



Trabajo Fin de Máster

Optimización de una puerta de automóvil en diferentes materiales ante impacto lateral.

Autor

Juan Miguel Galindo Torres

Director

Luis Castejón Herrer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2012

Optimización de una puerta de automóvil en diferentes materiales ante impacto lateral.

RESUMEN.

El presente trabajo tiene como objeto el estudio comparativo teórico del comportamiento ante un impacto lateral de una puerta de automóvil junto con distintas geometrías de barras de protección contra impacto lateral.

Para este estudio se ha utilizado software comercial de ingeniería asistida por ordenador:

- Catia V5 para el diseño de la geometría.
- Ansys Workbench para el preproceso, cálculo y postproceso.

El punto de partida del estudio es la geometría del panel exterior de una puerta de automóvil, y varias geometrías de barras de protección contra impacto lateral que comparten la misma altura.

Sobre estas barras de protección contra impacto lateral en acero se va a realizar la selección de la geometría óptima según:

- Resistencia al aplastamiento en un impacto lateral y energía de deformación (criterios principales).
- Rigidez a torsión (criterio secundario).

Sobre la barra de protección contra impacto lateral con la geometría óptima frente a impacto lateral se estudiará:

- Influencia del tipo de acero en los resultados de la prueba.
- Viabilidad de sustituir acero por otros materiales, variando el espesor.

Finalmente, se estudiará la contribución del panel exterior de la puerta en la prueba de impacto lateral.

Índice de contenido

<u>1 Geometrías utilizadas en la simulación</u>	5
1.1 Panel exterior de la puerta.....	5
1.2 Barras de protección frente a impacto lateral.....	5
1.3 Ubicación.....	9
<u>2 La norma FMVSS214. Información relevante</u>	10
2.1 Adaptación de la norma al estudio comparativo.....	12
<u>3 Simulación del ensayo mediante el método de elementos finitos</u>	13
3.1 Generalidades.....	13
3.1.1 Descripción del software utilizado.....	13
3.1.2 Preproceso.....	13
3.1.3 Solver y consideraciones sobre el cálculo.....	15
3.1.4 Postproceso.....	16
3.2 Elección de la geometría óptima de la barra en base a la resistencia a impacto.....	16
3.2.1 Desplazamientos impuestos, condiciones de contorno y contactos.....	17
3.2.2 Resultados.....	18
3.3 Elección de la geometría óptima de la barra en base a la rigidez a torsión.....	22
3.3.1 Condiciones de contorno y contactos.....	22
3.3.2 Resultados.....	23
3.3.3 Elección final de la barra.....	25
3.4 Análisis de la influencia del espesor del perfil en la barra de acero.....	26
3.5 Análisis de la barra en aluminio.....	27
3.6 Análisis de la barra en CFRP.....	28
<u>4 Análisis del conjunto barra-panel exterior de puerta</u>	29
4.1 Desplazamientos impuestos, condiciones de contorno y contactos.....	29
4.2 Resultados.....	32
4.2.1 Acero.....	32
4.2.2 Aluminio.....	34
4.2.3 CFRP.....	35
<u>5 Conclusiones</u>	37
<u>6 Bibliografía</u>	39

1 Geometrías utilizadas en la simulación.

Los planos de las piezas mostradas están disponibles para su consulta en el Anexo 1.

1.1 Panel exterior de la puerta.

La geometría del panel exterior de la puerta puede verse en la ilustración 1:

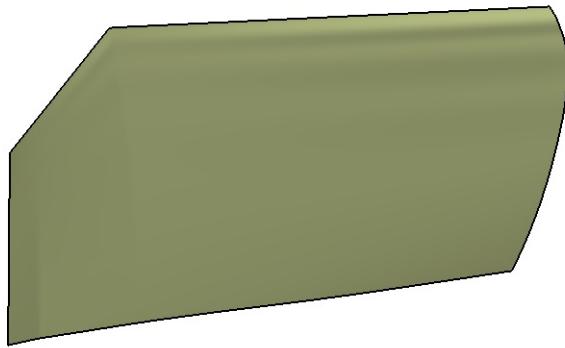


Ilustración 1: Vista general del panel exterior de la puerta.

1.2 Barras de protección frente a impacto lateral.

Todas barras de protección frente a impacto lateral (a partir de ahora “barras”) tienen la misma altura, tal y como se muestra en la ilustración 1, que muestra la sección de las barras.



Ilustración 2: Vista de las secciones de las 5 barras.

Esto se debe a que deberían ocupar el mismo espacio en el interior de la puerta, y el espacio disponible en la dirección de la altura de la barra es un parámetro importante (ver ilustración 3).



Ilustración 3: Vista superior de puerta con viga y espacio disponible en rojo.

La geometría de cada pieza se construye a partir de su sección mostrada en la ilustración 2, que se extruye y se une a unos extremos planos mediante una zona de transición, como se muestra en la ilustración 4:

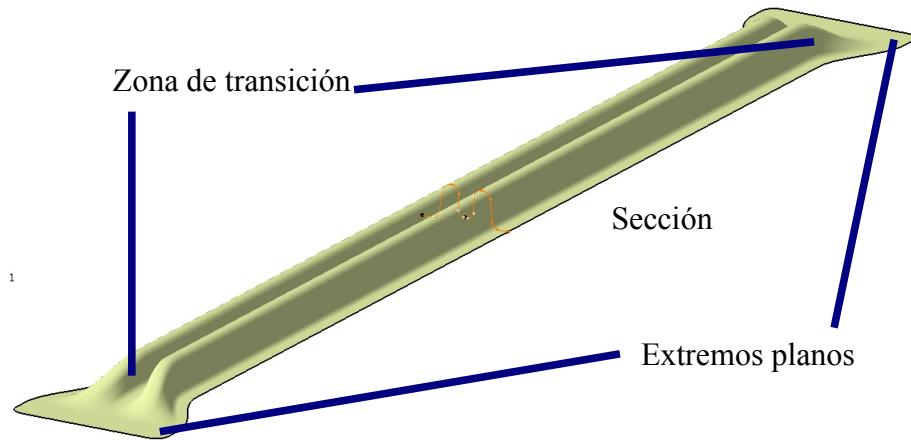


Ilustración 4: Geometría de barra construida a partir de sección marcada en naranja. Esta figura muestra la barra 1 como ejemplo.

