

2018
Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

I.MEMORIA

Metodología para el diseño de uniones
estancas (difusor-junta-carcasa) en
luminarias

Methodology for the design of watertight
joints (diffuser-seal-housing) in luminaires

Autor

Pablo Ruiz Trasobares

Director/es

Daniel Elduque Viñuales
Javier Óscar Abad Blasco

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres y mi hermana toda la paciencia y esfuerzo durante el tiempo que he estado estudiando este grado. Así como a mi novia que ha estado siempre a mi lado, sin olvidar a sus padres y hermano los cuales han sido mi segunda familia.

A muchos de los amigos que han estado tanto en lo bueno como en lo malo, y los buenos compañeros que he conocido a lo largo de la carrera.

También, especial mención a Daniel Elduque y Javier Abad por su disponibilidad, amabilidad y su gran labor como tutores.

Por último, agradecer a Carlos Javierre, quien también me ha guiado y enseñado a lo largo de este trabajo como un tutor más.



TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER



**DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. Pablo Ruiz Trasobares,

con nº de DNI 17454941B en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado _____ (Título del Trabajo)

Metodología para el diseño de uniones estancas (difusor-junta-carcasa)

en luminarias

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 20 de Septiembre de 2018

Fdo: Pablo Ruiz Trasobares

Metodología para el diseño de uniones estancas (difusor-junta-carcasa) en luminarias

Resumen

El siguiente Trabajo Fin de Grado titulado Metodología para el diseño de uniones estancas (difusor-junta-carcasa) en luminarias ha sido realizado a lo largo de seis meses, bajo la dirección del Dr. Daniel Elduque Viñuales y el Dr. Javier Óscar Abad Blasco, pertenecientes al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

En este proyecto se plantea una metodología para el diseño del cierre de una luminaria estanca mediante clips, asegurando de esta manera el correcto funcionamiento de los componentes eléctricos de su interior.

Se realiza una comparativa inicial de cierres estancos mediante un benchmarking de luminarias de Zalux y luminarias de la competencia. Para realizar estos benchmarking se parte de datos en Word y de ficheros de CAD Siemenes NX.

Partiendo de los datos del benchmarking se desarrolla un modelo en 3D en SolidWorks para el cálculo de estanqueidad. Para ello, se partirá de unas medidas y formas genéricas de cierre estanco, similares a las empleadas por la empresa Zalux, en concreto similares a su modelo Oleveon 2x18. Una vez realizado el modelo y comprobado su correcto funcionamiento, además de elegir la malla más conveniente, realizar controles de mallado para las zonas de mayor importancia, así como, realizar unos shells para ahorro en tiempo de cálculo, se procede a la realización de variaciones de distintos parámetros para estudiar cómo afectan a la estanqueidad de la luminaria. Los parámetros a variar serán tanto geométricos (altura, anchura, espesor, distancia entre clips, etc) como de propiedades de los materiales. Se comprueba que para lograr mayor estanqueidad conviene aumentar el espesor del difusor, así como su altura o módulo elástico, disminuir la distancia de apoyo entre clips, todo ello buscando un punto óptimo para la luminaria concreta.

Paralelamente, se realiza un modelo simplificado para introducirlo en una hoja Excel, el cual podría servir de comprobación para los cálculos, así como de futura herramienta de diseño que mediante estos cálculos simplificados proporcione recomendaciones al diseñador.

Contenido

1.	Introducción.....	5
1.1	Producto a estudiar.....	5
1.2	Objetivos del proyecto	8
1.3	Tareas a realizar	9
2.	Benchmarkings	10
3.	Concepto de estanqueidad	11
3.1	Nacimiento del concepto de Junta de Estanqueidad	11
3.2	Tipos de juntas	11
3.3	Estanqueidad en luminarias y problemas que les afectan	11
4.	Método de los elementos finitos	13
4.1	Introducción	13
4.2	Conceptos generales del MEF	13
5.	Puntos a tener en cuenta para realizar un cálculo por MEF	16
6.	Procedimiento mediante el software utilizado.....	17
6.1	Presentación del programa utilizado	17
6.2	Dibujo de los componentes en SolidWorks	17
6.3	Ensamblaje de los componentes y posición relativa entre los mismo	23
6.4	Definición de los Materiales de los componentes.....	25
6.5	Definición del Contacto entre componentes (Conexiones)	27
6.6	Definición de las Condiciones de Contorno	28
6.7	Mallado	33
6.8	Obtención de Resultados	36
7.	Resumen de los parámetros y materiales para todos los casos analizados.....	40
8.	Resumen de resultados de los casos y conclusiones a partir del análisis mediante SolidWorks.....	42
9.	Proceso del Modelo de cálculo simplificado en Excel.....	50
10.	Conclusiones del Modelo de cálculo simplificado	51
11.	Futuras posibilidades de ampliación o profundización	51
12.	Conclusiones del proyecto.....	52
13.	Bibliografía	53

1. Introducción

Dentro del sector de la iluminación se pueden encontrar dos campos diferenciados, el de la iluminación ornamental o de diseño, y el de la iluminación industrial o estanca.

El primer caso, utilizado en oficinas, despachos, etc, se basa más en la importancia de la estética y el efecto de la luz. Mientras que, en las luminarias estancas, utilizadas en zona públicas, parkings, industria, etc, prima su funcionalidad.

La razón por la cual en las luminarias estancas es vital su funcionalidad, es porque están sometidas a condiciones de trabajo exigentes. Estas condiciones de trabajo exigentes, le requieren a la luminaria, por un lado, una resistencia adecuada frente a posibles impactos que pueda recibir y por otro lado una adecuada estanqueidad. Este último requerimiento es clave en este tipo de producto, ya que se puede encontrar en zonas con altos niveles de humedad, como sería el caso de piscinas, así como en zonas con atmósferas explosivas, como es el caso de talleres de pintura. En estos casos es vital el cierre totalmente estanco para asegurar el correcto funcionamiento de los elementos eléctricos del interior de la luminaria, y proteger del peligro que supondría en ambientes con atmósferas explosivas.

El cierre estanco es garantizado por el conjunto carcasa-difusor y la junta albergada en la carcasa, los cuales se mantienen unidos gracias a la acción de los gatillos de cierre o clips. (Figura 1).

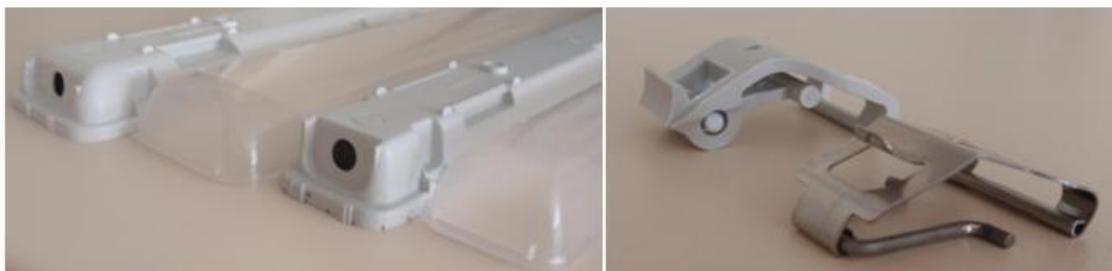


Figura 1 A la izquierda, carcasa en color blanco, y difusor, transparente. A la derecha clips de plástico y de metal.

1.1 Producto a estudiar

El producto objeto de estudio es la luminaria industrial estanca. De la cual sus principales componentes son la carcasa, la junta de estanqueidad incluida en esta, el difusor y clips de cierre en este caso, aunque podría ser mediante otro método. Todos estos componentes juntos han de garantizar la estanqueidad de los componentes eléctricos que albergan.

Como producto de partida para el proyecto, se parte de una luminaria genérica de la marca comercial Zalux. Las medidas generales de partida, habiendo de elegir unas, se han tomado similares a las del modelo Oleveon 2x18, elegidas tan sólo como una medida genérica, habiendo podido ser otras similares.

Se procederá a un rediseño del producto buscando un mejor funcionamiento, en concreto de cierre estanco, variando los parámetros geométricos, así como las características de sus diferentes materiales. De esta manera, se comprobará mediante los

resultados obtenidos en el programa de simulación, de que manera afecta la variación en disminución o aumento de la magnitud de cada parámetro.

Características del modelo de partida:

- **Carcasa:** Cuerpo fabricado en poliéster reforzado con fibra de vidrio. Reflector de chapa de acero, desengrasada y tratada con polvo Epoxi-Poliéster. Junta de estanqueidad de poliuretano, tapones y arandelas elásticas. Difusor de policarbonato transparente tipo prismático. Reactancia KVG, IP 657, Case I.
- **Difusor:** Difusor policarbonato transparente tipo prismático inyectado con ángulos estudiados para su total transparencia. Grado de protección 7 contra daños mecánicos.
- **Accesorios:** clip montado PE 2p, clip metálico inoxidable, kit de suspensión.

A continuación se exponen una serie de fotos donde se muestra la luminaria Oleveon de Zalux, de la cual se han tomado parámetros similares, y puede servir de ejemplo para hacerse una idea del objeto de estudio.



Figura 2 Imagen de una luminaria Oleveon tomada de la página de Trilux

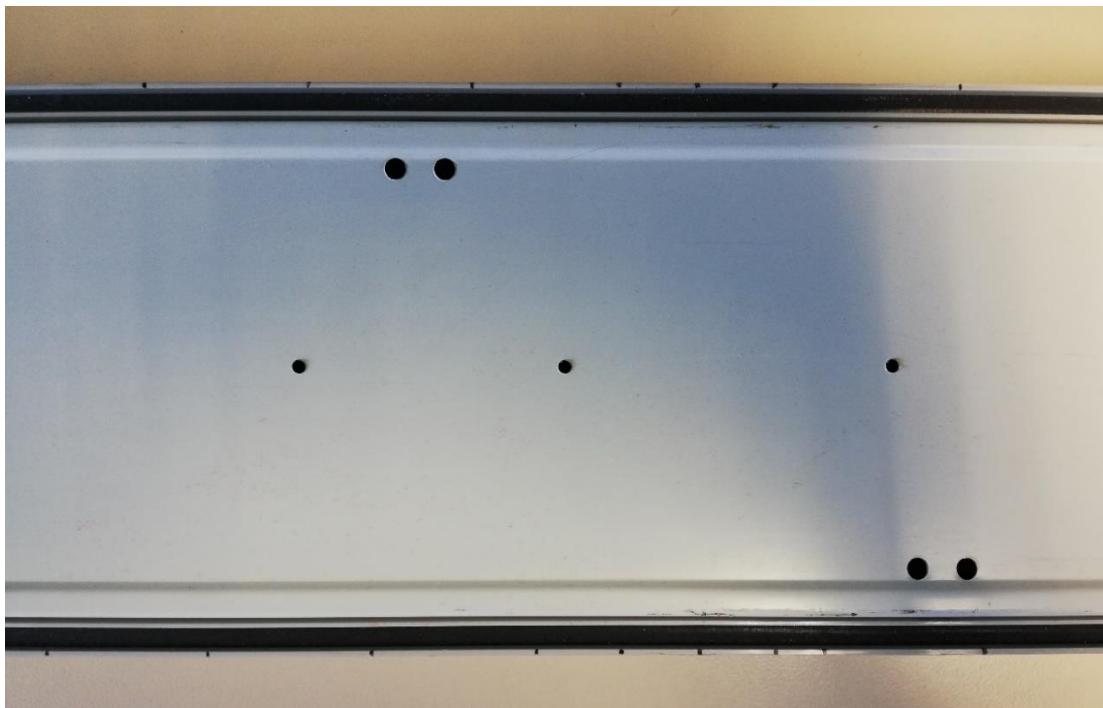


Figura 3 Imagen de la carcasa vista desde arriba con la junta alojada en su hueco.

Se puede observa una parte lateral-longitudinal de la luminaria, con el clip de cierre en el centro. Esta imagen es similar a los casos simulados en SolidWorks, con las fuerzas de clip simuladas en el centro y mediante simetría, mostradas a ambos lados la mitad dela distancia hasta el siguiente clip (Figura 4).



Figura 4 Parte lateral-longitudinal de la luminaria.

Esta imagen, es la misma situación anterior pero vista desde en planta, en ella se ve como la zona central del difusor, donde el clip ejerce la máxima presión, se curva hacia el interior. También se observa la junta de color negro, situada debajo del difusor. (Figura 5).



Figura 5 Parte superior-longitudinal de la luminaria



Figura 6 Luminaria mostrada entera en vista en planta.

1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es plantear una metodología para el diseño de cierre de una luminaria estanca mediante clips.

Para ello, se realiza primero una comparativa inicial de cierres estancos mediante la realización de un benchmarking de luminarias de Zalux y otro de la competencia. Realizados a partir datos en documentos Word y archivos CAD Siemens NX.

A partir del benchmarking de Zalux, se realiza un modelo en 3D en SolidWorks para analizar el cálculo de la estanqueidad partiendo de unas medidas genéricas, similares al modelo Oleveon 2x18. Una vez se comprueba que el modelo funciona correctamente, se procede a realizar diferentes casos variando parámetros tanto geométricos como de características de los materiales.

De forma paralela se intenta conseguir un modelo simplificado de cálculo mediante Excel, que pudiese servir de comprobación y futura herramienta de diseño para cierres estancos de este tipo.

1.3 Tareas a realizar

Para el alcance de este proyecto se ha requerido adquirir conocimientos de diferentes programas informáticos. Entre ellos ha sido necesario aprender un manejo básico de CAD Siemens NX, para poder obtener las secciones necesarias de las luminarias y acotarlas, y así conocer los parámetros para la realización de los benchmarking.

A su vez ha sido necesario tener conocimientos básicos de Excel para la realización de los benchmarking, así como para los cálculos simplificados finales.

También ha sido requerido el aprendizaje de diseño en SolidWorks. En el diseño se ha abarcado desde la realización de croquis y su extrusión, a su ensamblaje posterior, así como la introducción de shells en cuerpos con volumen, y la realización de divisiones en los cuerpos para los posteriores controles de mallado.

Finalmente, también se ha repasado los conocimientos del funcionamiento del Método de Elementos Finitos y su aplicación para el cálculo en SolidWorks, aprendiendo a reconocer y plantear las condiciones de contorno, contacto entre componentes y correcto mallado. Eligiendo estas de manera que sean lo suficientemente exactas para el cálculo pero no excesivas, para ahorrar tiempo de cálculo y espacio de almacenamiento.

En resumen, ha sido un proyecto en el que se ha abarcado el conocimiento de diferentes programas y sus usos y aplicaciones.

2. Benchmarks

Con el propósito de poder encontrar y comparar fácilmente los parámetros de distintas luminarias se realizan los benchmarking.

Como se ha explicado anteriormente, se han llevado a cabo 2 diferentes, uno que reúne distintos modelos de luminarias de la competencia y otro con luminarias propias de Zalux.

Debido a que el objeto de estudio de este TFG es la estanqueidad de las luminarias, en los benchmarking he decidido clasificar los parámetros en grupos, según los 3 componentes que forman el cierre estanco (Junta, Carcasa y Difusor). Además de añadir el número de clips necesarios para ejercer la fuerza que los mantenga unidos y la distancia entre ellos.

Dichos benchmarking se adjuntan en los anexos, apartado 1.

En el primero de los anexos, se puede observar:

- Una primera captura de un archivo Excel, un benchmarking de diferentes luminarias estancas de diversos fabricantes de la competencia, en el cual se pueden ver fotos de cada uno de los componentes, así como de sus parámetros más relevantes.
- En una nueva captura de otra hoja del archivo Excel se observa otro benchmarking de luminarias de la marca comercial Zalux. Donde también se pueden observar los parámetros más relevantes. A continuación, se añaden capturas de secciones de la junta de cierre acotadas de algunos modelos de Zalux. Estas han sido realizadas a partir de archivos de CAD Siemens NX.

Tabla 1 Ejemplo de parte del benchmarking de Zalux

nº	NOMBRE	JUNTA			CARCASA								
		Anchura junta longitudinal (mm)	Altura junta longitudinal (mm)	Comentario sobre forma sección	Anchura hueco junta longitudinal (mm)	Anchura hueco junta extremo (mm)	Profundidad hueco junta (Labio exterior)(mm)	Prolongación hueco junta (Nervio interior)(mm)	Espesor Labio Exterior (mm)	Espesor Nervio Interior (mm)	Anchura Sección Carcasa(mm)	Profundidad Sección Carcasa (mm)	Espesor Carcasa (mm)
1	ARAGON 1x36	4,5	4	Redondeada y estrechada en el fondo	4,7	4,7	17,7	13,2	1,5	0,8	103	53	1,5
2	ARAGON 2x36										160		
3	ALHAMA 1x18	6	6	Fondo del mismo ancho pero con esquinas redondeadas	6	7,5	10	10	1,5	1,2	96,4	48,5	1,5
4	ALHAMA 1x36					8,5					140,2		
5	ALHAMA 1x58					7,5							
6	ALHAMA 2x18					8,5							
7	ALHAMA 2x36												
8	ALHAMA 2x58												
9	OLEVON 1x18	6	5,2	Algo más estrecha en el fondo y con esquinas redondeadas	6,4	8	10,3	8,3	1,5	1,2	96,7	48,5	1,5
10	OLEVON 1x36					6,4							
11	OLEVON 1x58					6,6	9,2		1,5 (1,3 en el extremo)		140,5		
12	OLEVON 2x18	5,7	5,7		6,1	7,6	9,9	7,9	1,5	1,2		48,5	1,5
13	OLEVON 2x36												
14	OLEVON 2x58												

3. Concepto de estanqueidad

Estanqueidad es la cualidad de ser estanco, y a su vez estanco es la incomunicación entre compartimentos.

Se denomina junta de estanqueidad o junta mecánica a unos componentes de material adaptable, que sirve para sellar bien la unión de las caras mecanizadas de elementos de cierre con el fin de evitar fugas o penetración de fluidos por algún pequeño defecto en el mecanizado.

Las juntas ahorran dinero en el mecanizado de superficies de unión, debido a que hace innecesario que el acoplamiento entre ambas sea totalmente exacto, ya que esta se deforma adaptándose y corrigiendo los posibles fallos que existan en el mecanizado.

El material de las juntas puede ser caucho, silicona, metal blando, corcho, fieltro, un polímero plástico, etc

3.1 Nacimiento del concepto de Junta de Estanqueidad

El nacimiento de esta idea surge en gran medida de la mano del desarrollo de la automoción a principios del siglo XX. Los constructores e ingenieros de motores se encontraron con el problema del acople entre piezas mecanizadas. Se les ocurrió insertar entre ambas piezas algún tipo de material que sellara y garantizara el cierre estanco en el milimétrico espacio que quedaba entre ellas. Y es así como surge la idea de junta, la cual da lugar al desarrollo de toda una industria paralela de bienes de equipo que trabaja para dar solución a este problema de sellado.

