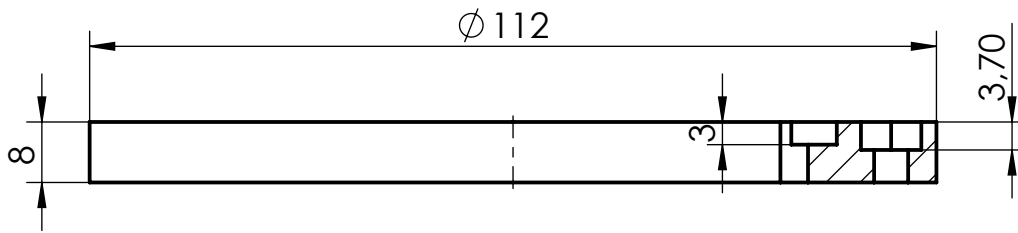
<http://www.SolidWorks.com/sw/buy-software.htm>

<http://www.capinc.com/support/faq/basic-faq/how-much-does-SolidWorks-cost>

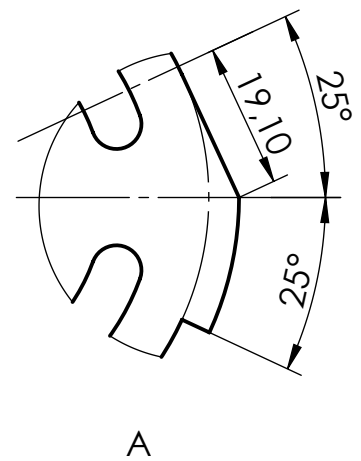
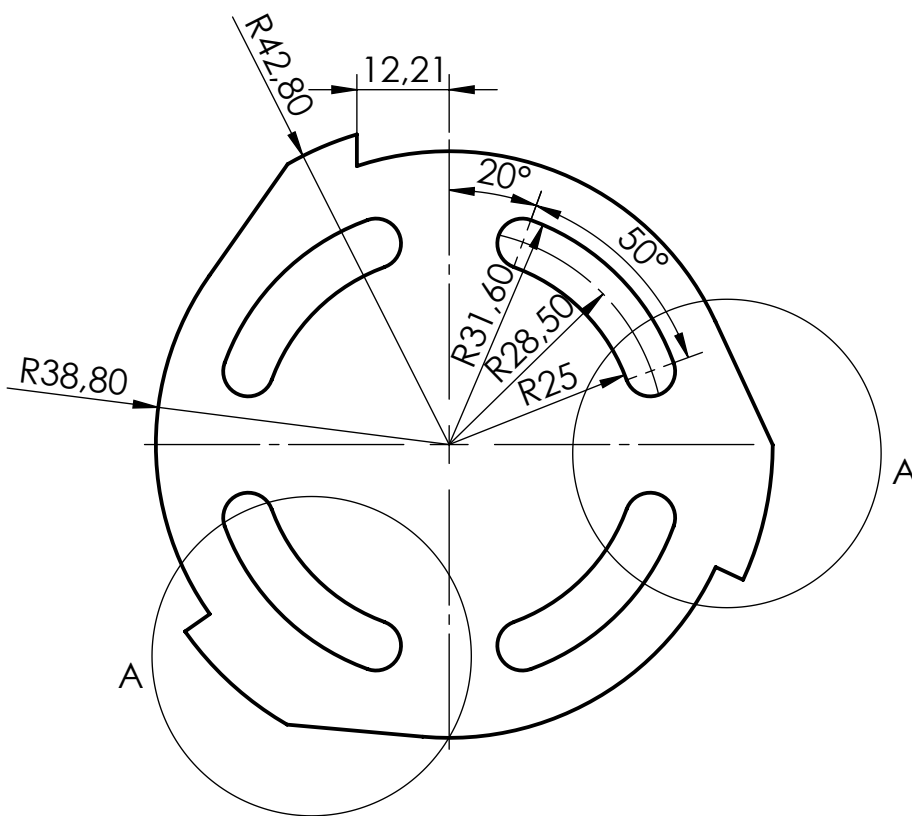
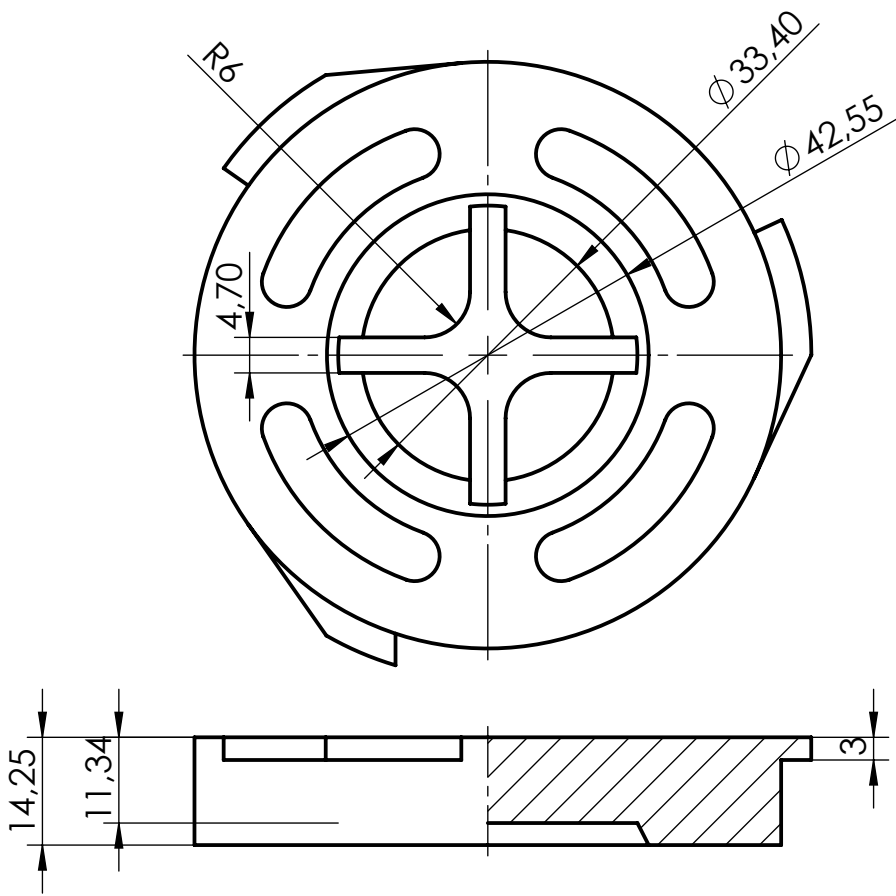
<https://www.cati.com/blog/2015/04/how-much-does-SolidWorks-cost/>