La geometría de las 5 barras puede observarse en las ilustraciones X a X:

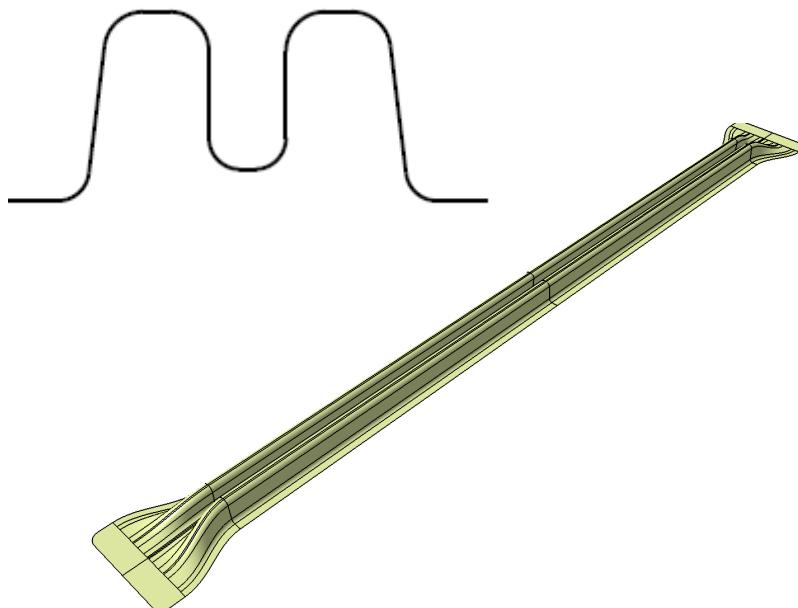


Ilustración 5: Vista isométrica y sección de la barra 1.

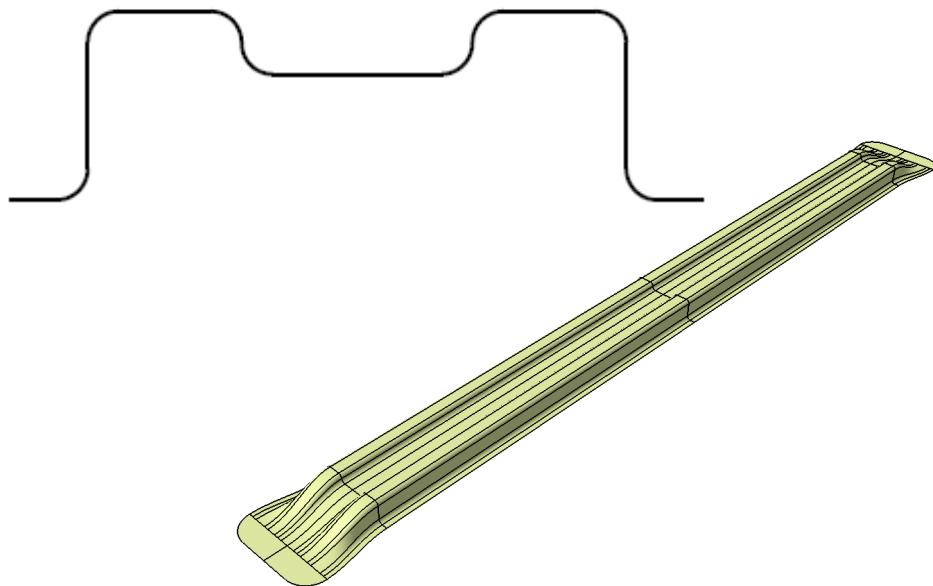


Ilustración 6: Vista isométrica y sección de la barra 2.

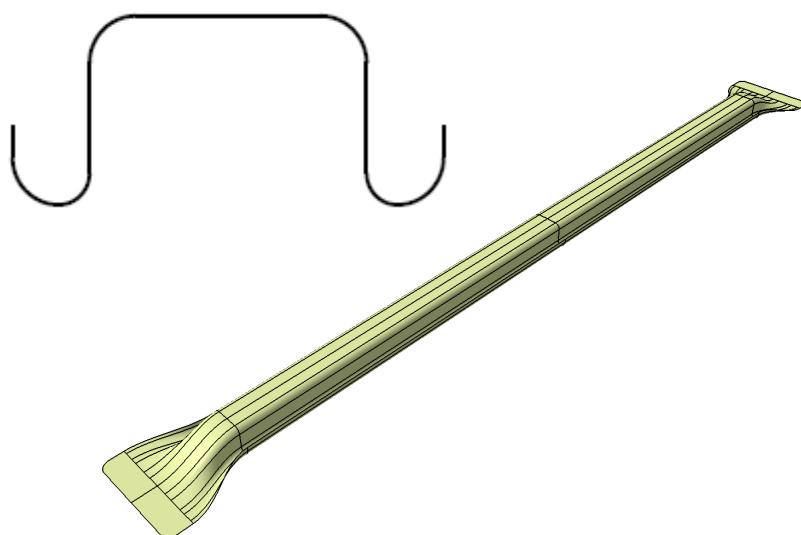


Ilustración 7: Vista isométrica y sección de la barra 3.

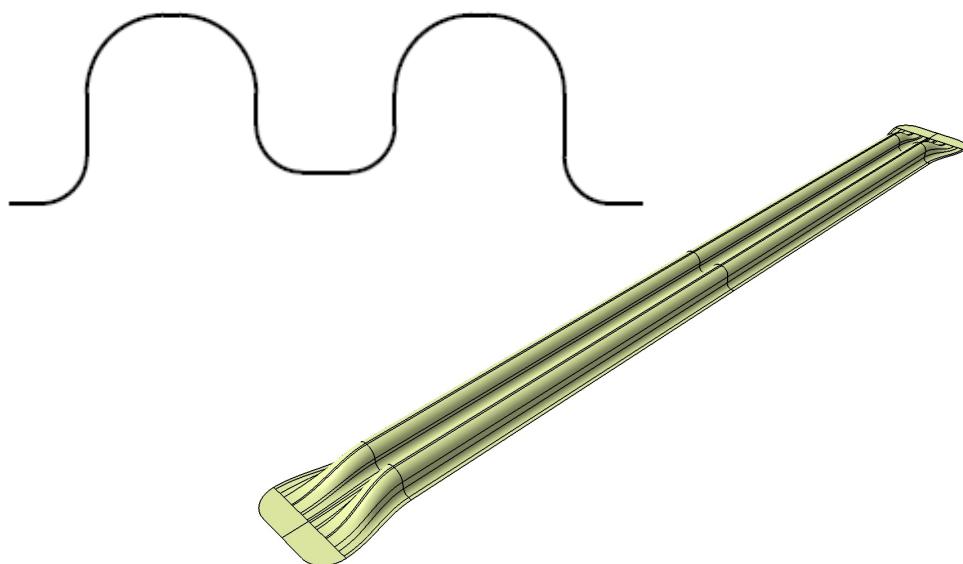


Ilustración 8: Vista isométrica y sección de la barra 4.

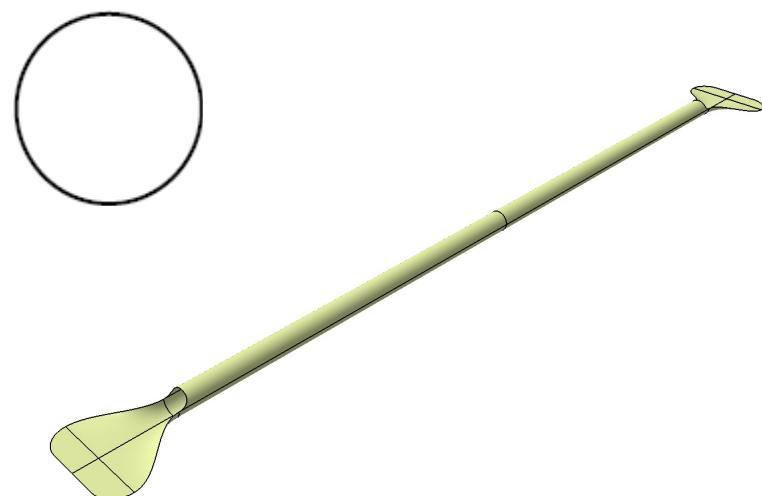


Ilustración 9: Vista isométrica y sección de la barra 5.

1.3 Ubicación.

Se ha dispuesto una única barra en cada ensamblaje de acuerdo con lo mostrado en la ilustración 10.

En esa disposición los esfuerzos se transmitirían al bastidor de un vehículo en las siguientes zonas:

- Intersección del pilar A con la viga transversal de detrás del salpicadero.
- Intersección del pilar B con la viga transversal situada en el suelo detrás de los asientos traseros.

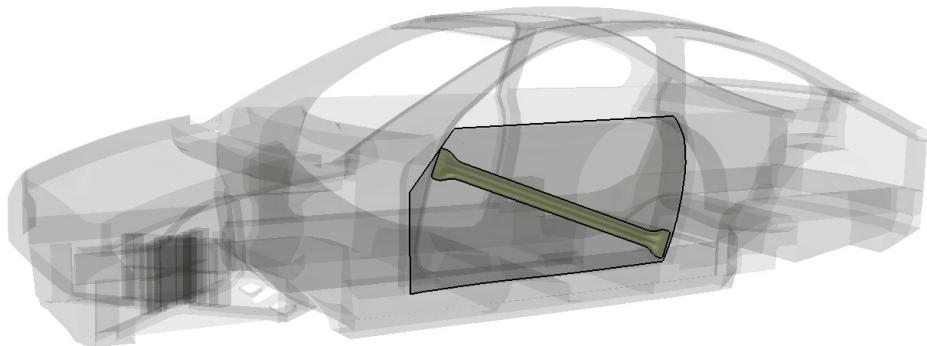


Ilustración 10: Posición de la barra en el interior del vehículo.

2 La norma FMVSS214. Información relevante.

La norma FMVSS214 “Protección frente a impacto lateral” recoge diversos ensayos a realizar sobre un vehículo, para verificar que protege de forma adecuada a sus ocupantes frente a un impacto lateral.

Este estudio va a centrarse exclusivamente en el ensayo S6 “Requisitos de resistencia a aplastamiento de la puerta” (a partir de ahora “S6”) recogido por la norma. La descripción del ensayo S6 se incluye en el Anexo 2.

El apartado S6.3 recoge todos los detalles referidos al ensayo y obtención de resultados, entre otros:

El ensayo debe realizarse al vehículo entero.

El vehículo debe estar apoyado en sus 4 ruedas sobre el suelo y el lateral opuesto al lateral sobre el que se realiza el ensayo debe estar apoyado sobre una superficie indeformable.

El movimiento del vehículo en dirección longitudinal debe estar restringido mediante sujeteciones por delante del eje delantero o detrás del eje trasero.

El impactador cilíndrico debe situarse según la ilustración 11, con su base inferior a 127mm de la parte inferior de la puerta, y centrado en la parte media de la línea imaginaria que recorre la longitud de la puerta a 127mm de altura desde su parte inferior.

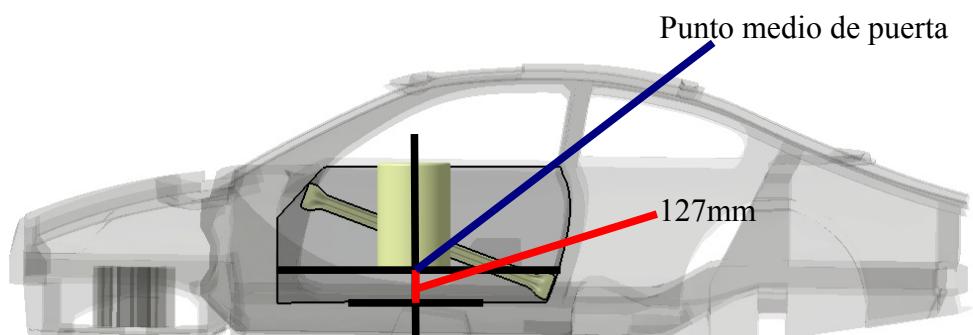


Ilustración 11: Vista lateral del vehículo con impactador, barra, panel exterior de puerta e indicación del posicionamiento del impactador.

La prueba debe iniciarse con el impactador a 0mm de la superficie de la puerta, y el impactador debe desplazarse hacia el interior del vehículo (ver ilustración 12) mediante la aplicación sobre él de una fuerza.

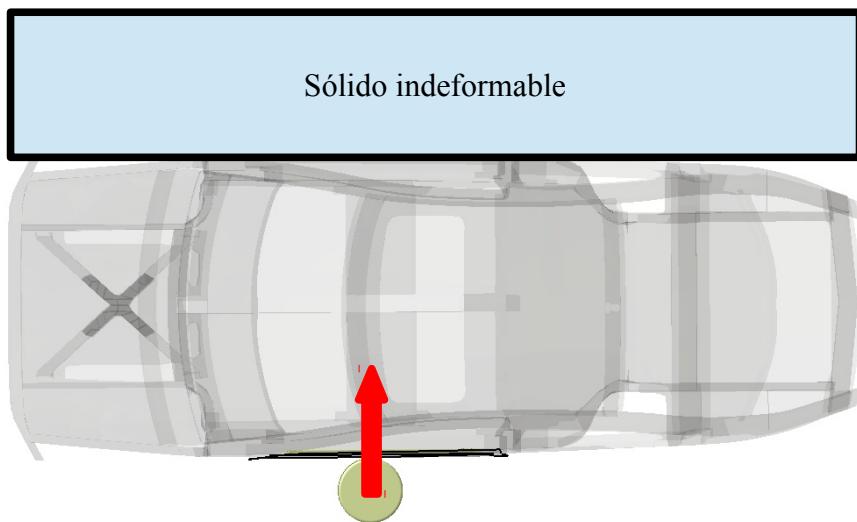


Ilustración 12: Vista superior del vehículo con impactador, barra, panel exterior de puerta, dirección de movimiento del impactador y sólido indeformable.

Este desplazamiento debe realizarse a una velocidad máxima de 12,7mm/s, sin especificarse una velocidad mínima. Debe registrarse la fuerza aplicada en el impactador en su dirección de movimiento mientras penetra en el vehículo, y esta fuerza debe registrarse como mínimo en 18 posiciones, separadas 25,4mm entre sí.

Los requisitos a cumplir por el vehículo varían en función de si el S6 se realiza con los asientos sin montar (S6.1) o montados (S6.2). Se definen 3 resistencias a aplastamiento obtenidas a partir de las fuerzas registradas:

- Resistencia inicial a aplastamiento: la media de la fuerza registrada en los primeros 152mm. La media debe obtenerse representando gráficamente los valores de la fuerza respecto al desplazamiento, integrando la fuerza respecto al desplazamiento, y dividiendo la fuerza por el desplazamiento.
- Resistencia intermedia a aplastamiento: la media de la fuerza registrada en los primeros 305mm.
- Resistencia máxima al aplastamiento: la fuerza máxima registrada en los 457mm.

Según el tipo de ensayo realizado, estas 3 resistencias a aplastamiento deberán ser iguales o superiores a 3 valores numéricos especificados por S6.1 o S6.2 para que el vehículo cumpla con los requisitos.

2.1 Adaptación de la norma al estudio comparativo.

Para el estudio comparativo se va a suponer que el S6 se realiza sobre un turismo (“passenger car” de acuerdo con la norma), sin los asientos instalados.

Dado que el S6 se realiza sobre el vehículo entero, en los resultados del ensayo real influye tanto la estructura de la puerta como el resto de la estructura del vehículo.

Este estudio comparativo no pretende reproducir al completo un ensayo real sobre la totalidad de un vehículo, sino centrarse únicamente en la barra de protección frente a impactos laterales y el panel exterior de la puerta.

Para cualquier geometría de puerta, las fuerzas registradas serán mayores que si se reprodujese el ensayo del vehículo completo, pero se evita la influencia de la deformación del vehículo en los valores de fuerza registrados.

Además de evaluar si las barras cumplen con la norma, se va a estudiar cuáles son capaces de absorber la mayor cantidad de energía en un impacto. Esta energía sería el trabajo realizado para deformar la estructura, y se calcula a partir de los desplazamientos impuestos y las fuerzas registradas.

3 Simulación del ensayo mediante el método de elementos finitos.

3.1 Generalidades.

3.1.1 Descripción del software utilizado.

Para la simulación del ensayo se ha recurrido al software de elementos finitos Ansys Workbench.

Se ha elegido este software por las siguientes razones:

- Facilidad para definir materiales personalizados.
- Capacidad de importar geometría de programas de diseño en 3D y modificarla posteriormente.
- Interfaz gráfica intuitiva.
- Capacidad de mallado automática.
- Capacidad para resolver problemas no lineales con contactos entre piezas.
- Uso del solver de Ansys.

3.1.2 Preproceso.

La geometría del problema se ha importado desde Catia V5.

Se define el problema como un problema de tipo “Static Structural”.

El impactador está modelado como un sólido y el resto de la geometría como superficies, lo que permite variar su espesor y definir a qué lado de la sección se añade.

Los materiales a simular son:

- Acero.
- Aluminio.
- Epoxy reforzado con fibra de carbono, tejido cuasi-isótropo.

Las propiedades mecánicas utilizadas para la simulación se muestran en la tabla 1:

		ρ [kg/m ³]	E [Gpa]	v	σ_f [Mpa]	σ_u [Mpa]	Deformación rotura [%]
Acero	H180BD	7850	200	0,33	240	300	34
	Docol 800DP				500	800	10
	Docol 1000DP				700	1000	7
	Docol 1200M				950	1200	3
Aluminio	6082-T6	2770	71	0,3	310	340	11
	6082-T4				170	260	19
	6016-T4				120	230	21
CFRP cuasi-isótropo (1 y 2)		1550	45	0,33		579	16

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales empleados en la simulación.

Los contactos, condiciones de contorno y desplazamientos impuestos varían en función de si el ensayo se realiza sobre la barra o sobre el conjunto formado por la barra y el panel exterior, y se detallan en cada caso.

Se especifica que se quiere hacer un análisis no lineal, y que el solver debe tener en cuenta grandes desplazamientos.

El mallado se ha realizado de la siguiente forma:

- El impactador se ha modelado con la malla más fina en la mitad que contacta con la geometría de la puerta.
- La barra se ha mallado con la técnica semiautomática “Mapped face meshing”, que genera un mallado uniforme con una calidad aceptable.
- El panel exterior de la puerta se ha mallado con la técnica “Mapped face meshing”, refinando la malla en la parte inferior de la puerta.

3.1.3 Solver y consideraciones sobre el cálculo.

Dado que S6 no especifica una velocidad mínima de realización del ensayo, el ensayo se puede modelar mediante un procedimiento implícito:

- Se impone un desplazamiento forzado que aumenta de forma gradual en distintos pasos.
- A partir de este desplazamiento se calculan las reacciones en los apoyos para cada paso.

El módulo “Static Structural” de Ansys Workbench permite la definición de ese desplazamiento forzado.

El solver de Ansys Workbench funciona de la siguiente forma:

- Envía cada paso al solver de Ansys, especificando cómo debe dividirlo en subpasos. La división puede definirse como un número máximo de iteraciones para alcanzar la convergencia, o como un “tiempo” que puede durar cada subpaso, partiendo de que cada paso se define con una duración de “1s”.
- Para cada subpaso intenta resolver el problema no lineal mediante el método iterativo de Newton-Raphson (para una descripción breve del funcionamiento del método se recomienda la lectura de (3)). Si el subpaso converge, intenta resolver el siguiente subpaso.
- Al finalizar un paso n, el solver de Ansys Workbench recibe los resultados y los utiliza como entrada para el paso n+1.
- El solver devuelve a Ansys Workbench los resultados de cada paso y subpaso.

En determinados casos el solver no es capaz de alcanzar la convergencia después de el número máximo de iteraciones definidas, y termina la resolución del problema de forma prematura. Durante la realización de este estudio se ha encontrado que los siguientes factores afectan negativamente a la convergencia:

- Desplazamientos forzados aplicados de forma poco gradual en relación a la dimensión de la barra.
- Número de pasos insuficiente.
- Número de subpasos insuficiente.
- Problemas derivados del contacto entre partes.
- Calidad del mallado baja o excesiva distorsión de los elementos.
- Módulo de Young o Módulo Tangente con pendiente muy reducida (materiales con rigidez muy baja o partes de la geometría en las que se ha sobrepasado ampliamente el límite de fluencia).

3.1.4 Postproceso.

Ansys Workbench permite analizar de diversas formas los resultados proporcionados por el solver.

Para este estudio los resultados relevantes son:

- Reacciones en los empotramientos/apoyos, en la dirección de movimiento el impactador.
- Tensión de Von Mises.
- Energía de deformación.

3.2 Elección de la geometría óptima de la barra en base a la resistencia a impacto.

Para la comparativa se ha escogido un acero de alta resistencia Docol 1000DP, y un espesor total de 1,2mm definido a ambos lados del perfil, como se muestra en la ilustración 13:

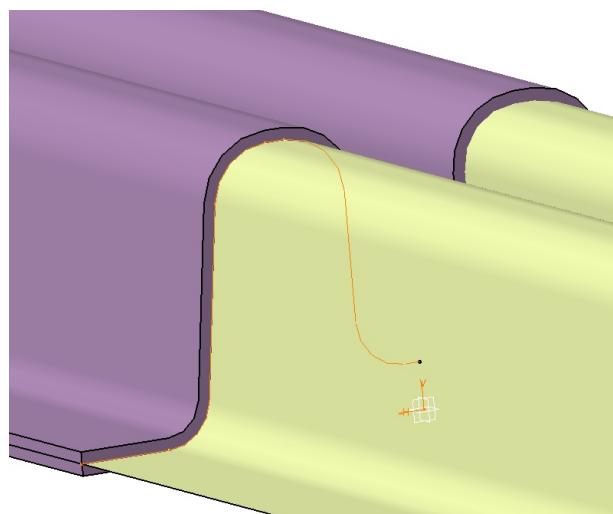


Ilustración 13: Perfil y espesor añadido a ambos lados, en beige y violeta respectivamente.

Se verificará el cumplimiento de la norma mediante:

- Verificación del último subpaso en el que la barra no ha superado la tensión de rotura en toda su sección. Se considera que la barra rompería en el siguiente subpaso, y no sería capaz de ofrecer resistencia alguna al aplastamiento.
- Cálculo de las resistencias a aplastamiento incluyendo datos hasta el subpaso previo a la rotura.

3.2.1 Desplazamientos impuestos, condiciones de contorno y contactos.

En esta simulación se ha omitido el panel exterior de la puerta, suponiendo que la barra es opone la suficiente resistencia a la penetración por sí sola como para cumplir con la norma.

Se considera que el impactador se ha movido los primeros 16mm sin encontrar resistencia. Se le impone al impactador un desplazamiento de 441mm hacia la barra, de forma que al acabar la simulación ese desplazamiento se correspondería con los 457mm definidos en S6.

Las barras se han empotrado en sus extremos, suponiendo que están ancladas a la estructura de la puerta y que la puerta está integrada en el vehículo de forma que el único elemento que sufre una deformación significativa es la barra, ver figura 14.

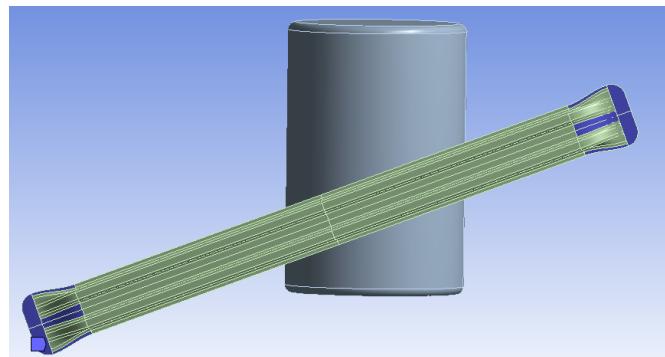


Ilustración 14: Empotramientos en la barra, señalados en azul.

Se ha definido el empotramiento de forma que la geometría de transición entre la parte plana de la barra y el perfil no tenga influencia en los resultados.

El contacto entre el impactador y la barra se ha definido como un contacto sin fricción:

- Este tipo de contacto actualiza para cada paso y subpaso el área de contacto.
- Permite que la barra se deforme libremente en el contacto con el impactador. Se estima que esta sería la situación más desfavorable a la hora de evaluar la rigidez de la viga, ya que permite que el perfil se aplane.
- Permite además comparar distintos materiales en igualdad de condiciones, incluso si no se conoce su coeficiente de fricción.

Las superficies de contacto entre el impactador y la barra pueden verse en la ilustración 15.

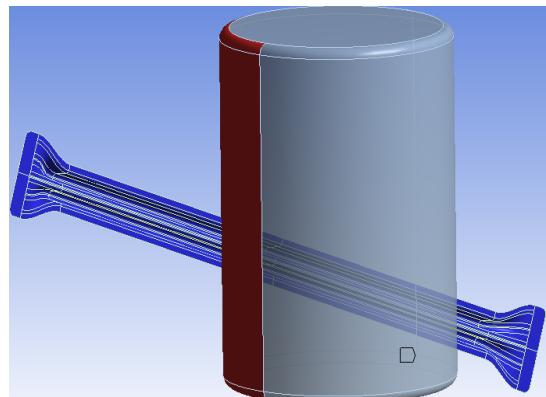


Ilustración 15: Superficies de contacto entre impactador (en rojo) y la barra (en azul).

3.2.2 Resultados.

El estado tensional de las 5 distintas barras en el subpaso previo a la rotura puede observarse en las ilustraciones 16 a 20.

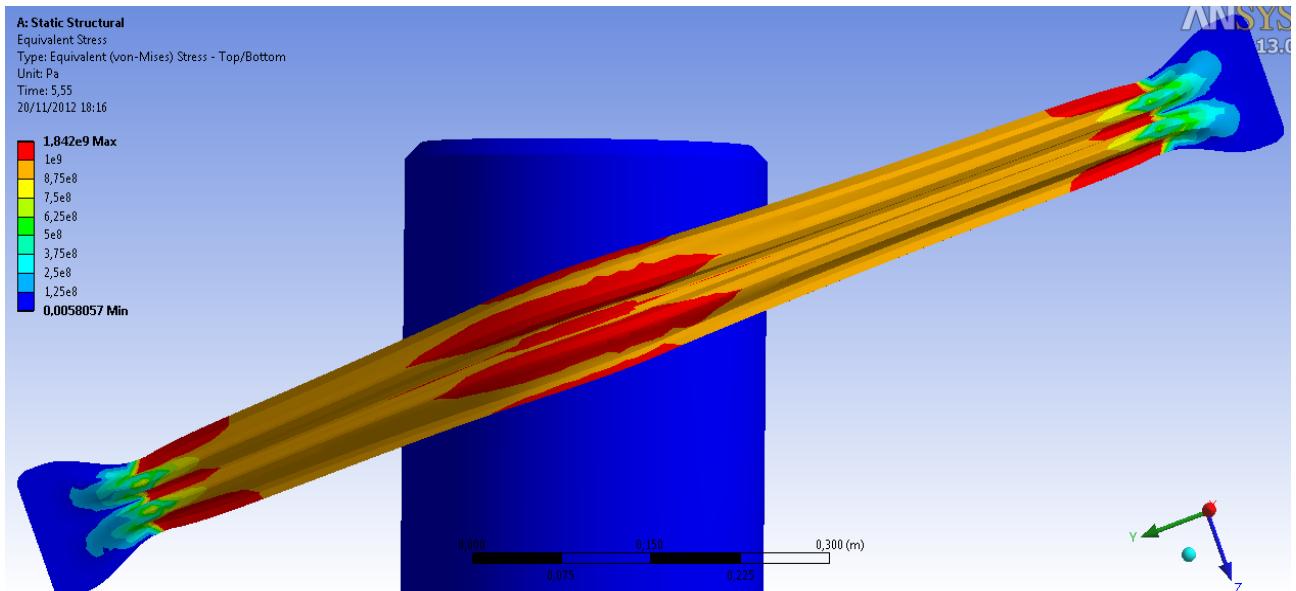


Ilustración 16: Estado tensional de la barra 1 en el subpaso previo a la rotura.

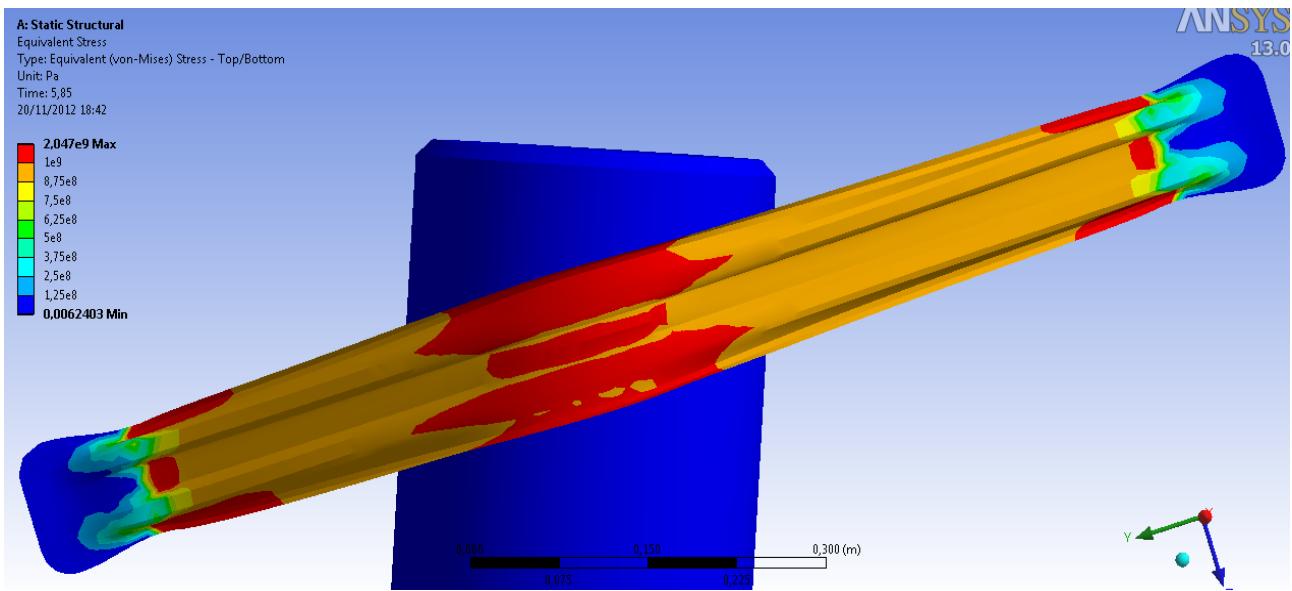


Ilustración 17: Estado tensional de la barra 2 en el subpaso previo a la rotura.

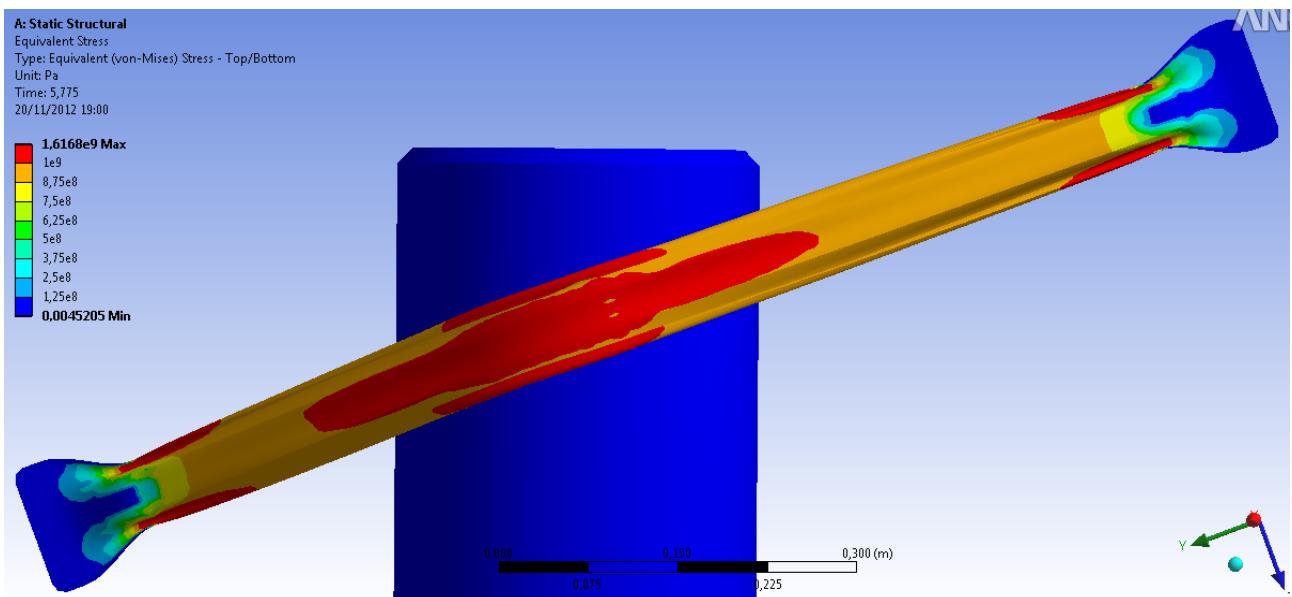


Ilustración 18: Estado tensional de la barra 3 en el subpaso previo a la rotura.