3.2 Tipos de juntas

A grandes rasgos se distinguen dos tipos de juntas, las juntas para garantizar el servicio estático y las juntas para servicio dinámico.

Las primeras, son aquellas en las que el elemento sellador no está sometido a ningún tipo de rozamiento dinámico, fricción o movimiento con respecto a otra parte del equipo o maquinaria. Y las segundas, son aquellas que realizan su función durante algún tipo de movimiento de las partes a estanqueizar, ya sea rotativo, axial, etc.

De acuerdo con esto, el tipo de junta que atañe al objeto de estudio, cierre estanco de luminarias, es de tipo estático.

3.3 Estanqueidad en luminarias y problemas que les afectan

La adecuada estanqueidad del cierre formado por el conjunto carcasa-junta-difusor depende en gran medida del correcto pisado de la junta, el cual está directamente ligado a la rigidez de los materiales que la comprimen (Figura 6).

A mayor rigidez de las piezas que aplastan la junta mediante la aplicación de una carga, más homogénea será la pisada. Y en el caso de escasa rigidez, en uno o ambos de los componentes que comprimen la junta, la zona donde se aplique la carga puntual quedará más chafada, y menos conforme mayor sea la distancia al punto de aplicación de la fuerza. Provocando de esta manera una diferente presión a lo largo de la junta, lo que trae consigo posibles fallos en la estanqueidad así como deformación de las piezas.

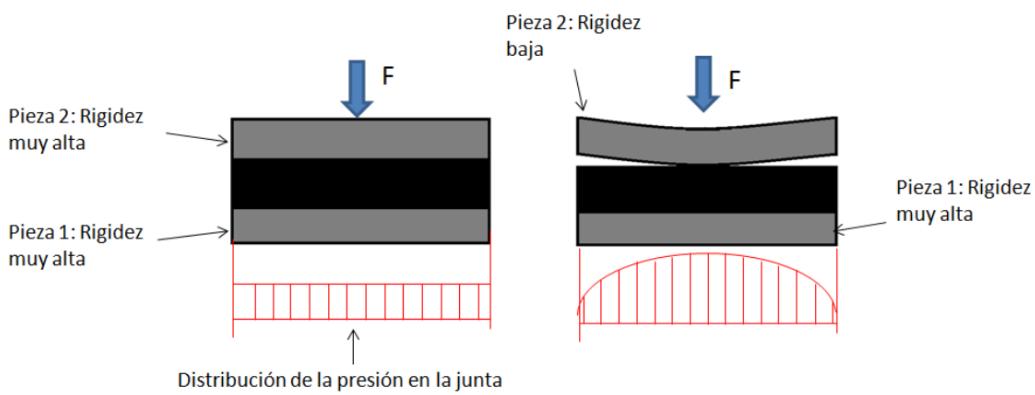


Figura 6 Pisado de una junta en función de la rigidez de los materiales (Imagen tomada del TFM de Víctor Camañes).

Este tipo de problema se da claramente en el caso de las luminarias objeto de estudio. Esto ocurre debido a que los componentes que forman el cierre están fabricados en plástico, y además por circunstancias del diseño requieren ser piezas alargadas de no gran espesor, lo cual produce que flecten con cargas pequeñas. Además, la carga necesaria para el cierre estanco se produce mediante clips, que producen la fuerza en unos puntos determinados, dando lugar al contacto total carcasa-difusor justo en la zona donde se sitúan los clips, y conforme se produce el alejamiento de estos las piezas se deforman produciéndose el gap o hueco por el que puede entrar agua y polvo.

Finalmente, la estanqueidad puede quedar garantizada, pero ello es debido a que aunque no se produzca el contacto carcasa-difusor a lo largo de todo el cierre, la junta dentro de la carcasa si queda chafada por el nervio del difusor en mayor o menor medida logrando así el cierre estanco.

Resulta así lo único que impide que penetre agua o polvo al interior de la luminaria, mientras que si no se deformaran los componentes del cierre (en especial el difusor) se lograría además de la junta, una segunda barrera que sería este conjunto carcasa-difusor (Figura 7).

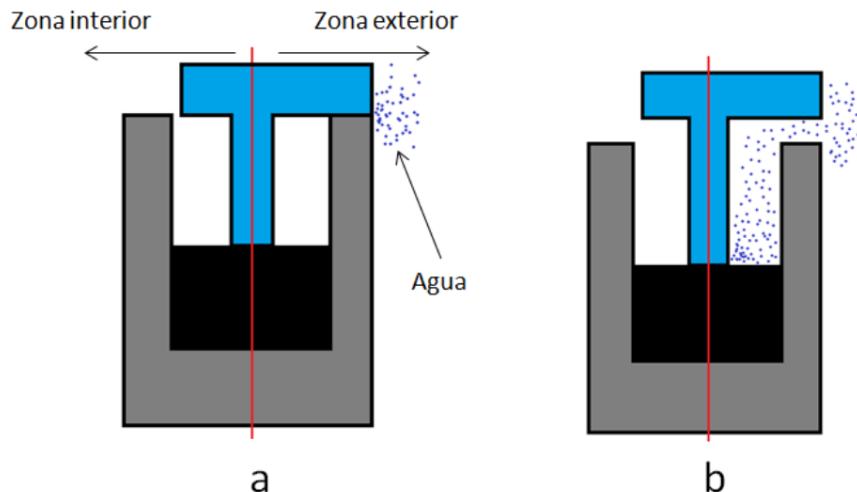


Figura 7 Esquema de la estanqueidad según el cierre (Tomada del TFM de Víctor Camañes).

4. Método de los elementos finitos

4.1 Introducción

El método de elementos finitos posibilita la resolución de casos que hasta hace un tiempo era imposible resolver por los métodos matemáticos tradicionales, y es por ello que ha adquirido una considerable importancia en el ámbito de la física y la ingeniería.

Antes de este método era necesario realizar prototipos que se ensayaban para ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que conllevaba un importante coste económico a la par que un elevado tiempo de desarrollo.

Mediante el método de elementos finitos se realiza un modelo matemático de cálculo del sistema real, el cual es más sencillo y económico en el momento de hacer variaciones que en el prototipo.

No obstante, debido a que el método se basa en unas hipótesis básicas, continúa siendo un método aproximado. Debido a ello, sigue siendo necesario el desarrollo de prototipos, aunque en menor cantidad, ya que el primero realizado a partir del diseño por elementos finitos se aproxima más a un diseño óptimo.

Gracias a los avances informáticos se tiene en la actualidad una gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos mediante este método (Figura 8).

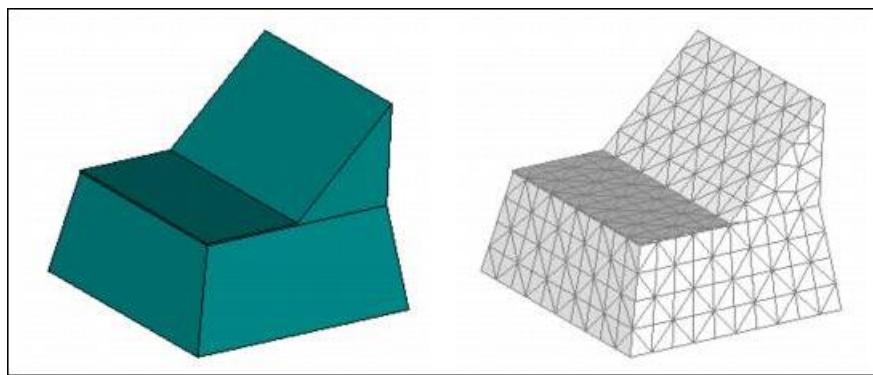


Figura 8 Discretización con elementos finitos

A pesar de la gran utilidad de estos programas, no hay que dejarse engañar; la obtención de unos resultados correctos y satisfactorios requieren tanto un gran conocimiento del material con el que se trabaja, así como del funcionamiento del método de los elementos finitos.

4.2 Conceptos generales del MEF

La idea base del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento.

De esta manera se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), el cual es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones

diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento es modelado por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre (Figura 9):

- Dominio: Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno: Variables conocidas las cuales condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor, etc
- Incógnitas: Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc

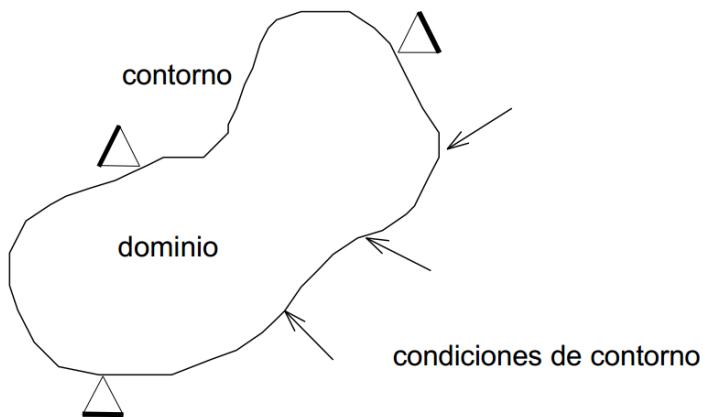


Figura 9 Sistema continuo a analizar

El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. Dichos elementos han de ser los adecuados y dispuestos apropiadamente según la naturaleza, propiedades geométricas y del material, así como de la situación de las cargas del dominio en estudio. Debe decidirse el número, tamaño, tipo (que incluye el número de nudos y el grado de las funciones de aproximación) y situación de los elementos a utilizar. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide.

La estructura es dividida en una cantidad finita de elementos, con ayuda de un preprocesador. Este paso es uno de los más cruciales para obtener una solución exacta del problema, de esta forma, determinar el tamaño o la cantidad de elementos en cierta área o volumen del elemento a analizar representa una ventaja del método, pero a la vez implica que el usuario debe estar muy consciente de esto para no generar cálculos innecesarios o soluciones erróneas.

Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si estos elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos se puede calcular el resto de incógnitas que son de interés: tensiones, deformaciones... A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo. Por ejemplo, si el

sistema a estudiar es una viga en voladizo con una carga puntual en el extremo y una distribución de temperaturas tal y como muestra la figura 10,

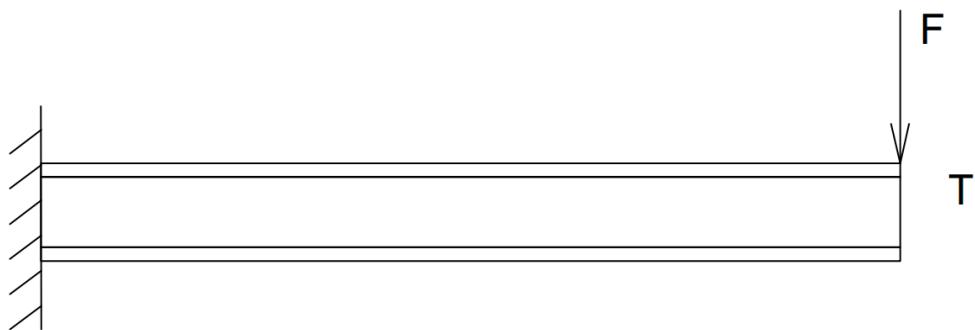


Figura 10 Viga en voladizo con carga puntual en el extremo y una distribución de temperaturas

el discretizado del dominio puede ser (Figura 11):

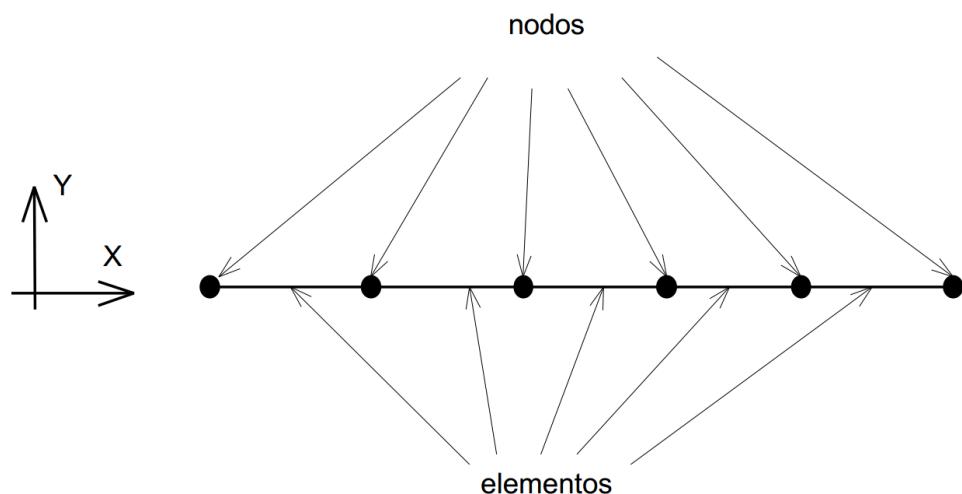


Figura 11 Discretización del dominio de un continuo en pequeños elementos

Los grados de libertad de cada nodo son:

- Desplazamiento en dirección x
- Desplazamiento en dirección y
- Giro según z
- Temperatura

El sistema, a causa de sus condiciones de contorno: empotramiento, fuerza puntual y temperatura, evoluciona hasta un estado final. En el cual, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema se puede determinar cualquier otra incógnita que se desee: tensiones, deformaciones, etc. Además, sería posible la obtención de la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad.

A partir del planteamiento de la ecuación diferencial que rige el comportamiento del continuo para el elemento, se llega a fórmulas que relacionan el comportamiento en el interior del mismo con el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este paso se realiza por medio de unas funciones llamadas de interpolación, ya que éstas ‘interpolan’ el valor de la variable nodal dentro del elemento.

El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento (en el caso estructural serán las llamadas matrices de rigidez) se ensamblan dando lugar a las matrices y vectores globales de la estructura.

Se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas, lineales o no, que resolviéndolas nos proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema.

5. Puntos a tener en cuenta para realizar un cálculo por MEF

Al realizar la resolución de un problema mediante un programa que calcule por el Método de Elementos Finitos es necesario tener en cuenta una serie de puntos:

- **En cuanto a que se pretende obtener con el análisis**

Hay que tener claro antes de comenzar el análisis que es lo que se pretende obtener: tensiones, desplazamientos, deformaciones, distribuciones de temperatura.

- **En cuanto a la geometría a analizar**

Lo más seguro es que se conozca completamente y al detalle la geometría del objeto de estudio, sin embargo, es necesario simplificar su geometría lo máximo posible. Ya que la mayoría de los detalles son superfluos y no influyen en el resultado final, pero sí que en caso de no simplificarse suponen un gran aumento en el tiempo de cálculo, así como del espacio de almacenamiento. Algunos detalles que pueden ser objeto de simplificación son algunos redondeos, entallas, etc.

También conviene tener en cuenta las posibles simetrías, axisimetrías, así como los problemas de tensión o deformación plana, ya que la identificación y aplicación de estos supone otro ahorro en tiempo de cálculo y espacio de almacenamiento.

A continuación, se debe decidir el tipo o tipos de elementos a utilizar, por ejemplo cuadrados o triangulares, lineales o cuadráticos, etc, que mejor se adapten a la geometría definida. Así como el tamaño de malla a utilizar, muy gruesa daría resultados lejanos a la realidad y muy fina supone mucho tiempo de cálculo y espacio de almacenamiento, se debe buscar un punto óptimo. Además, se puede utilizar una malla más fina en determinadas zonas de interés.

Por último, se podría incluir en este apartado la decisión de las propiedades del material o materiales de que se compone el objeto de estudio.

- **En cuanto a las condiciones de contorno a imponer**

Al igual que sucede con la geometría, las condiciones de contorno son conocidas pero también es conveniente decidir si son o no importantes o influyen en el análisis a realizar.

- **En cuanto a los resultados esperados**

Se debe tener una idea de los resultados que se esperan obtener para saber si representa bien la realidad. Por ejemplo, si se estudia el caso de una tubería de agua sometida a presión interior y en los resultados se obtiene que disminuye su radio, se debe ser capaz de analizar que hay un fallo en el proceso del cálculo, bien en el mallado, las condiciones de contorno, etc.

También es importante tener una idea del orden de magnitud esperado de acuerdo con las unidades con las que se esté calculando.

6. Procedimiento mediante el software utilizado

6.1 Presentación del programa utilizado

En principio, los diferentes componentes de la luminaria: carcasa, junta y difusor se dibujaron en el programa Siemens NX 10.0 de Unigraphics con la idea de importarlos posteriormente en SolidWorks, en el módulo de simulation para realizar el proceso de cálculo. No obstante, como por razones que se explicarán más adelante, convenía diseñar parte de la carcasa y del difusor con elementos tipo Shell, se terminó dibujando cada uno de los componentes en SolidWorks y realizando su ensamblaje y posterior cálculo también en el mismo.

6.2 Dibujo de los componentes en SolidWorks

Se ha dibujado cada componente por separado en el programa SolidWorks. Teniendo en cuenta los puntos mencionados en el capítulo 5, se observa que una luminaria tiene dos ejes de simetría, por lo tanto, bastaría con dibujar un cuarto de esta. Además, como el estudio de estanqueidad se limita a la parte longitudinal de la luminaria basta con dibujar una parte entre los dos clips de cierre que garantizan su estanqueidad en esa zona.

Para garantizar las condiciones de simetría, no se dibuja la zona entre los dos clips y su zona de apoyo, sino que se procede a dibujar la zona de apoyo y la mitad de zona de longitudinal que presiona a cada lado.

Como se ha mencionado igualmente en el apartado 8.3, para reducir el tiempo de cálculo y espacio de almacenamiento ocupado, se eliminan los detalles superfluos como redondeos pequeños y entallas.

- **Dibujo de la Carcasa**

Para el dibujo de la carcasa se comienza dibujando un croquis de la parte que alojará la junta, con su nervio exterior e interior (Figura 12).

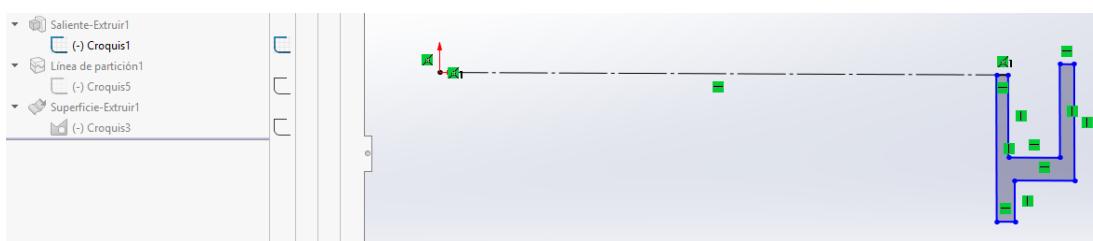


Figura 12 Croquis de la parte de la carcasa donde se aloja la junta.

A continuación, se extruye el croquis con una longitud de 264.8 mm para el caso de partida inicial, similar a la distancia entre clips en la luminaria de Zalux modelo Oleveon 2x18.

Y en su parte inferior como se ve en la figura 13 se marca un croquis que servirá como línea de partición para la shell del resto del cuerpo de la carcasa.

Se ha decidido hacerlo tipo shell ya que supone menos elementos a la hora de mallar lo cual disminuye el tiempo de cálculo y el espacio de almacenamiento ocupado, y como se observará en los resultados no es una zona afectada de manera importante en los desplazamientos como para hacer un mallado fino.

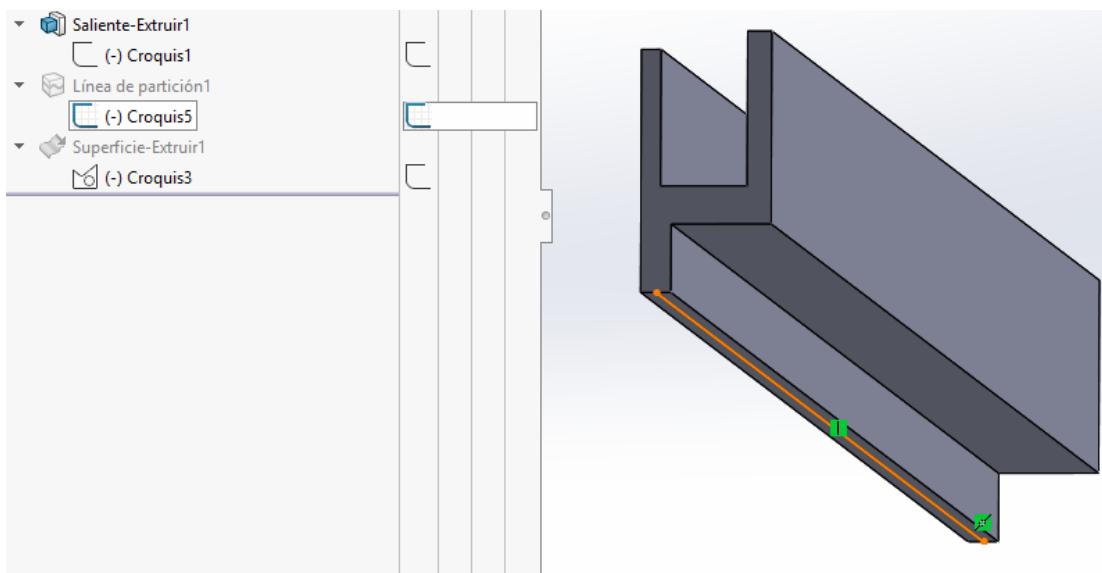


Figura 13 Croquis para línea de partición para la shell

A continuación se dibuja el croquis con la forma de la carcasa sin espesor y posteriormente se extruirá (Figura 14).

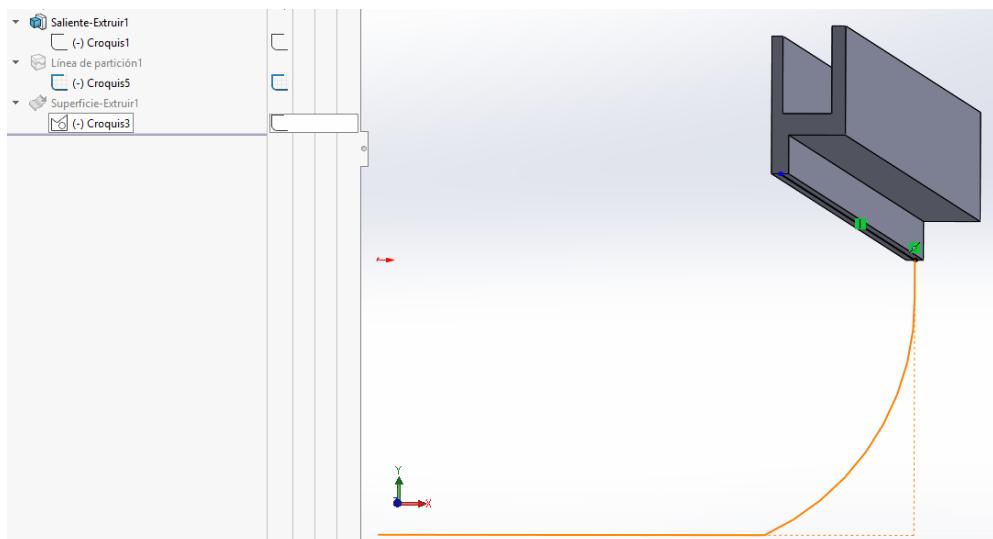


Figura 14 Croquis para la shell de la carcasa

Finalmente, se extruye y se tiene la sección del componente carcasa (Figura 15) necesario para el cálculo por MEF listo para ensamblar con el resto de componentes.

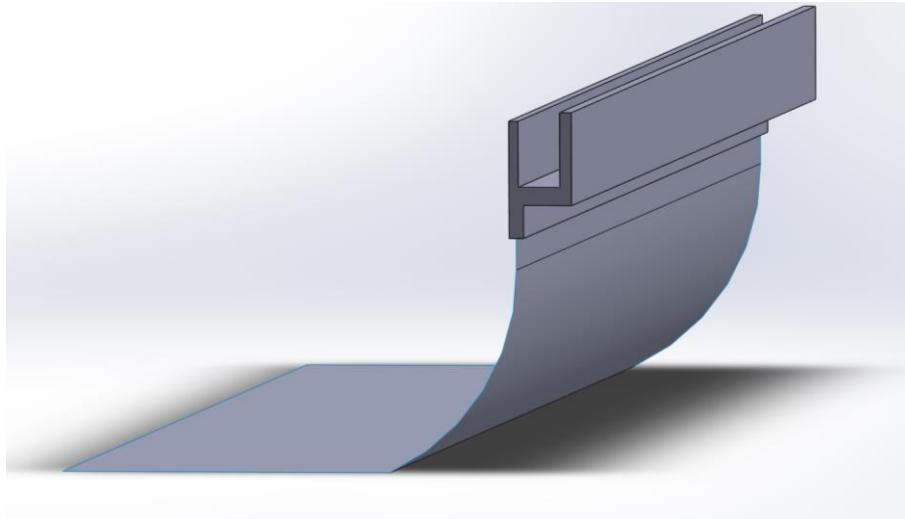


Figura 15 Elemento carcasa, dibujado en tipo Shell excepto la zona de la junta de cierre.

• Dibujo del Difusor

Para el dibujo del difusor, se comienza dibujando un croquis con la parte del nervio y la aleta que sobresale sobre la que apoya el clip ejerciendo la fuerza de cierre (Figura 16). Se observa que el nervio se ha dividido en dos zonas, esto se realiza para en la parte más estrecha y que está en contacto con la junta poder realizar un mallado distinto al general, más fino para así obtener unos mejores resultados.

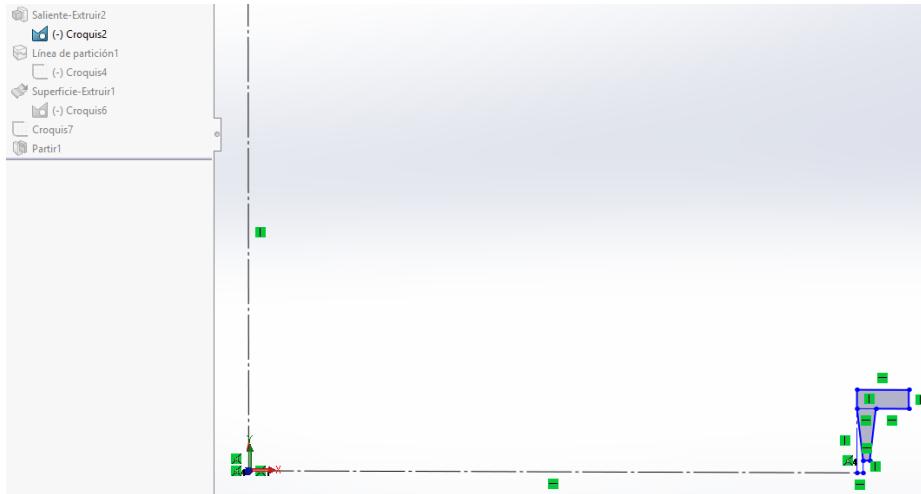


Figura 36 Croquis de la parte del nervio y apoyo del difusor en la carcasa

A continuación, se extruye el croquis con la misma longitud de 264.8mm de la carcasa. Sobre la parte superior se dibuja un croquis que constará de una línea que servirá de línea de partición para la Shell, que formará el resto del cuerpo del difusor, así como dos rectángulos que representan las zonas de apoyo del clip sobre los que se ejerce la fuerza. Es necesario dibujar estos dos rectángulos, pues se extruyen unas centésimas de

milímetro y así el programa detecta la zona sobre la que aplicar la fuerza del clip (Figura 17).

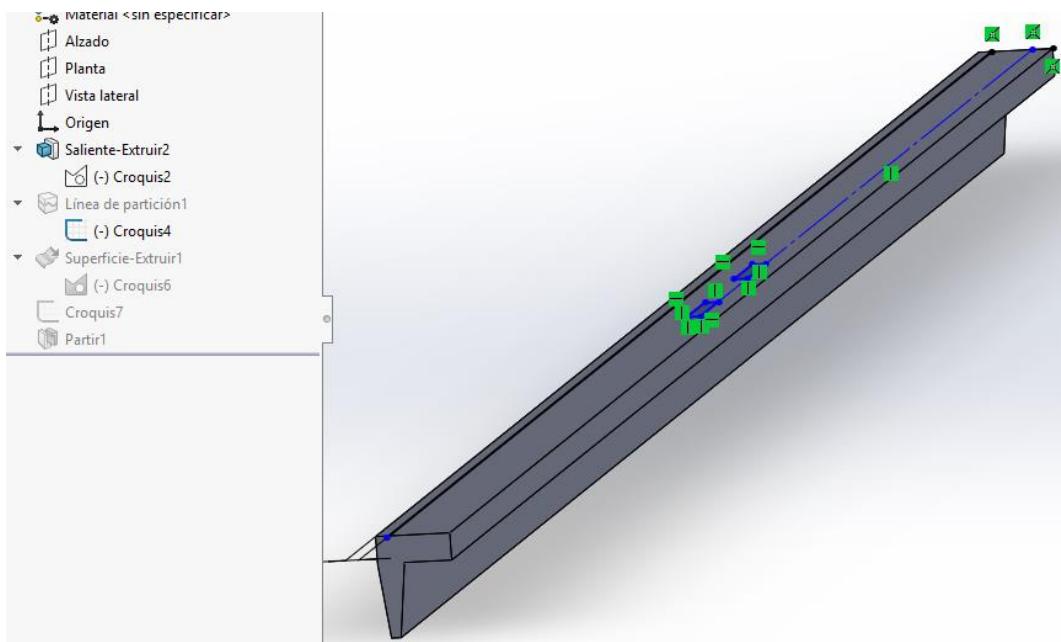


Figura 17 Croquis de la línea de partición para la Shell y para las zonas de apoyo del clip

No obstante, al final se ha determinado continuar el resto de casos sustituyendo las dos zonas de apoyo del clip por una sola continua (Figura 18), ya que se considera que se asemeja más al reparto real de la fuerza que experimenta el difusor por la acción del clip.

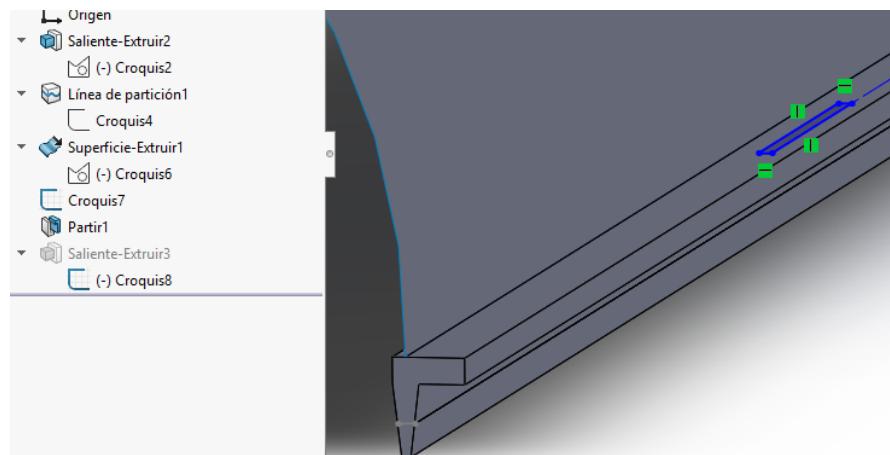


Figura 18 Croquis con zona de apoyo continua del clip

Posteriormente se dibuja el croquis para extruir la Shell (Figura 19).

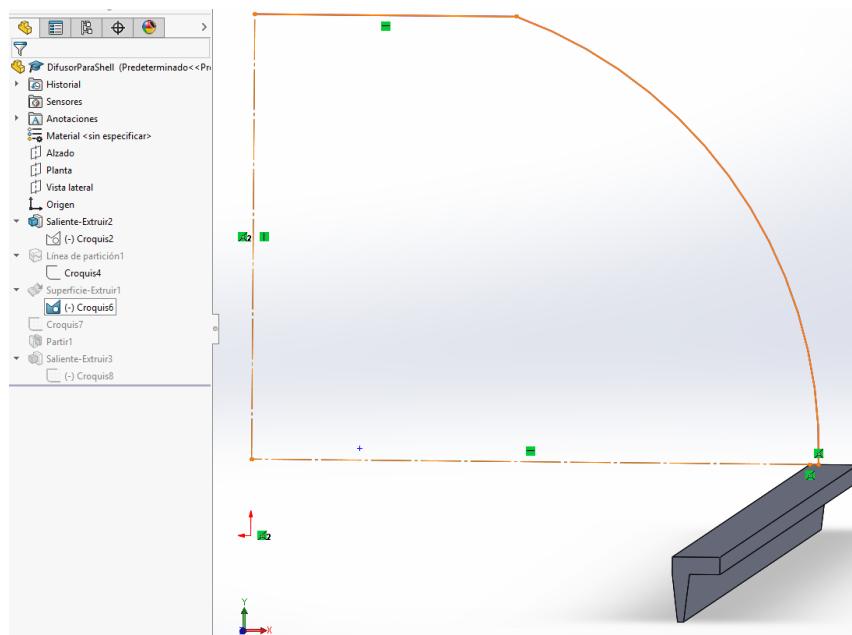


Figura 19 Croquis para extrusión de la Shell del difusor

Aquí se observa la acción partir que se utiliza para dividir el nervio del difusor en dos partes y así poder realizar posteriormente un mallado distinto y más fino en la zona inferior (Figura 20).

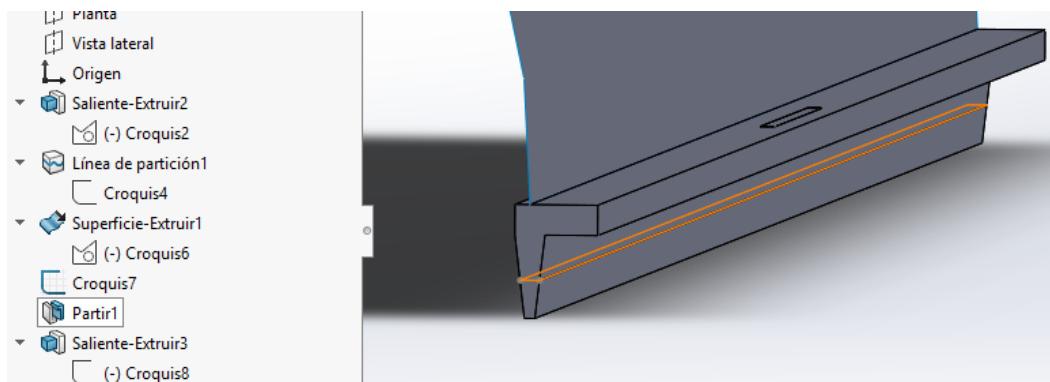


Figura 20 Acción partir sobre el croquis para dividir el nervio en dos zonas

Finalmente, con la extrusión de la shell queda dibujado el componente difusor (Figura 21)

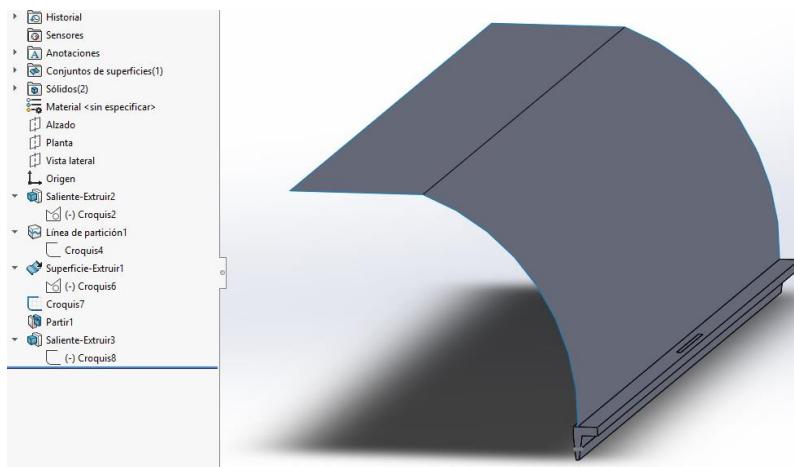


Figura 21 Dibujo finalizado del componente difusor

• Dibujo de la junta

De la misma manera que se ha procedido para los dibujos anteriores se procede para la junta, dibujando el croquis y extruyendo.

Los detalles importantes en el desarrollo de este elemento, aparentemente simple, son que puesto que las caras laterales de la junta sólo están pegadas en el interior del hueco de la carcasa hasta la mitad de su altura. Para poder representar estas condiciones en el programa se ha hecho que la mitad superior de las paredes laterales de la junta estén retranqueadas unas centésimas de milímetro, lo cual no afecta al cálculo en cuanto a la geometría, pero si en las condiciones de contorno entre componentes ya que permite que la zona superior de las caras laterales de la junta no esté en contacto directo con el difusor. (Figura 22).

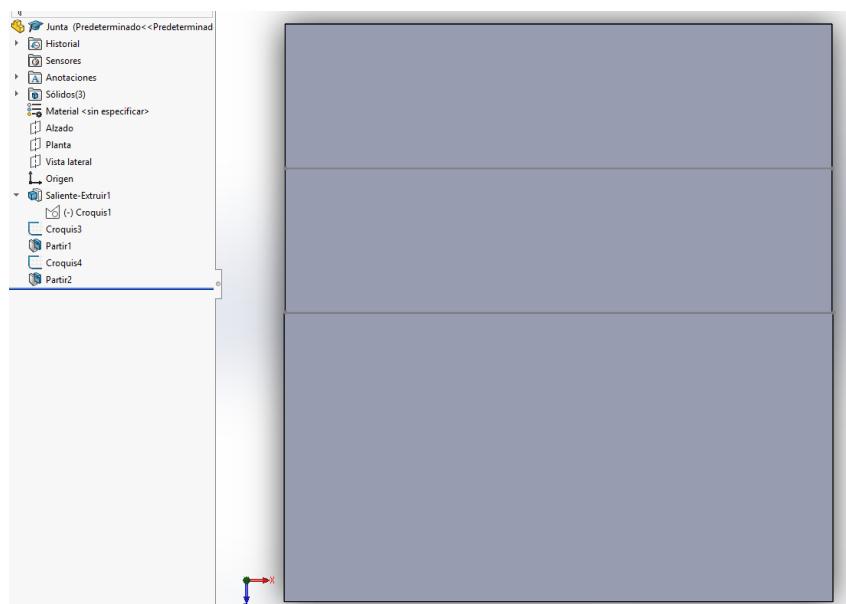


Figura 22 Frontal de la junta retranqueada su mitad superior unas centésimas de milímetro

Además, se ha hecho una partición a lo largo de la junta en tres alturas del croquis a extruir. Esto se ha hecho con la misma finalidad que en el nervio del difusor, ya que es la zona más afectada por la deformación, y objeto de estudio; de esta manera se pueden realizar tres mallados diferentes (Figura 23). Más fino el mallado cuanto más cerca está de la zona de contacto con el nervio del difusor.

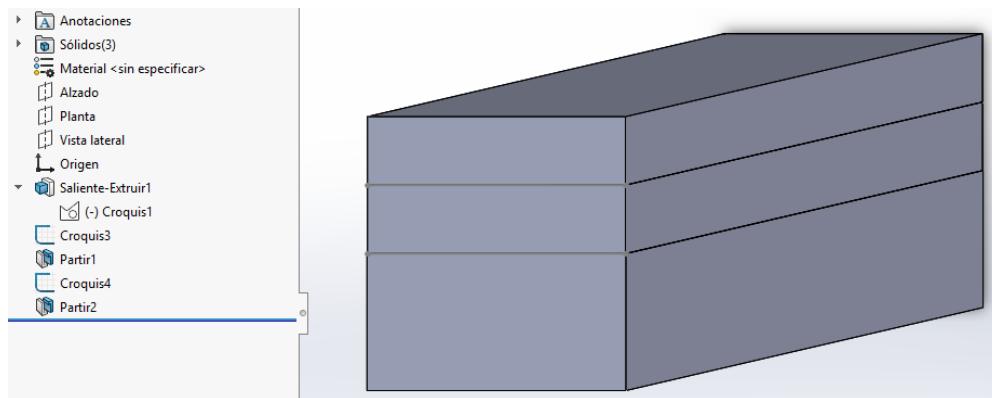


Figura 23 Partición de la junta en tres zonas diferentes

6.3 Ensamblaje de los componentes y posición relativa entre los mismo

Se procede a abrir un archivo SolidWorks nuevo y clicar en el icono ensamblaje; se van añadiendo las diferentes piezas o componentes dibujados, y se podrán colocar más o menos cerca entre ellos.

Una vez que se tiene los tres se van escogiendo las relaciones de posición entre componentes hasta que finalmente queda el ensamblaje en el punto de partida óptimo para el posterior cálculo.

Las relaciones de posición para que quede realizado el ensamblaje son:

- Hacer coincidir la cara superior de la junta con la cara inferior del nervio (Figura 24).

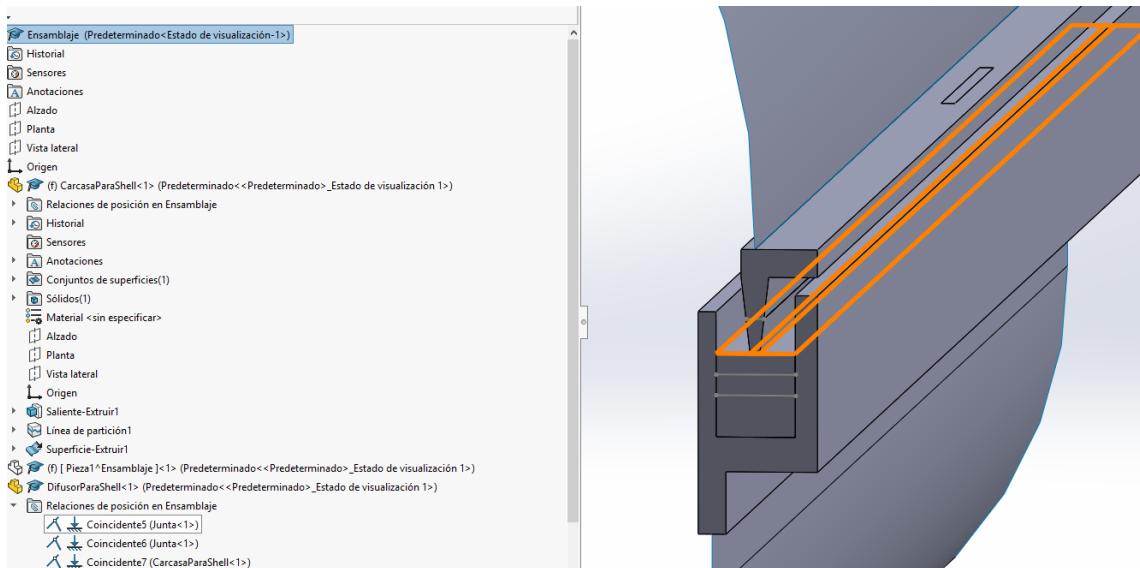


Figura 24 Cara superior de la junta coincidente con la inferior del nervio.

- Hace coincidentes también las caras extremas de junta y difusor para alinear los componentes (Figura 25).



Figura 25 Caras de los extremos de junta y difusor coincidentes.

- También se hacen coincidentes las caras laterales del nervio exterior de la carcasa y de la aleta de apoyo del difusor (Figura 26).

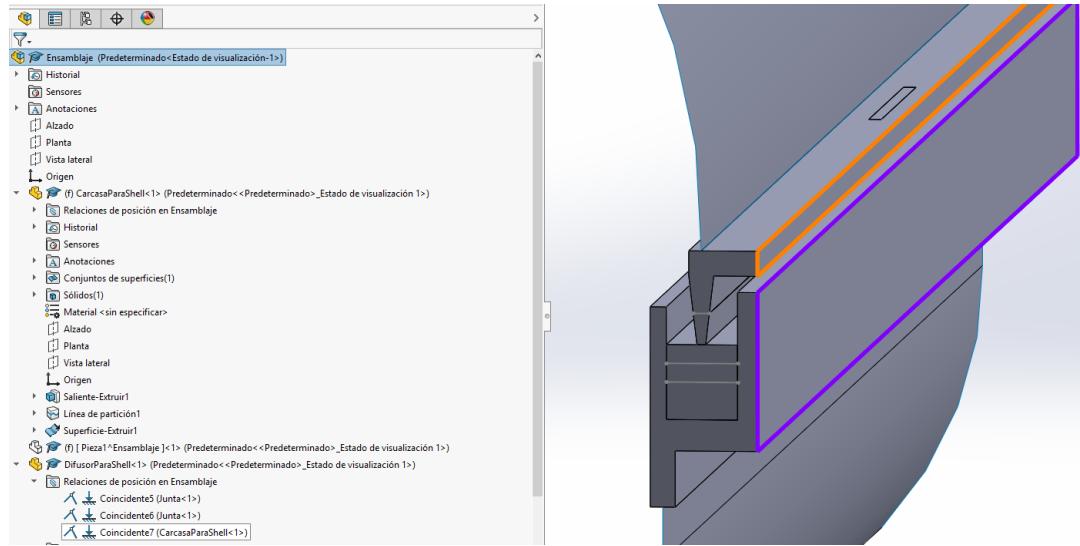


Figura 26 Caras laterales del nervio exterior de la carcasa y de la aleta del difusor coincidentes.

Finalmente, el ensamblaje debe quedar de la siguiente manera con las caras determinadas coincidentes dejando algo más de un milímetro de distancia para el contacto entre carcasa y difusor (Figura 27), el cual se producirá posteriormente al final del cálculo después de aplicar la fuerza de clipado.

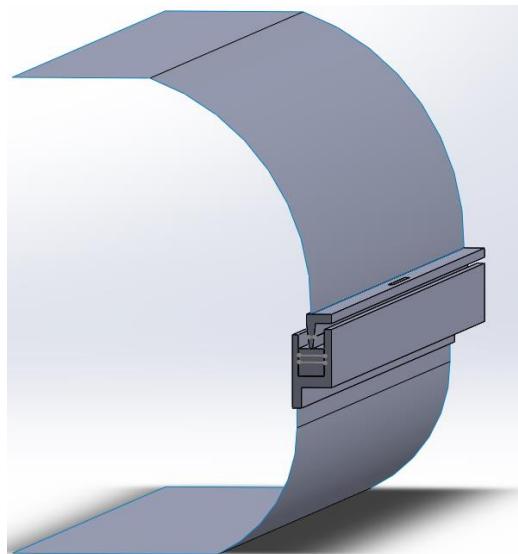


Figura 27 Ensamblaje final

6.4 Definición de los Materiales de los componentes

Se continúa definiendo el material de cada uno de los componentes, para ello se clica en cada uno de los nombres de los componentes con el botón derecho y en el desplegable sobre editar material. A continuación, se muestra cada uno de los materiales definidos en el caso de partida para cada uno de los componentes del ensamblaje, la carcasa (Figura 28), el difusor (Figura 29) y la junta (Figura 30). Aunque no se aprecie en las figuras el material elegido también se ha aplicado a las shell correspondiente de cada componente.

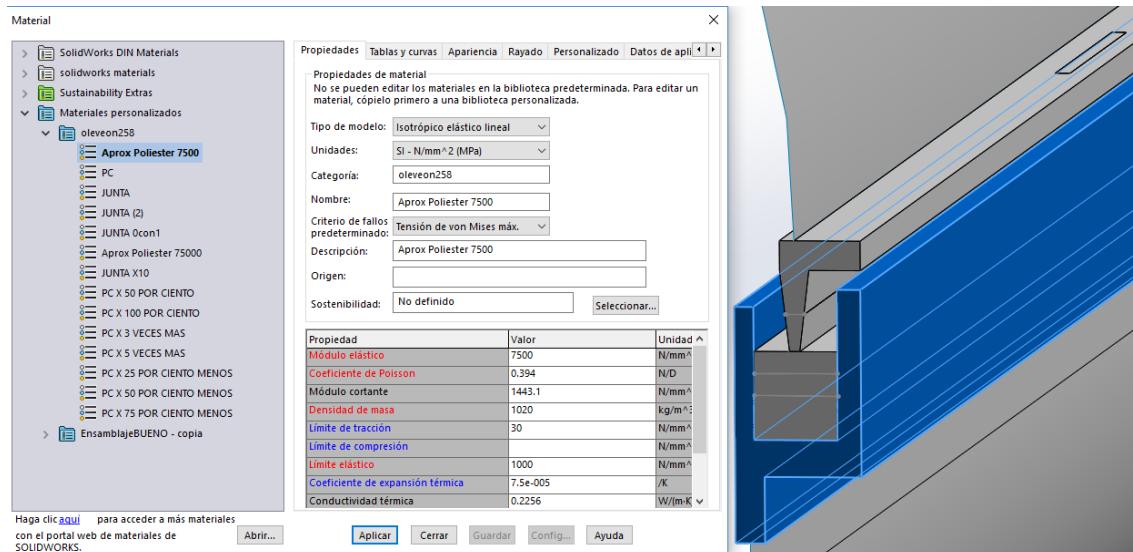


Figura 28 Definición de material para la carcasa

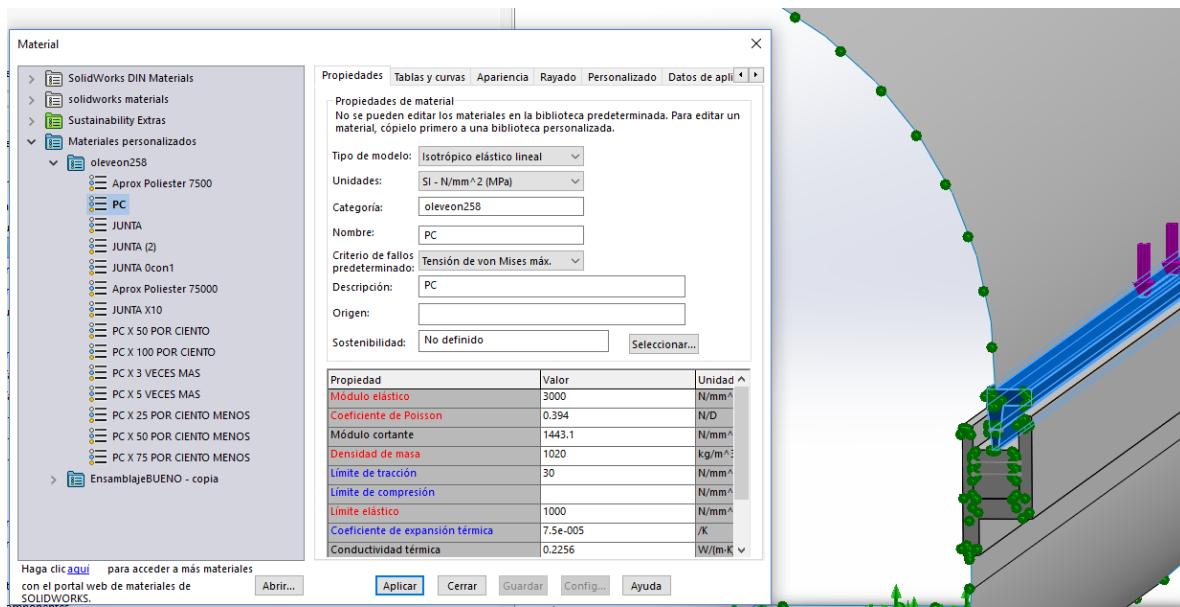


Figura 29 Definición de material para el difusor

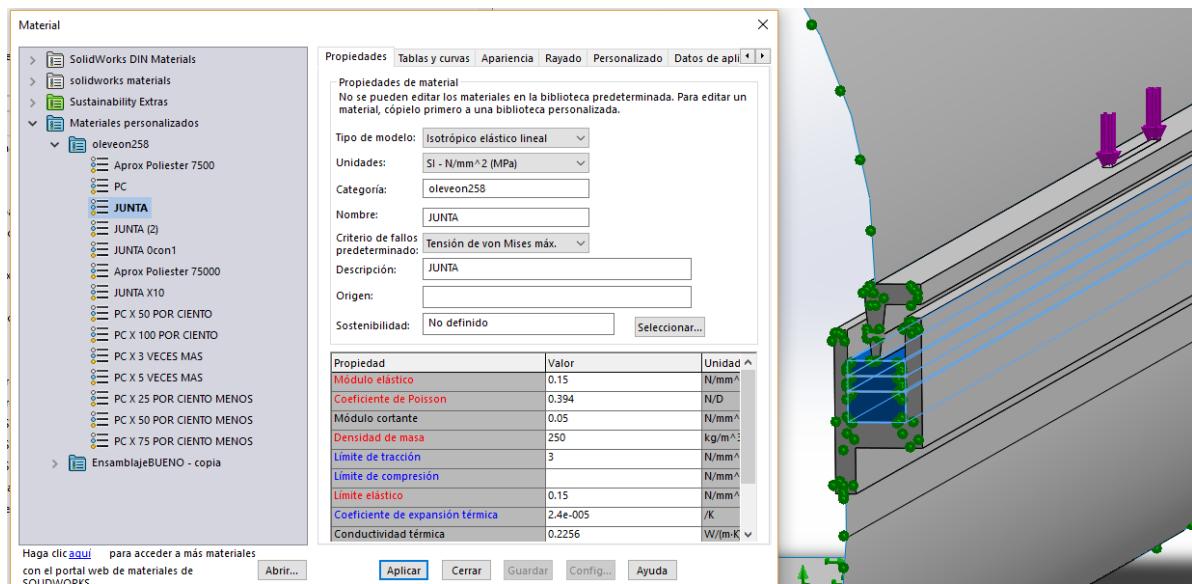


Figura 30 Definición de material para la junta

6.5 Definición del Contacto entre componentes (Conexiones)

Acudiendo al Asesor de conexiones, clicando en el desplegable en Conjunto de contactos y en Contacto entre componentes, se van eligiendo los diferentes tipos de contacto (Figura 31).

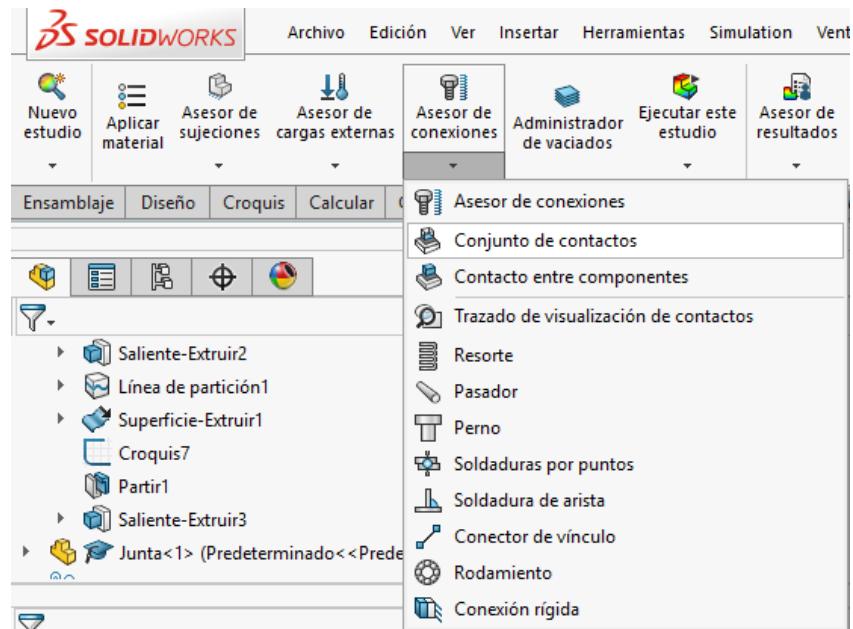


Figura 32 Desplegable de Asesor de conexiones

En Conjunto de contactos se elige el contacto entre diferentes caras de los componentes. Eligiendo entre unión rígida cuando sea componentes que en la realidad irán pegados y los cuales sus caras han de estar en contacto, como es lógico, caso de las caras de la junta con la zona de la carcasa donde se alberga. Y unión sin penetración, para caras en contacto o no, las cuales no irán pegadas en la realidad, pero si se establece que en el momento que se establezca un contacto entre ellas por la acción de las fuerzas de clipado estas no pueden penetrar una en la otra (Figura 33).