<http://www.ibermaticaindustria.com/soluciones/ingenieria-SolidWorks>

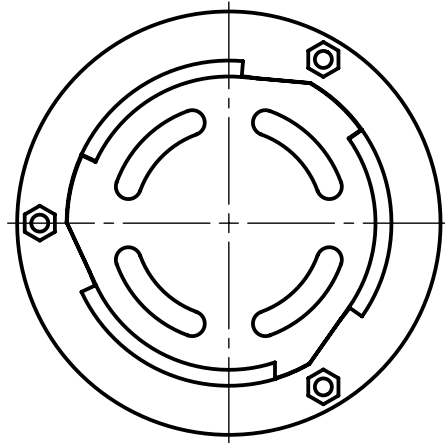
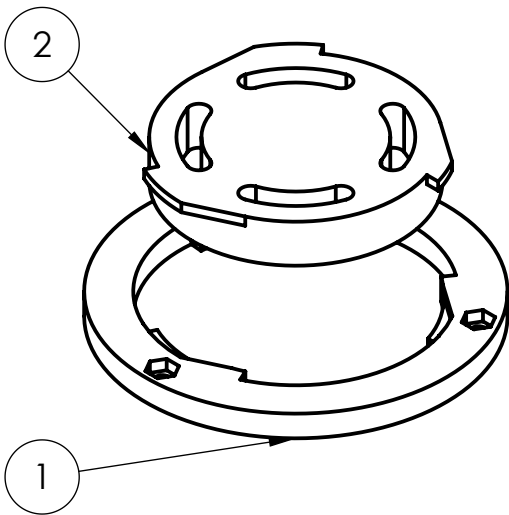
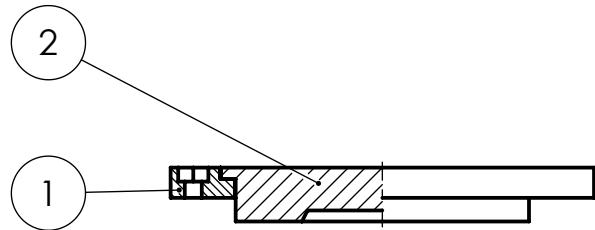
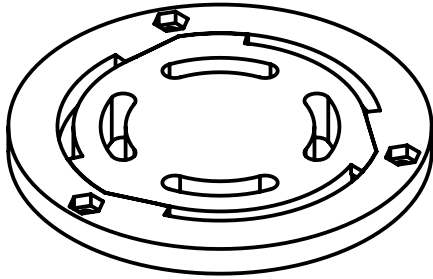
Planos





Observaciones	Título: Anillo	Plano nº: 1
		Hoja nº: 105
Escala: SOLIDWORKS Student Edition 1:1	Un. Dim. mm Solo para uso académico Universidad de Valencia	Alumno: Carlos Valls Fuster Fecha: 28/10/2016
	Comprobado por:	Fecha:



Observaciones	Título: Núcleo	Plano nº: 2
		Hoja nº: 106
Escala: SOLIDWORKS Student Edition 1:1	Un. Dim. mm Solo para uso académico Universidad de Valencia	Alumno: Carlos Valls Fuster Fecha: 28/10/2016
	Comprobado por:	Fecha:



2	Núcleo	EN AC-46000	1
1	Anillo	EN AC-46000	1
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
Observaciones		Título: Ensamblaje del mecanismo de desconexión	Plano n.º: 3
Escala: 1:2		Un. Dim. mm	Hoja n.º: 107
		Alumno: Carlos Valls Fuster	Fecha: 28/10/2016
		Comprobado por:	Fecha: