

Desarrollo de una Guía de Diseño Mediante Optimización de Patrones Modulares de un Amortiguador de Energía Trasero para su Uso en Diversas Plataformas Automotrices

Ing. Javier Romero Contreras¹ y Dra. Mariamne Dehonor Gómez²

Resumen—En este artículo se presentan los resultados del desarrollo e investigación para la mejora y optimización de amortiguadores de energía automotrices de TPO (poliolefinas termoplásticas) de sistemas de fascia trasera de SUV segmento D para vehículos GM (General Motors Company). Las 2 principales funciones de estos amortiguadores son la seguridad de los peatones (Pedestrian Protection, PedPro) y los costos de reparación, durante percances automovilísticos, en la zona frontal y trasera del vehículo. Este trabajo se enfocó en el segundo punto ya que, después de generar un benchmarking interno con diseñadores expertos en desarrollo y manufactura de estas piezas, se identificó la necesidad de crear una guía de diseño, inexistente en el departamento de ingeniería para su desarrollo, optimizando la cantidad de resina utilizada en la manufactura de la inyección de plástico, generando mejoras en dimensiones, peso y desempeño a cargas normales, sin exceder el límite permisible de 19.1 MPa en Von Mises Estrés.

Palabras clave—Amortiguador de energía, desempeño modal, estrés, desplazamiento y Von Mises Estrés.

Introducción

Los amortiguadores de energía son los componentes estructurales de mayor importancia para las pruebas físicas y virtuales, cuyo objetivo primordial es la absorción y disipación de la energía durante percances automovilísticos, generalmente son piezas diseñadas para su manufactura en TPO y se sujetan a las fascias traseras y delanteras. Todos los vehículos automotrices se ven impactados por regulaciones de seguridad, desempeño, comerciales, económicas y normativas, específicas del mercado al cual van dirigidos. Los vehículos generalmente incluyen un faldón delantero y trasero (parachoques) para absorber energía, reducir las posibles lesiones de los peatones y evitar diferencias de altura entre los vehículos, entre otras funciones durante el impacto. Los requerimientos específicos para cumplir y, por supuesto, la gama de los vehículos, son los que dictan las especificaciones y requerimientos que se deben de incluir en el contenido del vehículo, para satisfacer las necesidades de los clientes de GM, incluso en los vehículos de pasajeros modernos, el control del flujo de aire dentro y alrededor del motor del vehículo es importante para el rendimiento del motor y el funcionamiento general (Evans, D.; Ralston, D.; Zabik, B; 2011). Infinidad de requisitos cómo esté se deben cumplir, ya que van relacionadas directamente con la absorción de energía durante siniestros automovilísticos. Últimamente se ha dado mayor importancia a los métodos para minimizar la cantidad de lesiones sufridas por una persona en un accidente, así como la cantidad de daños al vehículo. Diferentes comités reguladores evalúan el desempeño del impacto de peatones y ocupantes automotrices a nivel mundial (Ramamoorthy, S.; Kumar, A., 2011). Al buscar un auto, los clientes buscan un vehículo que cumpla todas sus expectativas, e implícitamente, además del desempeño, comodidad y apariencia, siempre buscan la seguridad, ya que es un factor primordial para la venta de un vehículo. Independientemente del país donde se quiera comercializar y desarrollar cualquier producto del portafolio de una compañía automotriz, se requiere cumplir las normativas de seguridad aplicables a la región objetivo, de lo contrario, pueden correr el riesgo de no ser vendibles, creando más problemas que soluciones; asimismo, cualquier tipo de sanción relacionada con seguridad lleva de la mano acciones legales y claramente pueden desembocar en consecuencias financieras, que son dañinas para la imagen de las compañías. De acuerdo con la EURO NCAP (Programa de evaluación de vehículos nuevos para Europa), la valoración de seguridad se determina a partir de una serie de ensayos en vehículos, escenarios de accidentes reales que podrían causar lesiones o la muerte en los ocupantes de los vehículos o los usuarios de la carretera. Esta serie de validaciones son cruciales para obtener las certificaciones que son necesarias para comercializar cada gama de vehículos en cada región específica del planeta, pero dado que las empresas automotrices son globales, se deben cumplir los requerimientos de todas las regiones donde se venderán los vehículos. En general, una viga de parachoques unida tanto a la parte delantera como a la parte trasera de la carrocería de un automóvil o similar se combina con absorbedores de energía montados en la misma, formando una carrocería con estructura de parachoques (Ishitsuka Y., 2016). Por