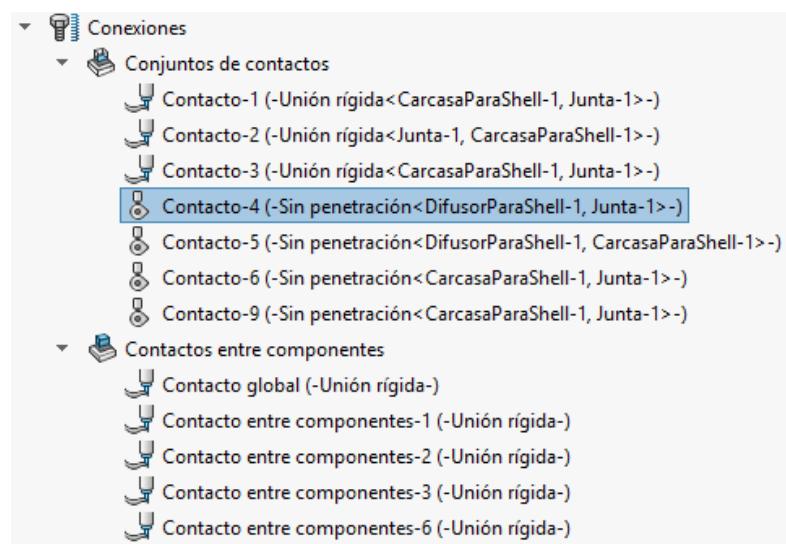


Figura 33 Conjunto de contactos y Contactos entre componentes

Se puede observar, por ejemplo, en el contacto entre la parte superior de la junta y la parte inferior del nervio del difusor, para las cuales se elige en cada recuadro el conjunto de caras, y en tipo sin penetración (Figura 34).

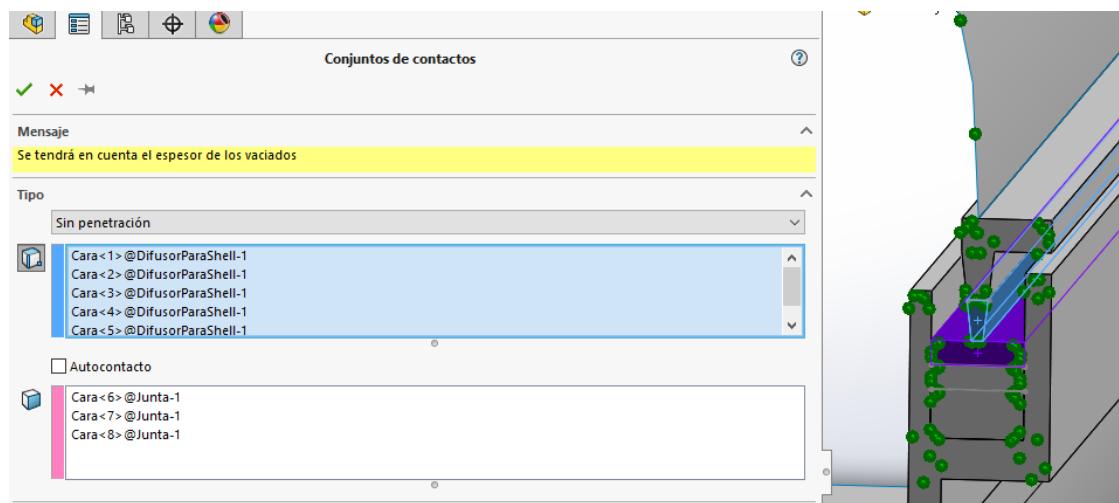


Figura 34 Contacto parte inferior del nervio y superior de la junta.

6.6 Definición de las Condiciones de Contorno

Para definir las condiciones de contorno se determinarán las sujeciones del ensamblaje, así como las cargas externas que le afectan.

- Sujecciones**

Para definir las sujeciones se clica en el ícono de Asesor de sujetos y se abre el siguiente desplegable (Figura 35):



Figura 35 Desplegable de Asesor de sujetos

Se clica en geometría fija y se selecciona la cara inferior de la carcasa, la cual en la luminaria real irá anclada al techo o la pared, y por tanto, no podrá tener desplazamientos (Figura 36).

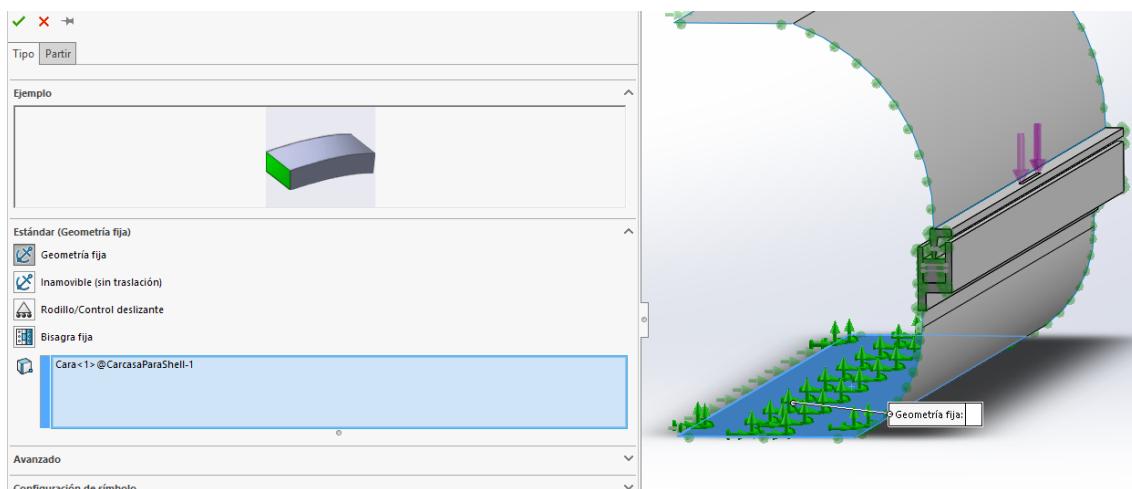


Figura 36 Selección de geometría fija para la cara inferior de la carcasa.

Ahora seleccionando en sujeciones avanzadas se definen las diferentes simetrías que tiene el ensamblaje. Se definen impidiendo el desplazamiento en las direcciones adecuadas para simular dicha simetría. Hay en dos direcciones:

- La que va longitudinal dividiendo el ancho de la carcasa y el difusor en dos.
- Las simetrías transversales, situadas a cada extremo de los componentes, y que permiten que sólo se dibuje el apoyo del clip y la mitad de su zona de influencia a cada lado.

Mostrando un ejemplo de cada una, la longitudinal seleccionada en la parte de la carcasa sería la mostrada en la figura 37.

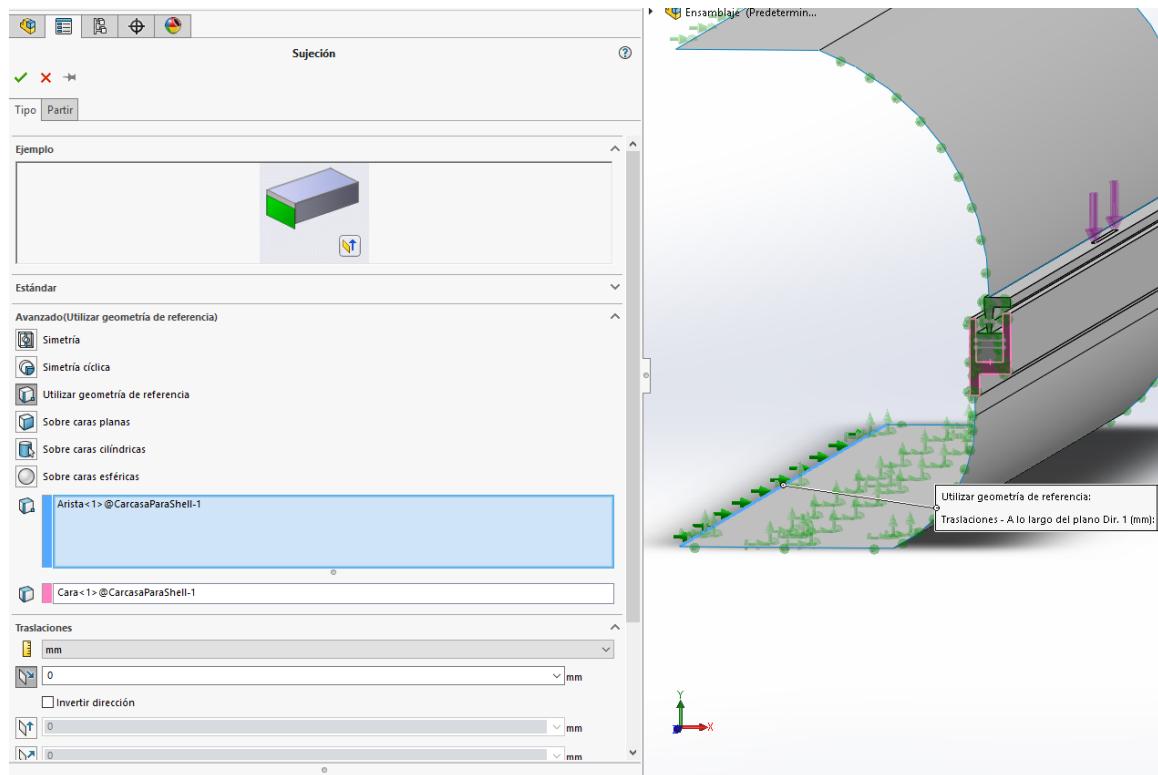


Figura 37 Sujeción avanzada en la línea longitudinal inferior de la shell de a carcasa

Una simetría transversal sería la mostrada seleccionando la cara del extremo de la carcasa y las aristas del mismo extremo que forman su shell, impidiendo el desplazamiento en la dirección indicada (Figura 38).

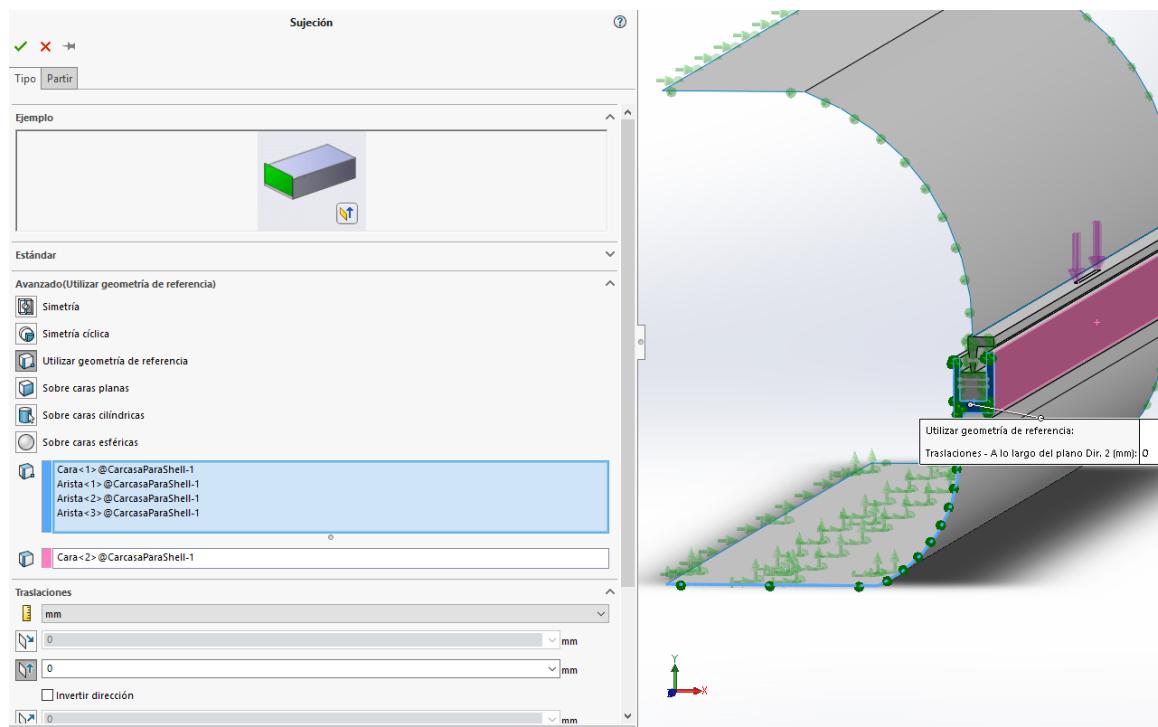


Figura 38 Sujeción avanzada en uno de los extremos de la carcasa

• Cargas Externas

Se clica en el icono del Asesor de cargas externas, abriendo el desplegable y se selecciona Fuerza (Figura 39).

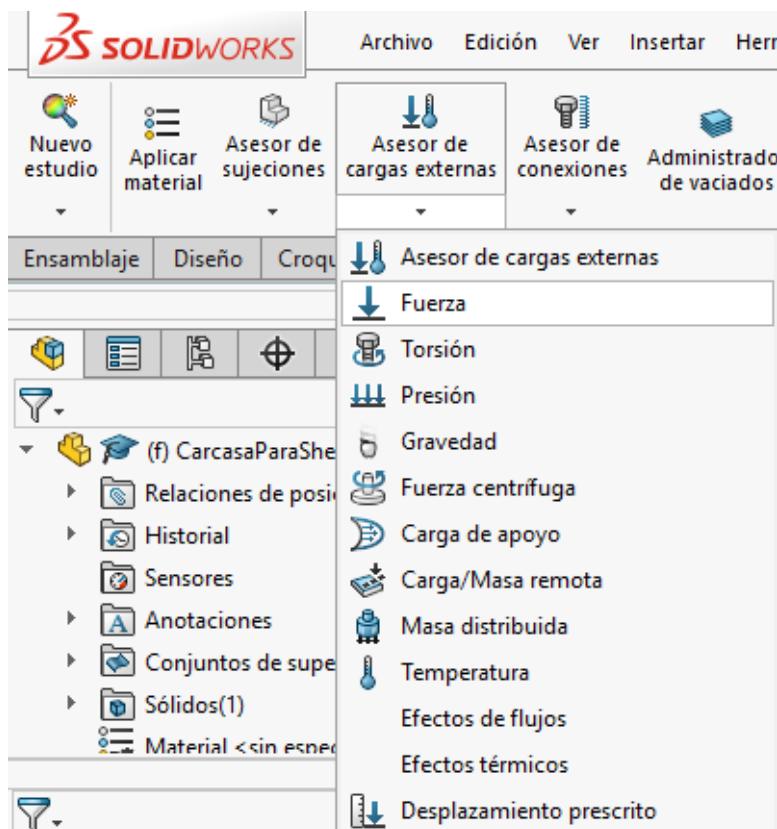


Figura 39 Desplegable del Asesor de cargas externas

Una vez clicado sobre fuerza, se selecciona la cara de la zona que se extruyó unas centésimas de milímetro sobre un croquis dibujado para aplicar la fuerza correspondiente al clip. Y se escribe abajo la magnitud de 30 en Newtons (Figura 40).

La fuerza del clip se representa en su totalidad en la zona del difusor, aunque en la realidad el clip ejerce fuerza tanto en este como en la carcasa. La razón de representarlo así, es debido a que el material de la carcasa tiene un módulo elástico mayor y no experimenta apenas deformación.

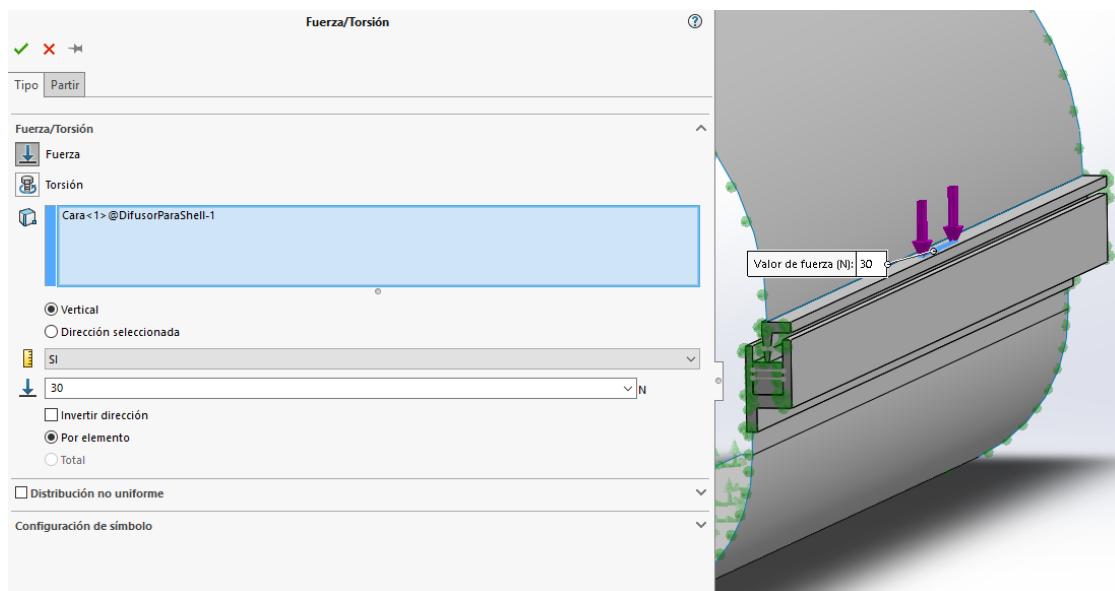


Figura 40 Selección de una fuerza aplicada sobre una cara

Finalmente, con las condiciones de contorno seleccionadas el ensamblaje quedará definido de la manera siguiente (Figura 41). Y lo que representará en el momento del cálculo será la fuerza vertical hacia abajo de los 30 N, aplicada en la cara seleccionada. Además, debido a las sujeciones no podrá desplazarse longitudinalmente ni transversalmente en las zonas marcadas, teniendo restringido el movimiento a vertical.

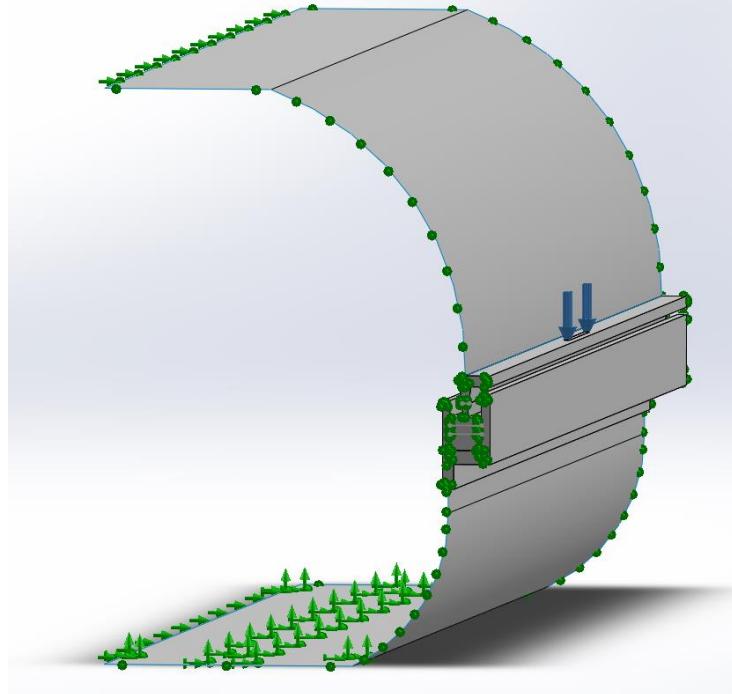


Figura 41 Ensamblaje mostrando las sujeteciones y cargas externas aplicadas

6.7 Mallado

Para mallar y posteriormente realizar los cálculos se hace sobre un análisis estático. Se podría hacer un análisis no lineal, en especial por el material de la junta, del cual se espera un comportamiento de este tipo. No obstante, como se demostró en un Proyecto Final de Carrera anterior, realizado en el mismo laboratorio, por Samuel Lorenz García, el comportamiento de la junta se puede linealizar utilizando como dato del módulo elástico 0.15 N/mm².

Partiendo de esta premisa y sabiendo que se realiza un análisis estático, se procede a explicar el proceso de mallado, el cual se realiza mediante elementos triangulares no cuadráticos.

Para una mayor exactitud de cálculo en las zonas de interés, las cuales son la zona más estrecha del nervio del difusor y su contacto con la zona más superficial de la junta, se realiza unos controles de malla para definir sus diferentes tamaños (Figura 42).

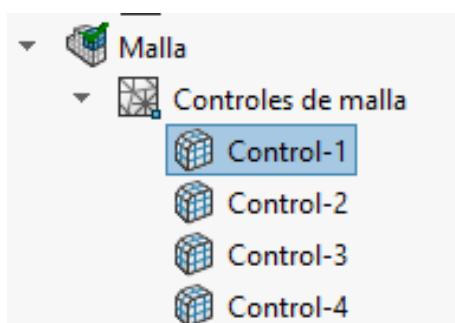


Figura 42 Diferentes controles de malla

Las zonas sobre las que elegir sus diferentes tamaños de malla ya han sido delimitadas anteriormente al dibujar cada uno de los elementos, como se ha explicado en su apartado correspondiente.

Para crear un tamaño de malla distinto al general, se clica sobre el control de malla creado y se selecciona el tamaño deseado. En este caso se puede observar, para el caso de partida, un tamaño de 0.32mm para la parte más superficial de la junta (Figura 43).

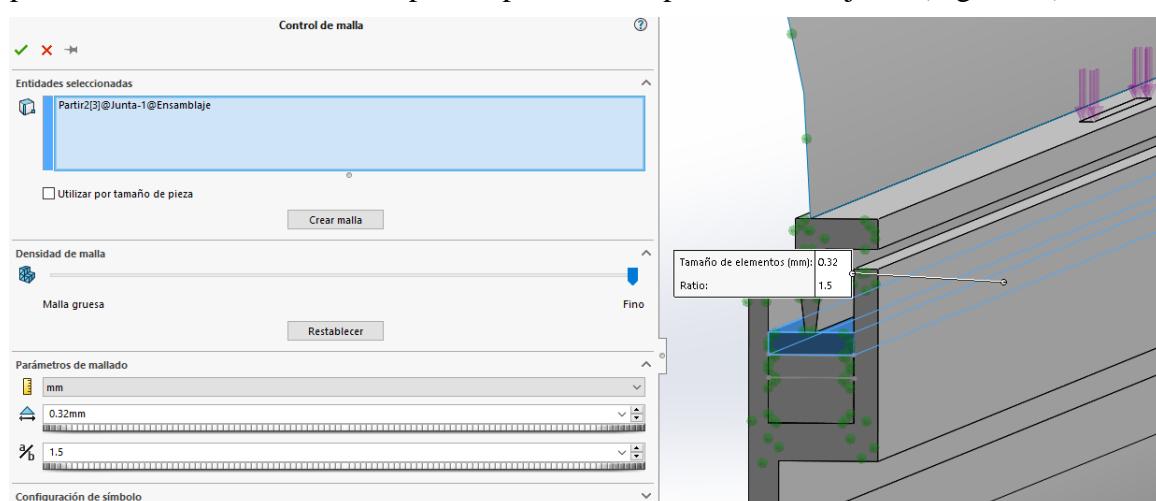


Figura 43 Control de malla de 0.32mm en la parte más superficial de la junta

Un tamaño de malla de 0.889mm para la zona intermedia de la junta (Figura 44)

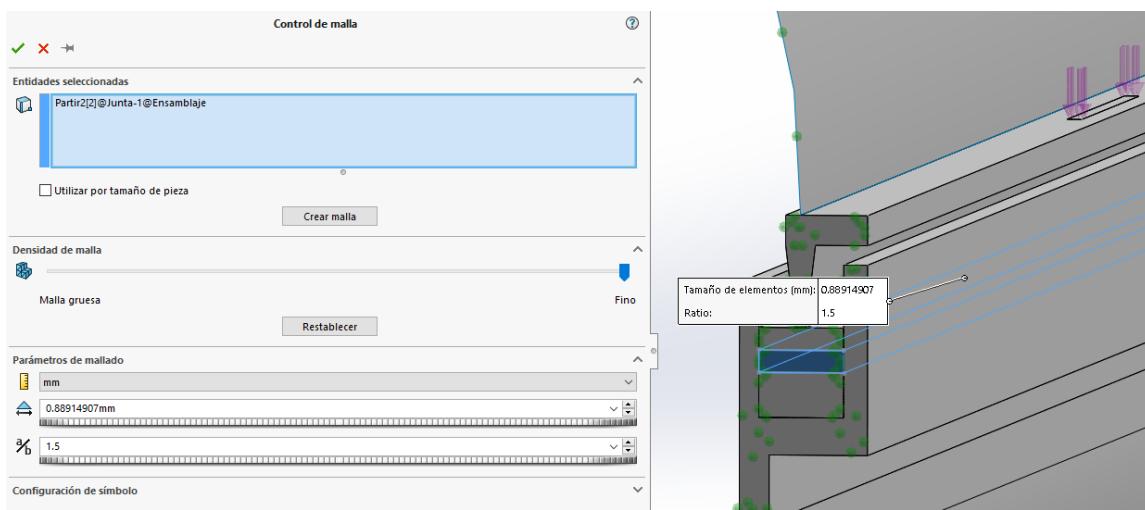


Figura 44 Control de malla de 0.889mm en la zona intermedia de la junta

Y otra vez un tamaño de malla de 0.32 mm en la parte más estrecha del nervio del difusor (Figura 45).

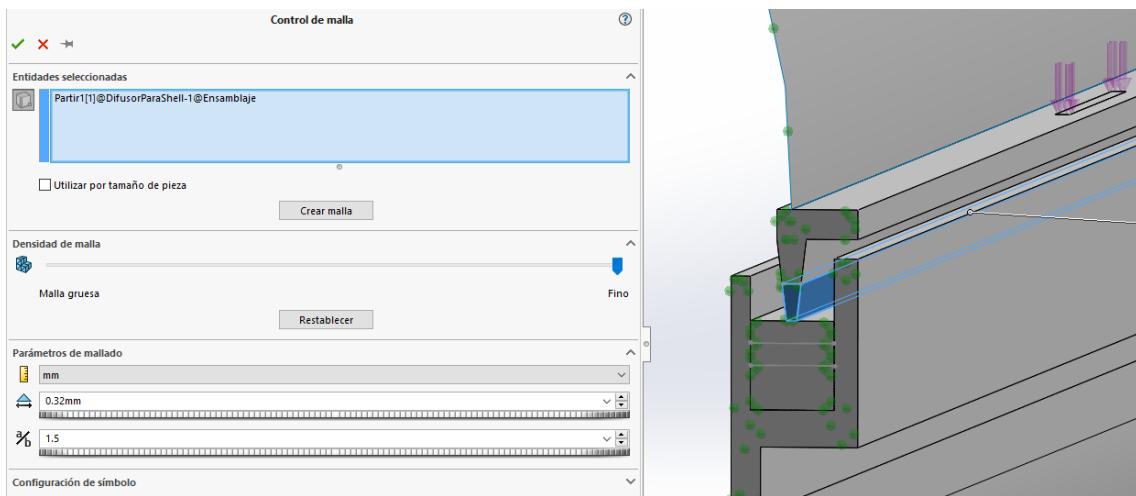


Figura 45 Control de malla de 0.32mm en la parte más estrecha del nervio del difusor

Quedando finalmente el ensamblaje completo mallado de la siguiente manera (Figura 46):

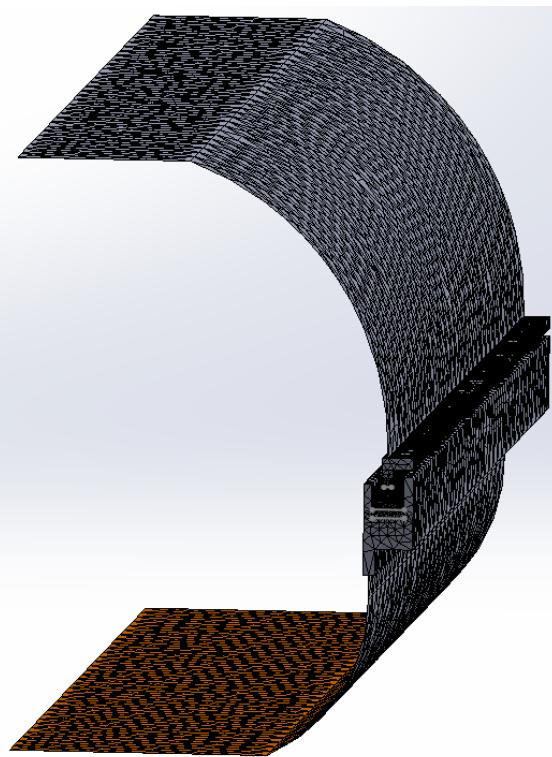


Figura 46 Ensamblaje completo mallado.

Y haciendo zoom sobre la zona de interés con sus diferentes controles de mallado (Figura 47):

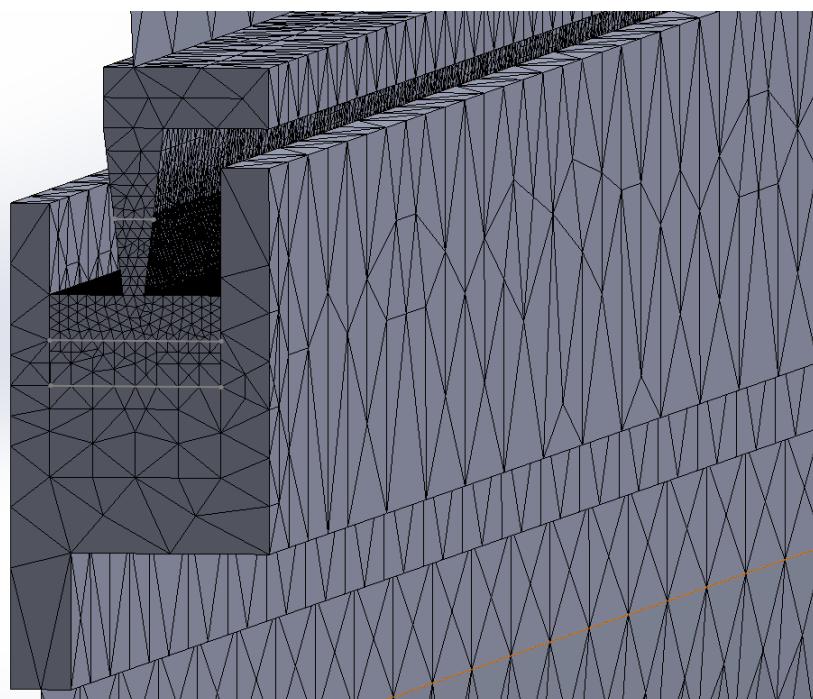


Figura 47 Zoom del mallado de la zona de la junta con sus diferentes zonas de control de mallado.

6.8 Obtención de Resultados

Finalmente, tras todo el proceso realizado en el programa SolidWorks, se procede a hacer el cálculo. Clicando con el botón derecho del ratón sobre el análisis estático creado y dentro del desplegable que aparece se le da a ejecutar (Figura 48).

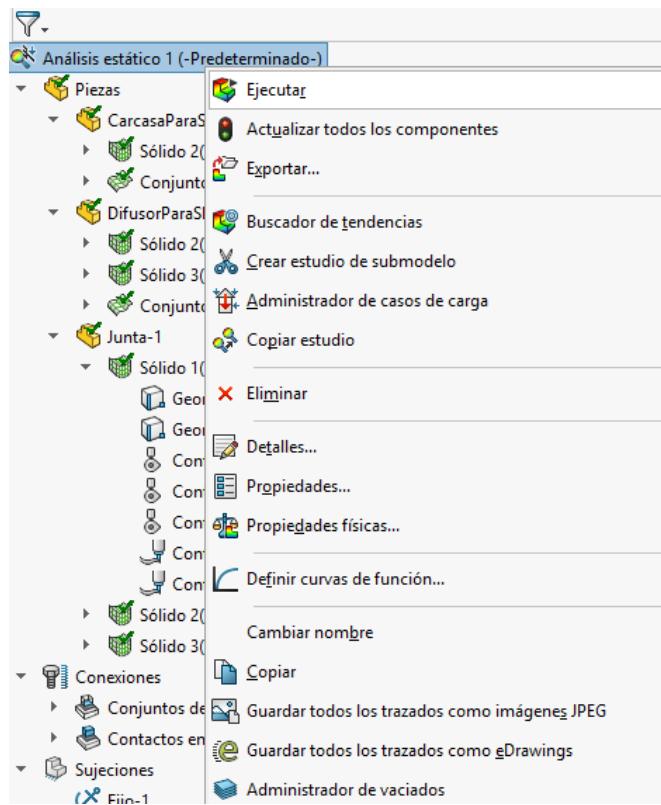


Figura 48 Desplegable de análisis estático, clicando en ejecutar.

Una vez finalizado el cálculo, se clica con el botón derecho del ratón sobre resultados y sale un desplegable. Se clica dentro de este sobre Definir trazado de desplazamientos y dentro de la pestaña que se crea se elige desplazamiento de Y. Se escogen desplazamientos, y en concreto en Y, porque son el objeto de interés (Figura 49).

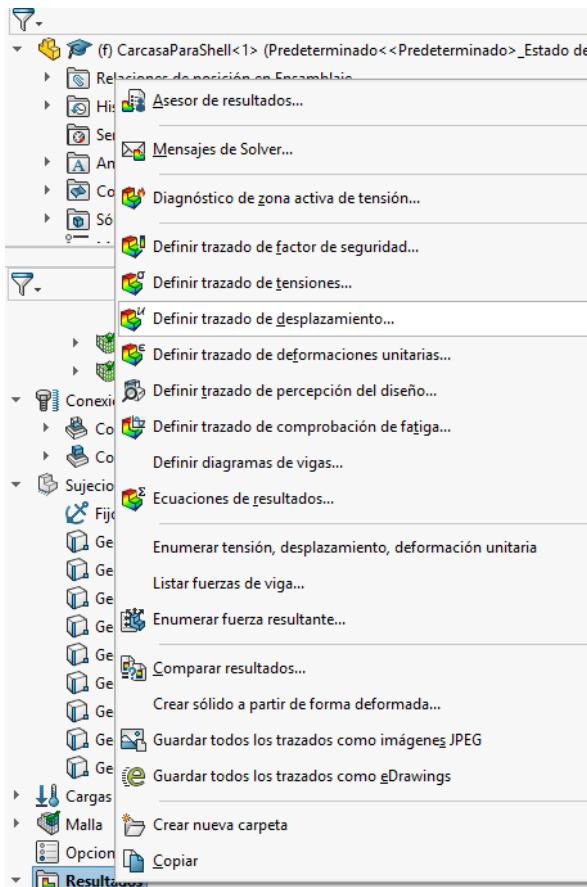


Figura 49 Desplegable de resultados, clicando sobre Definir trazado de desplazamientos.

A continuación, aparece el ensamblaje con un código de colores según los desplazamientos en Y y una leyenda para interpretarlos (Figura 50).

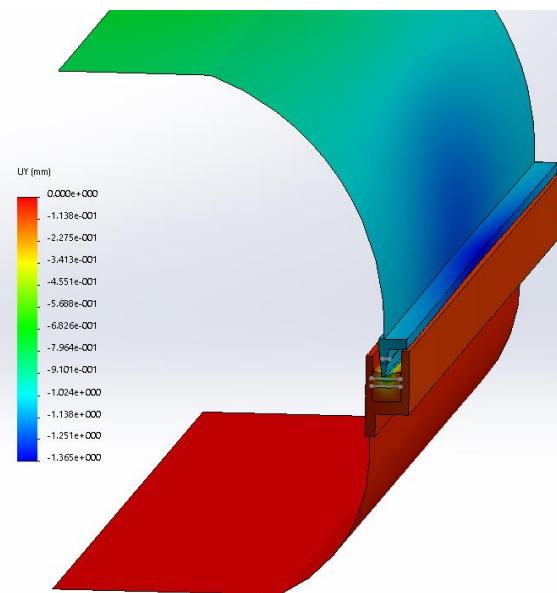


Figura 50 Ensamblaje con código de colores según desplazamientos en Y

En particular resulta de interés el máximo y mínimo desplazamiento en la arista exterior-inferior del nervio del difusor. Esta es una zona en contacto con la junta y de la que depende la estanqueidad de la luminaria. Para su obtención, se clica con el botón derecho del ratón sobre los desplazamientos en Y, sale un desplegable y sobre él se clica en Identificar valores (Figura 51).