¹ El Ing. Javier Romero Contreras es alumno de Maestría en Manufactura Avanzada en CIQTEQ A.C. Edo. De México. javier.romero.contreras@hotmail.com

² La Dra. Mariamne Dehonor Gómez es investigadora en el departamento de plásticos y materiales avanzados de CIATEQ A. C. Lerma, Edo. De México mariamne.dehonor@ciateq.mx

poner un ejemplo, un Cadillac XT5 en cualquiera de sus versiones debe cumplir todos los requerimientos de seguridad del LATIN NCAP (Programa de evaluación de vehículos nuevos para Latinoamérica), EURO NCAP , US NCAP (Programa de evaluación de vehículos nuevos para U.S.A.), China...etc., para cubrir todos los requerimientos, de todos los países donde se venderán los automóviles. Después de haber dicho lo anterior, lo más importante para la compañía, es la seguridad de sus clientes, ya que esto impacta directamente y de una forma mercadológica impresionante la imagen de cualquier compañía. A manera de ejemplo, el valor que Toyota implementó con el Corolla depende de la calidad por sí misma del vehículo, así como y de la confianza y seguridad que provea al cliente final. Ese modelo es el ideal de cualquier producto a replicar en cualquier aspecto de los vehículos automotores. Hablando acerca de las pruebas por división, es posible destacar las enfocadas a la protección a los peatones y a los ocupantes del habitáculo del vehículo, las cuales están incluidas dentro de todas las divisiones regionales del NCAP, es decir, que se deben cumplir desde los paquetes básicos con estos estándares. Como resultado, existe una necesidad continua de diseñar un absorbedor de energía que se deforme y absorba la energía del impacto para lograr una buena clasificación de seguridad del vehículo con un peso reducido y una menor cantidad de espacio de embalaje, lo que da como resultado una mayor libertad de diseño (Ramamoorthy, S.; Kumar, A., 2010). En el presente estudio, el diseño inicial propuesto se forma de una “charola” como cuerpo principal y de “torres” en forma de equis con las dimensiones que se muestran en la Figura 1, provenientes de benchmarking interno y pruebas virtuales de desarrollo con probetas de TPO y ASA (acrilato de acrilonitrilo estireno), siendo estas geometrías las ganadoras en cuanto a desempeño a cargas normales para desplazamiento, estrés y desempeño modal en estado libre, después de nuestras simulaciones iniciales. Este trabajo está enfocado a generar una guía de diseño para piezas como los amortiguadores de energía, que básicamente, junto con las fascias, son los principales componentes responsables de pasar o no pasar estas evaluaciones de NCAP. Por lo que, el objetivo es generar una cultura de mejora y eficiencia en la interacción entre los grupos de CAE dinámico, Estudio de Diseño e Ingeniería, usando cómo herramientas de CAE (ingeniería asistida por computadora), Nastran de NX Unigraphics, para optimizar los diseños en los amortiguadores de energía plásticos. Como se mencionó al principio, actualmente no se cuenta con una metodología, mejor práctica o guía que dicte el desarrollo y diseño de amortiguadores traseros de TPO, por lo que se utilizó el programa Cadillac XT4 en curso para sentar las bases de este proyecto para mejorar tentativamente un 50% el tiempo de desarrollo y de validación virtual de estos productos, tomando los estándares internos de GM necesarios para amortiguadores de energía.



Figura 1. Diseño inicial para amortiguador de energía trasero en TPO. Se muestra la primera propuesta de diseño para un amortiguador de energía trasero para SUVs medianas.

Descripción del Método

Para el desarrollo de este proyecto, se utilizaron las metodologías de Design for Six Sigma (DFSS) y Diseño de Experimentos (DOE), junto a los diagramas P, tablas de combinaciones y gráficas de medias para encontrar los mejores resultados posibles tomando en cuenta todos los factores involucrados.

Como primer paso, se desarrolló la tabla de medidas funcionales en acuerdo con el equipo experto en diseño de sistemas traseros/frontales de fascias y el Master Black Belt en DFSS, determinando una carga promedio de 1828 kg para SUVs medianas a ser aplicada en nuestros diseños de experimentos y 3 salidas: 1. El desempeño de desplazamiento a cargas normales, 2. Desempeño a estrés (Von Misses) y 3. Desempeño Modal (vibración en estado libre); estableciendo los requerimientos, objetivos y mediciones funcionales, así como métodos de evaluación para interpretar los resultados obtenidos mediante los DOEs (Tabla 1).

Expectativa del Cliente	LTB/STB/NTB Objetivo	Medición Funcional (Unidades)	Método de Evaluación
Desplazamiento/ Carrera	≤2.0	mm	Análisis de CAE
Von Misses Estrés	≤19.1 (TPO) ≤42.0 (ASA)	MPa	Análisis de CAE
Prueba Modal a Nivel Ensamble	≥22.5	Hz	Análisis de CAE

Tabla 1. Matriz de medidas funcionales. Muestra los objetivos de desplazamiento, estrés y desempeño a frecuencias naturales para DOEs..

Usando la matriz de medidas funcionales, se generaron los diagramas P para el desarrollo de las charolas y de las torres de refuerzo, como se muestra en la Figura 2:

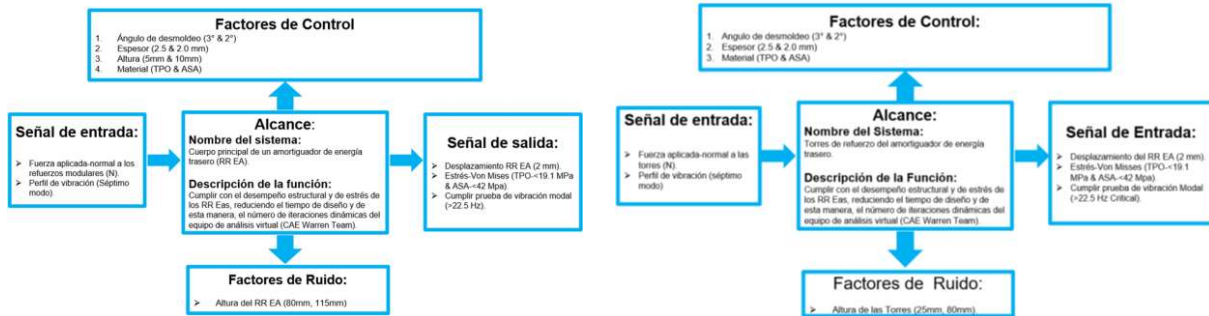


Figura 2. Diagramas P para formas modulares de refuerzo (charola) y torres de refuerzo. Muestra la relación que existe entre la fuerza aplicada para nuestra validación con todos los parámetros posibles que pudiesen llegar a impactar el diseño.

El desarrollo del estudio continuó con la elección de los patrones a ser implementados en las charolas y las geometrías de las torres, mediante validaciones virtuales en Nastran NX, como se muestra en las tablas de resultados para costillas y torres de refuerzos:



Fig.3. Comportamiento de costillas y torres a cargas normales. Muestran los resultados de la fuerza normal aplicada a probetas de costillas y torres de refuerzo.

Los resultados en los recuadros verdes de la Figura 3 dictan utilizar un arreglo de rejilla rectangular como refuerzo en el cuerpo principal del amortiguador de energía y torres en forma de equis para reforzar este componente y recibir las cargas de 1828 kg en los diseños de experimentos.

Durante las primeras iteraciones de los amortiguadores de energía, se evidenció un comportamiento de concentración de energía en las torres, por lo que se optó por abrir la torre en la cara superior y de esta forma disipar la energía, tal como se puede observar en la Figura 4:

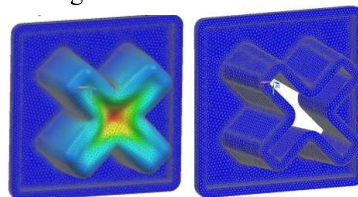


Fig.4. Apertura de torre para liberación de energía. Muestra los resultados de la fuerza normal aplicada a probetas de torres de refuerzo.

Una vez obtenidos los mejores diseños para las formas modulares de refuerzo en las charolas “patrones rectangulares de intersección” y haber reforzado y mejorado el desempeño de las torres con forma de equis, se definieron los factores de control para los DOEs:

Formas modulares de refuerzo en las charolas.

Para definir los factores de control presentados en los diagramas P, se realizó una revisión de las mejores prácticas, junto con el equipo experto en diseño y soportada con la experiencia del líder técnico, obteniendo estos 4 factores para las costillas modulares:

- A) Ángulo de desmoldeo (3° & 2°)
- B) Espesor (2.5 & 2.0 mm)
- C) Altura de Costilla (5mm & 10mm)
- D) Material (TPO & ASA)

Torres en equis reforzadas.