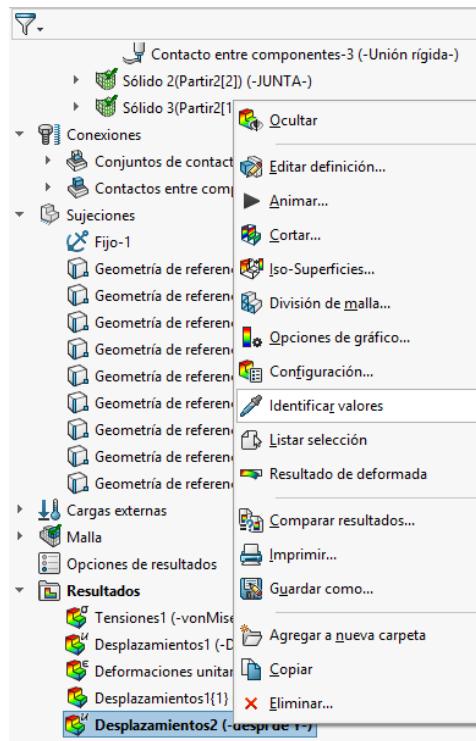


Figura 51 Desplegable de desplazamientos en Y, clicando sobre Identificar valores

Aparece una pestaña, y dentro de opciones se clica en En entidades seleccionadas, seguidamente se clica sobre la arista antes mencionada (arista exterior-inferior del nervio del difusor), y se clica sobre actualizar. A continuación, aparece una tabla con valores de desplazamiento de cada nodo de esta arista y un tabla resumen, que es la que resulta de especial interés. En ella se muestra el valor del máximo y mínimo desplazamiento de esta arista (Figura 52). Además, con la diferencia entre ellos se sabe la flecha máxima que alcanza el difusor en esta zona.

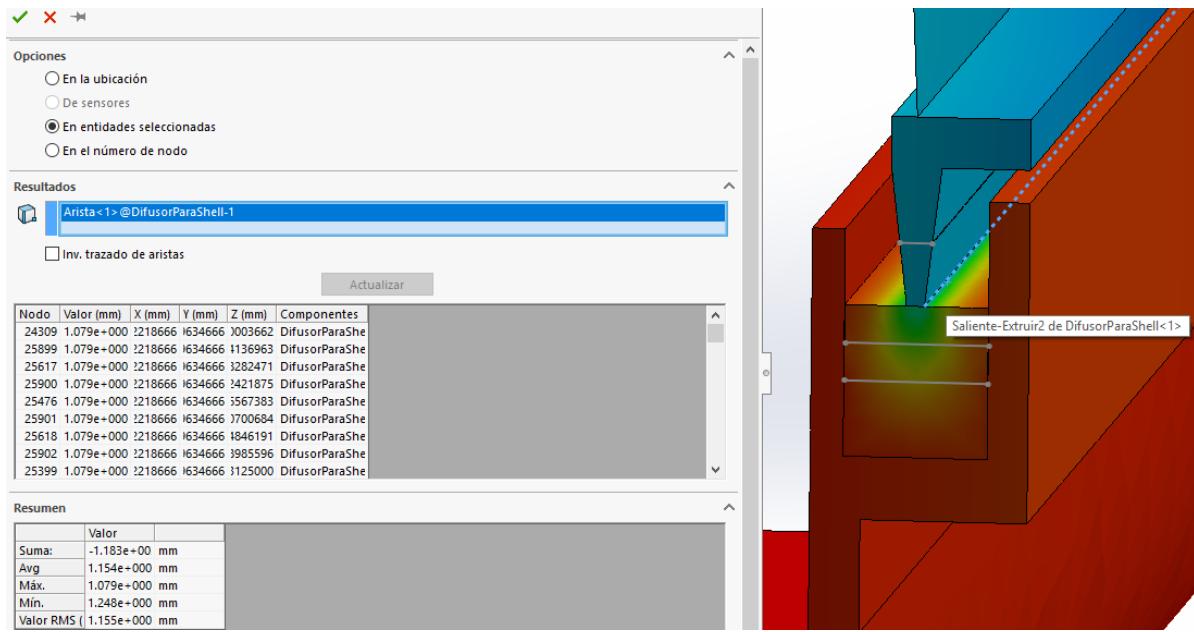


Figura 52 Pestaña de Identificar valores con tabla de resumen

7. Resumen de los parámetros y materiales para todos los casos analizados.

En cuanto a las condiciones generales que afectan al estudio se resumen:

- Todos los casos analizados se han realizado mediante análisis estático, pues como se ha comentado anteriormente, la junta que era el cuerpo con el material que sufría un comportamiento menos lineal, estaba estudiada de un TFG de años anteriores y se sabía que se podía asemejar a un comportamiento lineal en torno a 0.15 N/mm².
- Los zonas de elementos de mayor interés son aquellos para los cuales se ha realizado controles de malla. En especial, el control de malla 1, que comprende la zona más superficial de la junta, y el control de malla 4, que comprende la parte más inferior del nervio, la que es más estrecha. Es del contacto y sellado de estas zonas de las que depende la estanqueidad de la luminaria.

En principio los controles de malla eran de los siguientes tamaños:

- Control de malla 1: 0.32 mm
- Control de malla 2: 0.89 mm
- Control de malla 3: 1.8 mm
- Control de malla 4: 0.32mm

Tras analizar los mismos casos con un tamaño de malla superior y ver que los resultados apenas variaban, pero sí que se reducía considerablemente su tiempo de cálculo y el espacio ocupado, se optó por los siguientes tamaños de los controles de malla:

- Control de malla 1: 0.5 mm
- Control de malla 2: 0.98 mm
- Control de malla 3: 1.8 mm
- Control de malla 4: 0.5 mm

- En cuanto a los materiales utilizados y sus características son los mostrados a continuación:

Tabla 2 Tabla de características de materiales

Características del material	1	2	3	Unidades
Pieza del ensamblaje	Carcasa (verkid pg16-h150)	Difusor	Junta Rakupur 31-3135	
Módulo de elasticidad en X	7500	3000	0.15	Mpa
Coef de Poisson en XY	0.394	0.394	0.394	-
Módulo cortante en XY	2690.1	1443.1	0.05	Mpa
Densidad de masa	1780	1020	250	Kg/m3
Límite elástico	100	1000	0.15	Mpa

Las variaciones en los materiales utilizadas en algunos de los casos son tan sólo aumento o disminución en el porcentaje del módulo de elasticidad.

- Las medidas generales, a partir de las cuales se realizan las variaciones en los casos, son las especificadas en la descripción del modelo a estudiar similar al Oleveon 2x18.

Un resumen de los parámetros objeto de variación son:

- Distancia de apoyo entre clips = 264.8 mm
- Altura del difusor = 51.28mm
- Anchura de la luminaria (difusor sin los apoyos)= 129 mm
- Radio del difusor = 53 mm
- Grosor del difusor = 2 mm

8. Resumen de resultados de los casos y conclusiones a partir del análisis mediante SolidWorks.

A continuación, se realiza un resumen de los diferentes casos estudiados y los resultados obtenidos. En los anexos, apartado 2 se encuentran las fichas con los datos e imágenes de todos los casos calculados mediante SolidWorks

• Casos 1.1, 1.2 y 1.3

En el caso 1.1, el apoyo del clip se representa sobre dos superficies de 1x8mm separadas 12.8 mm, frente al caso 1.2 en el que el apoyo del clip sobre el difusor se representa sobre una única zona continua de 1x 28.8mm. Esto se traduce en que en el segundo caso hay unos mayores desplazamientos tanto mínimo como máximo, así como una mayor flecha. No obstante, la diferencia no es relevante. Aún así, se opta por continuar con la zona de apoyo continua del clip sobre el difusor, ya que se considera más representativa del caso real.

Con respecto al caso 1.3, se basa en el 1.2, con el apoyo continuo, pero con un modelo de malla más grueso. Siendo sus respectivos controles de malla:

Caso 1.1 y 1.2:

- Control de malla 1 y 4 de tamaño 0.32 mm
- Control de malla 2 de tamaño 0.89 mm
- Control de malla 3 de tamaño 1.8 mm

Caso 1.3:

- Control de malla 1 y 4 de tamaño 0.5 mm
- Control de malla 2 de tamaño 0.98 mm
- Control de malla 3 de tamaño 1.8 mm

Como se puede observar el control de malla más grueso del caso 1.3 da unos resultados muy similares al 1.2, pero con tiempo de cálculo de unos 7 min frente a los 52 min y 48 segundos del caso 1.2. Además, el espacio de almacenamiento para el caso 1.2 es de 1.5 gigabytes, frente a los 0.5 gigabytes que ocupa el caso 1.3. Lo cual hace que a partir de aquí se proceda a realizar los cálculos con dichos controles de malla más gruesos.

Anteriormente, aunque no se muestran todos los casos pues los más relevantes son estos dos finales, se han realizado más pruebas para decidir el tamaño de los controles de malla.

• Caso 2.1

Se puede observar en este caso que al aumentar la fuerza del clip de 30 N a 40 N, se produce un mayor desplazamiento tanto mínimo como máximo, tal cual era de esperar.

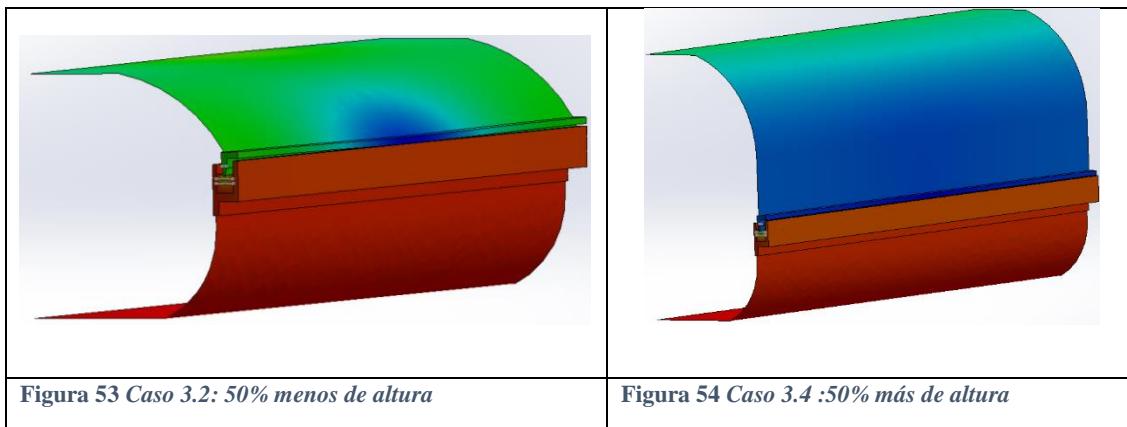
- **Casos 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 (Variaciones en la altura del difusor en su zona vertical)**

En estos casos se estudia cómo influye en el desplazamiento del nervio del difusor sobre la junta dependiendo de la variación de altura de la zona vertical del difusor.

Siendo la altura del difusor de caso 1.3 (tomado como referencia al considerar malla más gruesa y apoyo continuo del clip) de 51.28mm, en cada uno de los casos se realiza la siguiente variación:

- Caso 3.1: 25% menos de altura
- Caso 3.2: 50% menos de altura
- Caso 3.3: 25% más de altura
- Caso 3.4 :50% más de altura

A continuación se muestran algunos ejemplos para ilustrar (Figuras 53 y 54):



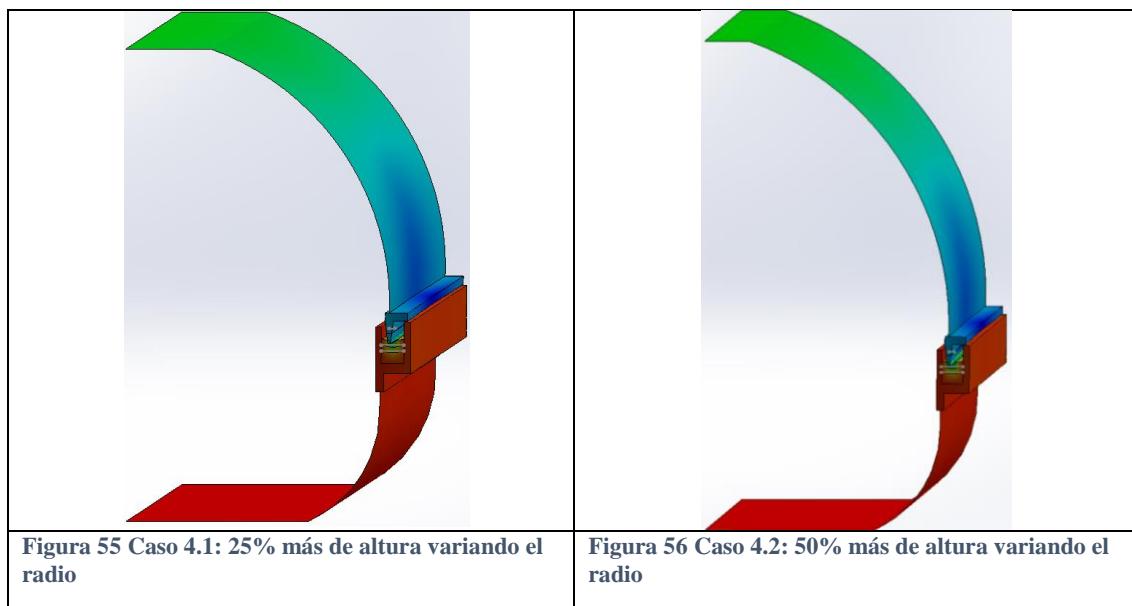
Se observa que en el caso 3.1, esa reducción de altura, implica una pérdida de inercia, lo cual provoca una mayor flecha pasando de -0.177 mm a -0.419 mm. Además, en la zona de apoyo del clip se puede observar que apenas varía el desplazamiento producido, teniendo este una gran variación en el punto más alejado del apoyo del clip, donde pasa de un desplazamiento de -1.087 a -0.868 mm.

En el caso 3.2, donde aún se disminuye más la altura del difusor, se acentúa de mayor manera lo antes comentado, la flecha aumenta hasta los 0.633mm. Y disminuyendo el desplazamiento en la zona más alejada del apoyo del clip hasta los -0.673mm. En conclusión, el continuar disminuyendo la altura, repercutiría en la perdida de estanqueidad de la luminaria debido al continuo menor desplazamiento vertical en las zonas más alejadas del clip.

En los casos 3.3 y 3.4 se puede observar, como era de esperar, el efecto contrario en la flecha al sucedido disminuyendo la altura. En estos casos, la mayor altura proporciona una mayor inercia, reduciéndose así la flecha hasta los 0.0294 en el caso de un aumento del 50% de la altura del difusor. No obstante, se observa, que así como en el aumento del 25% sí que aumentan los desplazamientos de la zona más alejada del clip, en el 50% estos ya cambian la tendencia y disminuyen; aunque la flecha continua disminuyendo como hacia antes. En consecuencia, un aumento de altura puede ser adecuado, pero habrá que buscar un punto óptimo.

- **Casos 4.1 y 4.2 (Variaciones en la altura del difusor variando el radio)**

En los casos 4.1 y 4.2 se varía la altura a partir de la variación del radio, en ambos casos se aumenta la altura, en un 25% y 50% respectivamente (Figuras – y -). Esto no supone un cambio considerable en los desplazamientos mínimo y máximo, no obstante, se aprecia que la flecha se va reduciendo de 0.177mm en el caso 1.3, a 0.147mm en el caso 4.1 y finalmente a 0.126mm en el caso 4.2. Ello es debido al aumento de inercia. (Figuras 55 y 56).

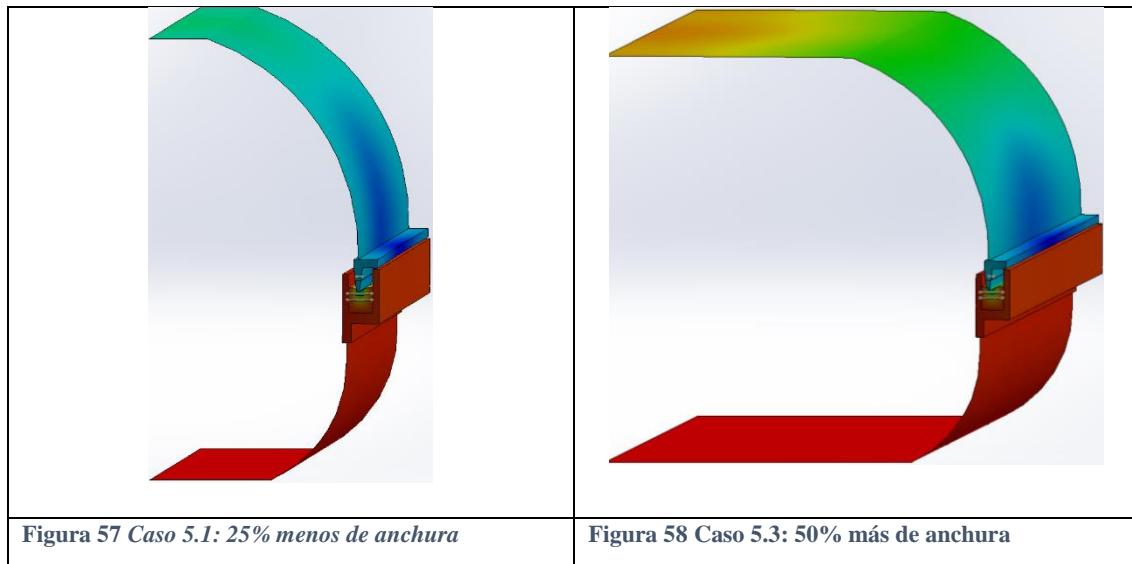


- **Casos 5.1, 5.2 y 5.3 (Variaciones en la anchura)**

En estos casos, por orden, se reduce un 25% la anchura modificando la parte horizontal del difusor, en el siguiente se aumenta un 25% y finalmente un 50%.

Se puede observar como al disminuir la anchura, aumentan los desplazamientos y la flecha. Así como, al aumentar el 25% de la anchura, disminuyen los desplazamientos y la flecha; sin embargo, al disminuir el 50% de la anchura, la flecha vuelve a crecer aproximándose a la del modelo de partida.

Se observan dos ejemplos en las siguientes figuras 57 y 58:



- **Casos 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 (Variaciones en el espesor del difusor)**

En los siguientes casos se varía el espesor del difusor, que originalmente es de 2 mm, y se hace de la siguiente manera:

- Caso 6.1: Se reduce un 25%, hasta 1.5 mm sólo en la parte refractaria, no en las zonas de apoyo y labios exterior e interior.
- Caso 6.2: Se reduce un 25% el espesor de todo el difusor, siendo el nuevo espesor de 1.5mm
- Caso 6.3: Se reduce un 50% el espesor de todo el difusor, siendo el nuevo espesor de 1 mm
- Caso 6.4: Se aumenta un 25% el espesor de todo el difusor, siendo el nuevo espesor de 2.5 mm
- Caso 6.5: Se aumenta un 50% el espesor de todo el difusor, siendo el nuevo espesor de 3 mm

Como resultado, se observa que en los casos 6.1 y 6.2 disminuyen los desplazamientos, y aumenta la flecha. No obstante, en el primer caso los desplazamientos disminuyen más y aumenta más la flecha. El caso 6.3 se hace notar aún más siguiendo esta línea, llegando a pasar de una flecha de 0.177mm en el caso 1.3, a 0.310 mm en este caso. Esto muestra una clara tendencia de disminución de la inercia debido a la reducción del espesor.

En la imagen del caso 6.3, se puede observar como el programa muestra una deformación que ya podría considerarse anómala, doblándose el nervio del difusor considerablemente hacia el interior del mismo. Esto reduce de manera considerable la estanqueidad de la luminaria.

En los casos 6.4 y 6.5, en los que se aumenta el espesor se observa un aumento de los desplazamientos en vertical y disminución de la flecha. Se entiende claramente que el difusor se rigidiza, disminuyendo su capacidad para deformarse.

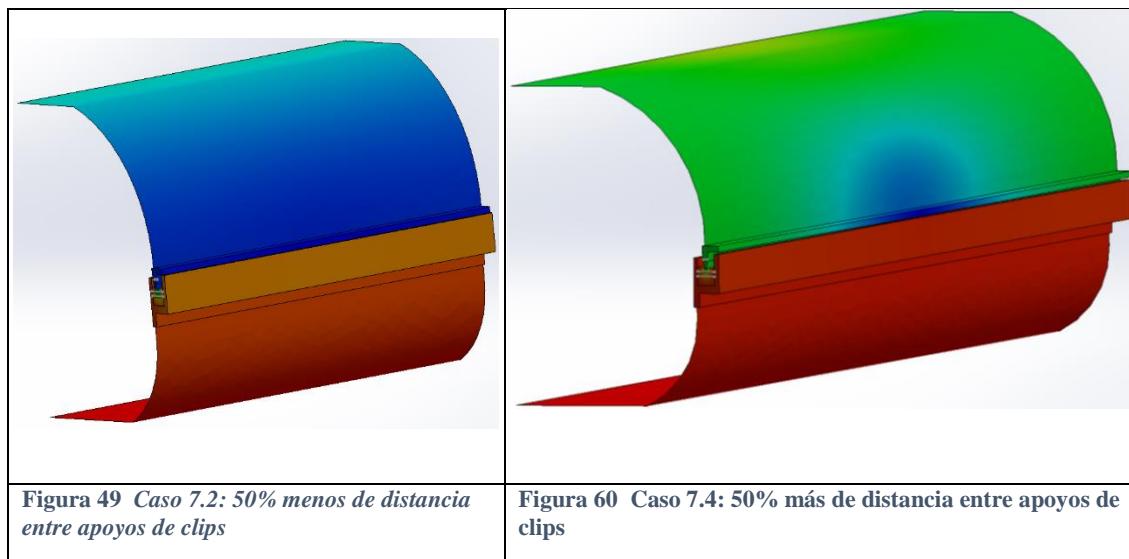
- **Casos 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 (Variaciones en la distancia entre apoyos de los clips)**

En estos casos se procede a variar la distancia de apoyo de los clips sobre los que se ejerce la fuerza que permite la estanqueidad.

En los dos primeros casos se reduce la distancia entre clips (que originalmente es de 264.8mm) en un 25% y un 50%, respectivamente. Se observa como hay un aumento de ambos desplazamientos y una disminución de la flecha que pasa de 0.177 mm en el caso 1.3 a 0.020 mm en el caso del 50% menos. Esto ayuda claramente a la estanqueidad, pero con el fin de no poner demasiados clips, se ha de llegar a un punto óptimo.

En los dos últimos casos en los que se aumenta la distancia entre clips en un 25% y un 50%, se observa una disminución de los desplazamientos, y unas flechas que son de 0.312 mm para el caso de 25% más de distancia, y 0.404 para el caso del 50%. Esto, claramente merma la capacidad para garantizar un cierre estanco y habrá de buscarse el punto óptimo.

Se pueden observar ejemplos de la variación de distancia entre apoyos del clip en las figuras 59 y 60:



- **Caso 8.1 (Variación en el módulo elástico de la carcasa)**

En este caso se varía el módulo elástico de la carcasa, incrementándose 10 veces. Esto se hace con el fin de demostrar que el módulo elástico original de la carcasa (7500 Mpa) con respecto al de los otros materiales (3000 Mpa y 0.15 Mpa) es lo suficientemente grande para considerarla rígida. Se puede observar que después de pasar de 7500 Mpa a

75000 Mpa, el desplazamiento mínimo varía de 1.264 mm en el caso 1.3 a 1.200 mm en el caso 8.1, y en el desplazamiento máximo varía de 1.087 a 1.076 mm.

- **Caso 9.1 (Variación en el módulo elástico de la junta)**

Se varía el módulo elástico de la junta 10 veces, como en el caso anterior de la carcasa, y aquí, sin embargo, se observa que al hacer más rígido este elemento se reduce considerablemente, como era de esperar, los desplazamientos producidos tanto en la zona del clip como en los extremos. Pasando de un desplazamiento del nervio del difusor en la zona de apoyo del clip de 1.264, a 2.376 mm, lo cual es casi el doble, y pasa de 1.087 a 1.286 mm en la zona de los extremos. De esto se deduce que al volverse tan rígida la junta, el difusor en lugar de clavarse en ella acaba deformando más la carcasa y a su vez deformándose más el mismo.

- **Casos 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6 y 10.7 (Variaciones en el módulo elástico del difusor)**

En los 3 primeros de estos casos se reduce el módulo elástico del difusor, 25, 50 y 75% respectivamente. Esto da como solución unos desplazamientos que se van reduciendo como se reduce el módulo elástico, tanto en la zona del nervio del difusor donde apoya el clip como en la más extrema. A la par que ello, la flecha va aumentando hasta 0.309 mm en el caso del 75% de reducción de módulo elástico. Estos datos, junta con la imagen de SolidWorks en la que se observa una deformación similar a la del caso de máxima reducción de espesor, nos lleva a la conclusión de que disminuir el módulo elástico puede llevar a problemas de estanqueidad.

En los casos del 10.4 al 10.7 se aumenta el módulo elástico del difusor un 50%, 100% más, y hasta 3 y 5 veces más respectivamente. Observando los resultados se ve aumentar los desplazamientos tanto mínimo como máximo, y se reduce la flecha hasta 0.047 mm en el caso de módulo elástico 5 veces más. El aumento de desplazamiento puede hacer que el nervio se hunda más en la junta dando mayor estanqueidad, y además, aunque no es en sí garantía de esta, la reducción de flecha reduce el gap entre difusor y carcasa.

Con el propósito de poder observar y analizar más rápidamente el conjunto de resultados obtenidos se realiza la siguiente tabla:

Tabla 3 Resumen de desplazamientos mínimos y máximos, y flecha de los casos analizados

Nº Caso	U _{mín}	U _{máx}	Flecha Máxima
1.1	-1.217 mm	-1.053 mm	0.164 mm
1.2	-1.248 mm	-1.079 mm	0.169 mm
1.3	-1.264 mm	-1.087 mm	0.177 mm
2.1	-1.340 mm	-1.166 mm	0.174 mm
2.2	-1.334 mm	-1.157 mm	0.177 mm
3.1	-1.287 mm	-0.868 mm	0.419 mm
3.2	-1.306 mm	-0.673 mm	0.633 mm
3.3	-1.249 mm	-1.177 mm	0.072 mm
3.4	-0.9599 mm	-0.9305 mm	0.0294 mm
4.1	-1.258 mm	-1.111 mm	0.147 mm
4.2	-1.250 mm	-1.124 mm	0.126 mm
5.1	-1.273 mm	-1.092 mm	0.181 mm
5.2	-1.225 mm	-1.078 mm	0.147 mm
5.3	-1.244 mm	-1.071 mm	0.173 mm
6.1	-1.188 mm	-0.977 mm	0.211 mm
6.2	-1.216 mm	-1.016 mm	0.200 mm
6.3	-1.078 mm	-0.768 mm	0.310 mm
6.4	-1.371 mm	-1.286 mm	0.085 mm
6.5	-1.368 mm	-1.304 mm	0.064 mm
7.1	-1.347 mm	-1.270 mm	0.077 mm
7.2	-1.469 mm	-1.449 mm	0.020 mm
7.3	-1.215 mm	-0.903 mm	0.312 mm
7.4	-1.035 mm	-0.631 mm	0.404 mm
8.1	-1.200 mm	1.076 mm	0.124 mm
9.1	-2.376 mm	1.286 mm	1.090 mm
10.1	-1.240 mm	-1.024 mm	0.216 mm
10.2	-1.202 mm	-0.925 mm	0.277 mm
10.3	-1.134 mm	-0.741 mm	0.393 mm
10.4	-1.290 mm	-1.156 mm	0.134 mm
10.5	-1.313 mm	-1.193 mm	0.120 mm
10.6	-1.327 mm	-1.247 mm	0.080 mm
10.7	-1.334 mm	-1.287 mm	0.047 mm

En resumen y a grandes rasgos se puede observar que para mejorar la estanqueidad conviene:

- Aumentar la altura del difusor hasta un punto óptimo, sin excederse ya que después disminuye la estanqueidad.
- Un cierto aumento de espesor también puede beneficiar.
- Disminuir la distancia de apoyo entre clips.
- No colocar una junta demasiado rígida
- Asegurarse que el difusor tenga un módulo elástico lo suficiente grande para no deformar en exceso.

Todos estos puntos son los que, como ingenieros, para el caso de una luminaria concreta con unas medidas marcadas habría que optimizar, debido a que se quiere garantizar la estanqueidad, pero no gastando material innecesario haciendo el difusor demasiado alto, demasiado grueso, o por ejemplo colocando clips cada muy poca distancia.

9. Proceso del Modelo de cálculo simplificado en Excel

Ha continuación se trata de realizar el mismo cálculo que el hecho mediante SolidWorks, pero de manera simplificada. La idea es mediante la obtención de una sola ecuación poder obtener flechas máximas similares a las obtenidas mediante el Método de elementos finitos con SolidWorks. En esta ecuación han de intervenir los diferentes parámetros que se varían a lo largo de los distintos casos estudiados.

El objeto concreto de estudio es el nervio del difusor el cual apoya sobre la junta, distribuyendo en forma de carga, la fuerza que le aplica el clip. Siendo estas dos partes los principales responsables del cierre estanco.

Este apoyo del nervio sobre la junta que le hace de reacción a la carga aplicada, se puede asemejar a una viga empotrada (entre los dos clips) con una carga distribuida.

Por tanto, se parte de la ecuación de flecha máxima para una viga biempotrada con carga repartida (Figura 61).

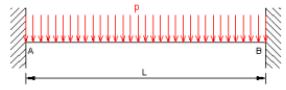
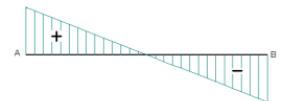
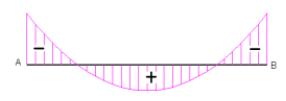
Viga biempotrada con carga repartida Esfuerzos aplicados  Diagrama de esfuerzos cortantes  Diagrama de momento flector  Ecuación de la elástica $w_{AB}(x) = \frac{pL^3}{24EI} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2$ Flecha máxima $\Delta_{máx} = \frac{pL^4}{384EI}$ $x = \frac{L}{2}$	Reacciones $R_A = R_B = \frac{pL}{2}$ Esfuerzos cortantes $T_A = R_A$ $T_{AB} = \frac{p}{2}(L - 2x)$ $T_B = -R_B$ Momentos Flectores $M_A = M_B = -\frac{pL^2}{12}$ $M_{AB} = -\frac{p}{12}(L^2 - 6Lx + 6x^2)$ $M(x = L/2) = \frac{pL^2}{24}$ $M(x = 0,2113L) = 0$
--	--

Figura 61 Ecuaciones de prontuario para una viga biempotrada con carga repartida

A continuación, se pueden observar diferentes casos ejecutados mediante hojas Excel. En ellos se aplica la ecuación de flecha máxima introduciendo los datos concretos de diferentes casos estudiados en SolidWorks.

Se puede observar, en la imagen de la hoja de Excel ,una serie de tablas para calcular la inercia específica de cada caso, debido a que como se ha observado la mayoría de ellos varían su geometría transversal, lo cual cambia la inercia cada vez. Dicha inercia obtenida es dividida entre dos para igualar las condiciones en las que se ha diseñado en SolidWorks, donde se ha utilizado la simetría.

En los anexos, apartado 3, se encuentran capturas de pantalla de los cálculos simplificados realizados.

10. Conclusiones del Modelo de cálculo simplificado

Finalmente, como se puede observar en el caso 1.3, la flecha máxima obtenida mediante la ecuación simplificada no coincidía con la de SolidWorks, es por ello que se introduce un factor de corrección para que las flechas sean iguales.

No obstante, al realizar diferentes casos se observa que si se varían parámetros pertenecientes a la ecuación de flecha máxima directamente, como es el caso de la distancia entre clips; el factor de corrección introducido para el caso de partida sigue siendo válido y se obtiene la misma flecha que en SolidWorks. Sin embargo, en otros como el módulo elástico del difusor, al variarlo, ya no sirve ese mismo factor de corrección.

Donde también se obtiene resultados diferentes es en la variación de parámetros que afectan a la inercia.

Las diferencias de resultados debidas a variación de parámetros de la inercia, como anchura, altura o espesor del difusor pueden ser debidas a que la inercia obtenida es la del cuerpo en conjunto y el objeto de interés para la estanqueidad es la flecha del nervio, el cual está situado en un extremo. Como se puede observar en los gráficos de colores de SolidWorks, no hay el mismo desplazamiento vertical a lo largo de toda la sección transversal. El nervio suele desplazarse más que la zona superior del difusor.

Además, la carga no está repartida a lo largo de toda la zona transversal, ni en su centro de masas, sino sólo en la zona del nervio, el cual flecta más que el resto del cuerpo como se ha dicho.

11. Futuras posibilidades de ampliación o profundización

En cuanto a futuras posibilidades de ampliación para este proyecto o de mayor profundización, estarían las siguientes:

- Cálculo más exhaustivo, teniendo en cuenta los extremos de la luminaria, los cuales se comportan de forma diferente.
- Consideración de nuevos materiales, con características muy distintas, que puedan aparecer en un futuro.
- En caso de por objeto de estudio más que por necesidad real, se podría realizar un análisis de cálculo en mayor profundidad en SolidWorks, con otro tipo de elementos, mallas más finas, así como no obviando redondeos.
- Estudio de otros tipos de cierres estancos menos comunes.

12. Conclusiones del proyecto

Han sido 6 meses de trabajo con algunas interrupciones, en los cuales se ha aprendido además de las habilidades de manejo de ciertos software de diseño y cálculo, las pautas y condiciones a tener en cuenta para el cálculo por el Método de Elementos Finitos, y en conjunto el proceso a llevar a cabo para elaborar un proyecto, en concreto de los puntos a tener en cuenta para llegar al fin esperado.

Dichos pasos comenzaron con la recopilación de información acerca de diferentes luminarias estancas, en especial de la empresa Zalux. Se observó los componentes responsables de la estanqueidad de las luminarias. Una vez con esta información se fue creando un borrador en Excel de los benchmarking, clasificando en junta, carcasa, difusor y los clips de cierre que garantizan la estanqueidad. Se decidió a su vez, los parámetros más importantes y relevantes de cara al estudio del cierre estanco y clasificándolos según el componente de la luminaria. También, se aprendió el uso básico del programa de CAD Siemens Nx con el que se obtuvieron parámetros de luminarias necesarios para el benchmarking. Todo ello bajo la supervisión de los tutores que fueron encaminando el proyecto.

Con la organización de estos datos se procedió realizar un modelo 3D en el programa SolidWorks. En principio fueron modelos de prueba que sirvieron para aprender el manejo del programa, tanto a nivel de diseño como de cálculo. Aprendiendo a dibujar las piezas necesarias y ensamblarlas, así como, los conocimientos básicos para realizar cálculo por el Método de Elementos Finitos, tales como condiciones de contorno, contacto entre componentes, tipos de elemento, su tamaño, etc.

Así hasta llegar al modelo final desde el que partir para realizar los análisis. A continuación, partiendo de dicho modelo se realizó el estudio de diversos casos variando diferentes parámetros, que se habían considerado en los benchmarking, los cuales afectaban a la estanqueidad de la luminaria. Dichos parámetros a variar podían ser tanto geométricos, caso de altura del difusor, anchura, espesor, distancia entre apoyo de clips, como de características de los materiales, variando su módulo elástico. Con la realización de estos se analizaba como afecta la variación de estos parámetros al cierre estanco, en relación al desplazamiento producido en el nervio del difusor y su contacto con la junta.

Tras los resultados en SolidWorks se pudo concluir unas pautas generales de comportamiento del cierre estanco de acuerdo a la variación de los parámetros de sus componentes, así como la similitud de estos resultados con los que suceden en los casos reales. De manera paralela, se procedió a la realización de una hoja Excel para un cálculo simplificado del comportamiento de este mismo cierre estanco, esperando encontrar una expresión simple que sirviese de ayuda al diseño de estos cierres.

Tras la realización de este proceso he podido observar todo el trabajo que hay detrás de productos que aparentemente nos pueden resultar sencillos en la vida cotidiana, pero los cuales llevan detrás todo un proceso de diseño y cálculos para su correcto funcionamiento y optimización.

13. Bibliografía

- Calvo Calzada, Begoña. Martínez Barca, Miguel Ángel. Peña Baquedano, Estefanía. Apuntes de elementos finitos para sólidos deformables. Área de Mecánica de Medios Continuos y T^a de Estructuras. Universidad de Zaragoza
- Camañes Vera, Víctor Manuel. Desarrollo de un modelo teórico de simulación para el análisis de la estanqueidad en el cierre de luminarias industriales estancas. Zaragoza. Trabajo Fin de Máster. 2012
- Dassault Systems. “SolidWorks Web Help”.
[<http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx>](http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx)
- http://www.f2i2.net/documentos/lsi/rbt/guias/guia_bt_anexo_1_sep03R1.pdf
Última fecha de consulta: 24 de Agosto de 2018
- https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf
Última fecha de consulta: 24 de Agosto de 2018
- Lorenz García, Samuel. Estudio por elementos finitos de la estanqueidad de una luminaria estanca. Zaragoza. Proyecto Fin de Carrera. 2011
- Tejerizo Fernández, Maribel. Elaboración de fórmulas analíticas y tablas de cálculo para las estructuras metálicas de acero según la normativa Eurocódigo 3. Barcelona. Proyecto de final de carrera. 2015
- <https://zalux.com/en/products-services/protected-luminaires/protected-led-luminaires/>
Última fecha de consulta: 27 de Agosto de 2018