- A) Ángulo de desmoldeo (3° & 2°)
- B) Espesor (2.5 & 2.0 mm)
- C) Material (TPO & ASA)

De esta manera, se tienen todos los factores de control, objetivos y diseños a ser modificados en los DOEs. Se utilizaron las Matrices Taguchi para encontrar todas las posibles combinaciones y de este modo tener los resultados más confiables, ya que se está abarcando todo el espectro de variables y el resultado final será robusto.

Después de efectuar todos los diseños de experimentos y corridas virtuales para desplazamiento, estrés y desempeño modal en los arreglos de charolas y torres por separado, se procedió al análisis de los datos para obtener la mejor combinación posible de diseño para los tres parámetros a medir, basada en el análisis e interpretación de los datos previamente obtenidos de los DOEs. Se obtuvieron los resultados de la Tabla 2.

		Desplazamiento (<2 mm)		Estrés (<19.1 MPa)		Modal (Objetivo cómo ensamble completo >22.5 Hz)	
Concepto General Ganador (Verificación)		80 mm	115 mm	80 mm	115 mm	80 mm	115 mm
Optimización 1	(A2,B2,C1,D2)	0.219 mm	0.219 mm	18.56 Mpa	18.56 Mpa	13.03 Hz	12.26
Optimización 2	(A2,B2,C2,D2)	0.315 mm	0.315 mm	16.52 Mpa	16.52 Mpa	16.18 Hz	15.47
Optimización 3	(A2,B2,C1,D1)	0.325 mm	0.325 mm	16.84 Mpa	16.84 Mpa	10.78 Hz	10.14
Optimización 4	(A2,B2,C2,D1)	0.339 mm	0.339 mm	17.93 Mpa	17.93 Mpa	13.36 Hz	12.78

Tabla 2. Sumario de resultados para DOE de charola, segunda optimización. Muestra los resultados de la fuerza normal aplicada a las charolas reforzadas.

Concepto General Ganador (Verificación)		Desplazamiento (<2 mm)		Estrés (<19.1 MPa)		Modal (Objetivo cómo ensamble completo >22.5 Hz)	
		28 mm	80 mm	28 mm	80 mm	28 mm	80 mm
Optimización 1	(A1,B1,D2)	0.1094 mm	0.23 mm	16.03 Mpa	18.24 Mpa	60.42 Hz	52 Hz
Optimización 2	(A1,B1,D1)	0.177 mm	0.36 mm	16.31 Mpa	18.14 Mpa	49.8 Hz	43.44 Hz

Tabla 3. Sumario de resultados para DOE de torres reforzadas, segunda optimización. Muestra los resultados de la fuerza normal aplicada a las torres reforzadas.

Una vez obtenidos y analizados los resultados de las validaciones virtuales de las charolas y, por otra parte, de las torres reforzadas, se aplicó el mismo tratamiento de diseño de experimentos, para la combinación de estos factores ganadores (charolas con patrones modulares de costillas + torres reforzadas), como se puede observar en la Tabla 4:

Optimización	ITERACIONES FINALES (MATERIAL ASA)		1a	2a	3a	4a
	(A2,B2,C2,D2) (COSTILLAS)	Altura de Amortiguador	80 mm	80 mm	115mm	115mm
	(A1,B1,D2) (TORRES)	Altura de torre	28 mm	80 mm	28 mm	80 mm
	Modal (≥22.5 Hz Requerimiento ensamble)		16.09	12.34	15.3	12.39
	Desplazamiento (≤2 mm)		0.11	0.223	0.1126	0.225
	Estrés (≤42 Mpa)		17.07	20.84	17.07	22.36
	ITERACIONES FINALES (MATERIAL TPO)					
	(A2,B2,C2,D1) (COSTILLAS)	Altura de Amortiguador	80 mm	80 mm	115mm	115mm
	(A1,B1,D1) (TORRES)	Altura de torre	28 mm	80 mm	28 mm	80 mm
	Modal (≥22.5 Hz Requerimiento ensamble)		13.25	10.12	12.68	10.16
Desplazamiento (≤2 mm)		0.179	0.36	0.182	0.366	
Estrés (≤19.1 Mpa)		17.68	19.96	18.71	21.67	

Tabla 4. Diseño de experimentos final, con conceptos ganadores. Muestra los resultados de la fuerza normal aplicada a las torres + charolas reforzadas.

Después de correr todas las combinaciones e iteraciones de diseño y validaciones virtuales de la Tabla 4, es posible concluir que, en términos de porcentaje, donde se aplicaron las geometrías optimizadas se obtuvieron mejoras significativas, que van desde 60% hasta 443%, como podemos ver en la Tabla 5. En la tabla se muestran las 6 propuestas de diseño finales. Posteriormente se realizó una evaluación de los 6 diseños modificados utilizando el

Método Pugh o Matriz de decisión, permitiendo identificar los requerimientos con mayor sensibilidad en los modelos propuestos hasta obtener el diseño ganador.

MEJORA				
MATERIAL ASA	80 mm	80 mm	115mm	115mm
	28 mm	80 mm	28 mm	80 mm
Estrés	60%	60%	60%	60%
Desplazamiento	443%	269%	433%	267%
Modal	277%	175%	284%	213%
Material TPO	80 mm	80 mm	115mm	115mm
	28 mm	80 mm	28 mm	80 mm
Estrés	61%	61%	60%	61%
Desplazamiento	442%	270%	436%	268%
Modal	265%	182%	255%	217%

Tabla 5. Tabla de resultados para DOE en TPO y ASA. Muestra las comparaciones entre los resultados de los DOE con los diseños base y los diseños optimizados a ultimo nivel.

Comentarios Finales

Resumen de resultados

En la Figura 5, se muestra el diseño final del amortiguador de energía con todos los patrones modulares de refuerzo aplicados a las geometrías. Cabe mencionar que estas geometrías serán la base para el desarrollo del componente como tal, entonces, la curvatura de la barra de impacto y geometrías adicionales de refuerzo, incrementarán el desempeño de estos amortiguadores, en los 3 aspectos que se evaluaron en el presente estudio.

Mejor combinación posible mediante DOEs.

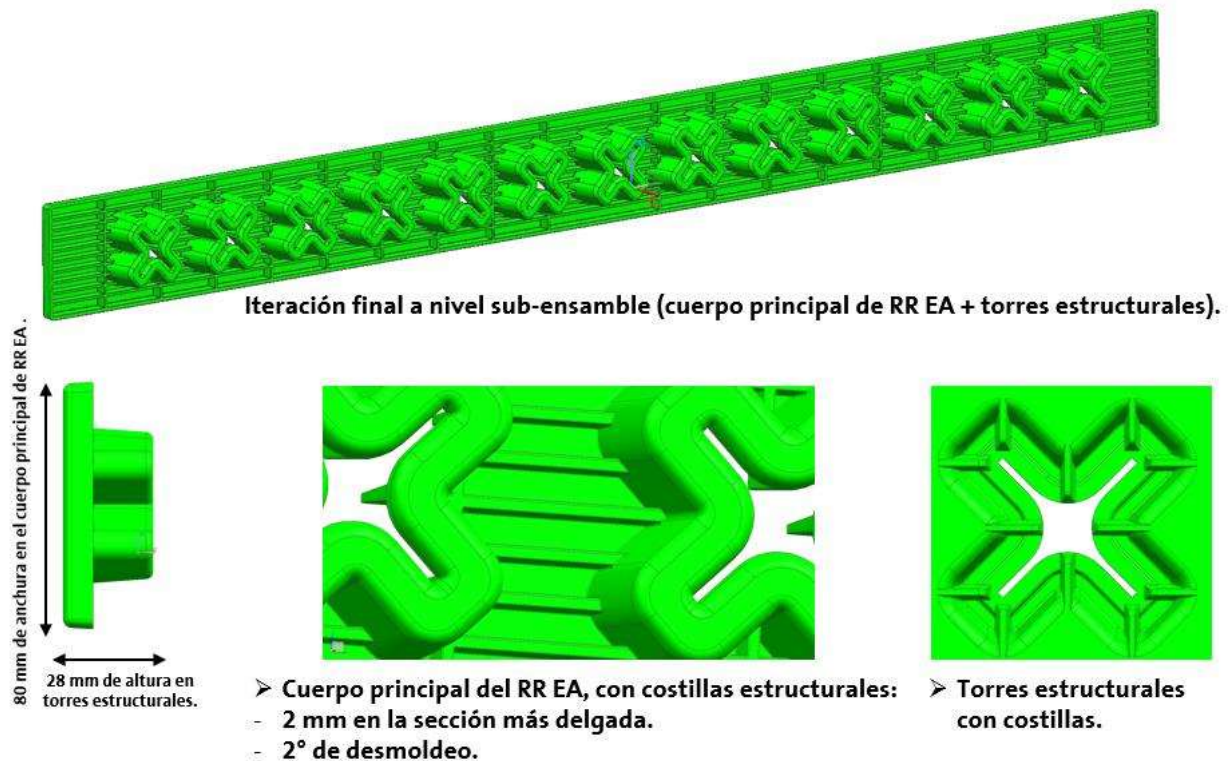


Fig. 5. Diseño ganador. Muestra el diseño final como ejecución base para el desarrollo de un amortiguador de energía trasero de TPO.

Análisis estadístico

Todos los datos generados para los 3 parámetros en estudio para el desarrollo del amortiguador de energía fueron obtenidos a través del Nastran NX Unigraphics de Siemens con Versión 12.2.

Conclusiones

Una vez mostrados los resultados de mejora, se procedió a enlistar las ventajas y beneficios de su aplicación en fascias, para el desarrollo de estas piezas para GM:

- Permitirá complementar dos mejores prácticas para el desarrollo de los componentes.
- Reducirá el tiempo de desarrollo durante el diseño de piezas de desempeño a impactos, tentativamente en un 50%, número que debe ser rastreado durante 2021.
- Reducirá tentativamente en un 50% las iteraciones de desempeño modal, de desplazamiento y esfuerzo, disminuyendo de esta manera el uso del equipo dinámico de CAE (a ser documentado en 2021).
- Reducirá la masa hasta en un 30.8%, ya que se utilizarán las geometrías de refuerzo donde se necesite, ahorrando material donde no lo requiera.

Al final del presente estudio se han definido las torres y geometrías de refuerzo básicas y óptimas a ser utilizadas en piezas de desempeño estructural en componentes automotrices. Esto generará mejoras cuantitativas significativas. A través de estudios de este tipo, se logrará crear mejores productos día con día, los cuales protejan a la sociedad durante percances automovilísticos y, de esta manera, alinearse con los valores de General Motors Company, respecto a la importancia de la seguridad de sus clientes.

Recomendaciones

El trabajo pendiente considera continuar con el estudio de investigación y desarrollo, enfocándose en diseñar y evaluar de 2 geometrías más de un amortiguador de energía. La primera en estudio será la de sujeción, la cual está directamente relacionada con las fascias. La segunda en estudio será un conjunto de geometrías anti rotacionales, las cuales evitan la salida del amortiguador de su posición vehicular durante impactos menores a los validados en este estudio.

Referencias

- 1.- Ishitsuka Y., (2016). Energy absorber and bumper structure body (Patente de Alemania, No. DE102016203790B4). Honda Motor Co Ltd, Oficina Alemana de Marcas y Patentes, <https://patents.google.com/patent/DE102016203790B4/-en?q=energy+absorber&oq=energy+absorber>
- 2.- Ramamoorthy, S.; Kumar, A., (2011). Energy absorber elements and vehicle systems (Patente de USA, No. US9821753B2). SABIC Global Technologies BV, United States Patent and Trademark Office, <https://patents.google.com/patent/US9821753B2/en?q=energy+absorber&oq=energy+absorber>
- 3.- Ramamoorthy, S.; Kumar, A., (2010). Reinforced plastic energy absorber system and methods of making the same (Patente de USA, No. US10005409B2). SABIC Global Technologies BV, United States Patent and Trademark Office, <https://patents.google.com/patent/US10005409B2/en?q=energy+absorber&oq=energy+absorber>
- 4.- Evans, D.; Ralston, D.; Zabik, B; (2011). Integrated energy absorber and air flow management structure (Patente de USA, No. US8646552B2). Shape Corp, United States Patent and Trademark Office, <https://patents.google.com/patent/US8646552B2/en?q=energy+absorber&oq=energy+absorber>
- 5.- Ford Global Technologies LLC; (2016). One-piece apron with integrated energy absorber (Patente de Alemania, No. DE202017100043U1). Ford Global Technologies LLC, Oficina Alemana de Marcas y Patentes, <https://patents.google.com/patent/DE202017100043U1/en?q=energy+absorber&oq=energy+absorber>