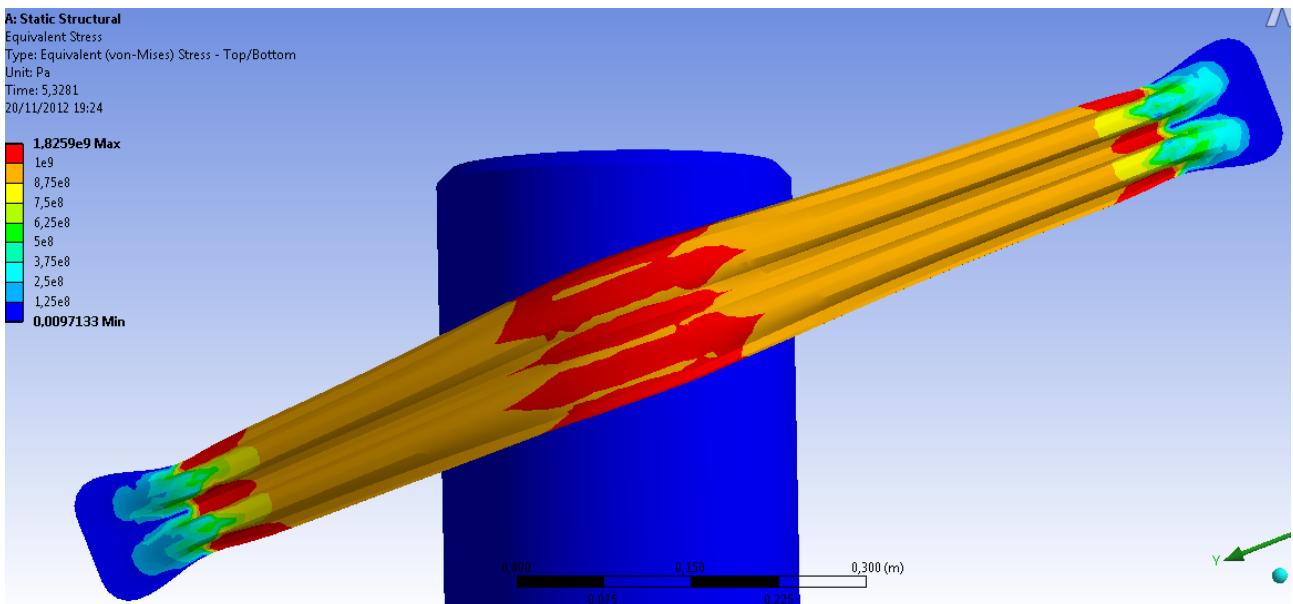


Ilustración 19: Estado tensional de la barra 4 en el subpaso previo a la rotura.

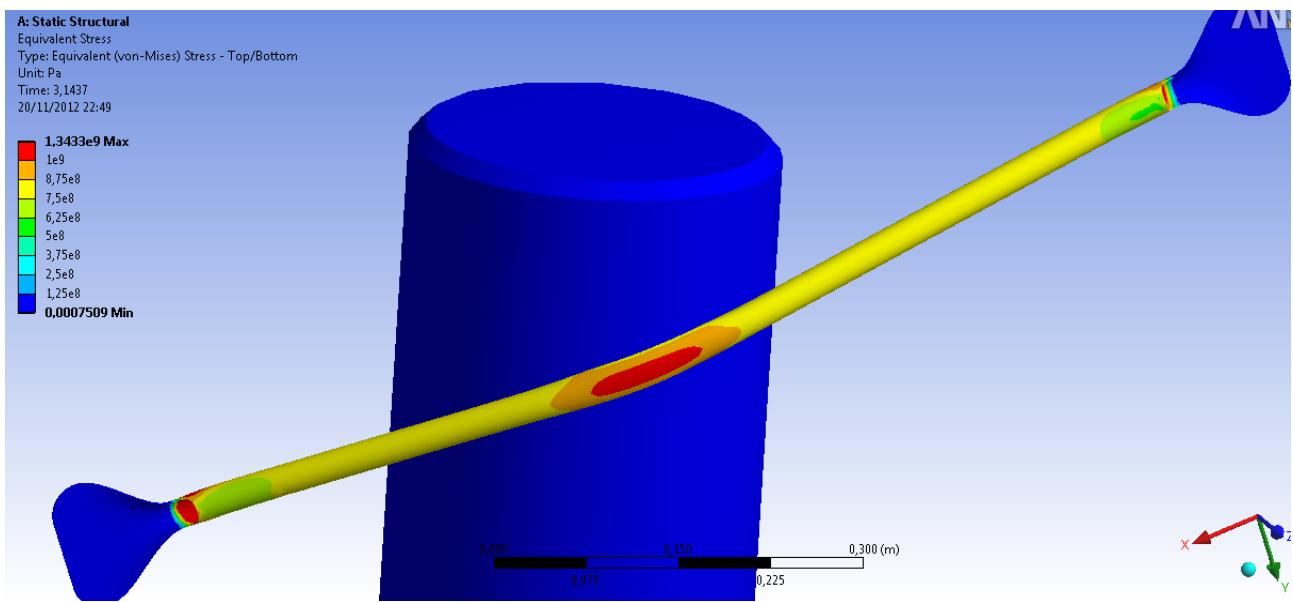


Ilustración 20: Estado tensional de la barra 5 en el subpaso previo a la rotura.

Los datos numéricos obtenidos se muestran en la tabla 2.

	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Requisito
Resistencia inicial al aplastamiento [N]	27487,350	30306,213	24728,546	33459,462	11618,488	10000
Resistencia media al aplastamiento [N]	26260,120	30710,671	25331,754	29242,611	7598,243	15570
Resistencia máxima al aplastamiento [N]	110980,000	118560,000	95445,000	109370,000	34958,000	31140
Energía de deformación [J]	8546,900	9227,700	7421,900	8217,000	1716,300	
“Instante” de rotura [s]	5,550	5,850	5,775	5,328	3,144	
Posición de impactador en rotura [m]	0,192	0,199	0,197	0,186	0,123	
Cumple con la norma	Sí	Sí	Sí	Sí	No	

Tabla 2: Resultados aplastamiento de barras 1 a 5, Docol 1000, 1,2mm.

La barra 2 presenta los valores más elevados de:

- Resistencia media al aplastamiento.
- Resistencia máxima al aplastamiento.
- Energía de deformación.

Por ello se considera que es la que presentará mejor comportamiento en resistencia a aplastamiento.

Los resultados anteriores no tienen en cuenta que las distintas barras tienen distinta sección, y por ello distinto peso.

Se han recalculado los valores de la tabla X teniendo en cuenta la sección, se muestran en la tabla 3:

	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
Longitud [mm]	130,903	142,265	110,266	142,531	75,398
Espesor [mm]	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
Sección [mm ²]	157,084	170,718	132,319	171,037	90,478
Resistencia inicial / sección [N/mm ²]	174,985	177,522	186,886	195,627	128,413
Resistencia media / sección [N/mm ²]	167,173	179,891	191,445	170,972	83,979
Resistencia máxima / sección [N/mm ²]	706,503	694,479	721,327	639,452	386,371
Energía de deformación / sección [J/mm ²]	54,410	54,052	56,091	48,042	18,969

Tabla 3: Resultados aplastamiento de barras 1 a 5, Docol 1000, 1,2mm; considerando sección.

Se observa que la barra 3 es la que tiene mejor comportamiento si se tiene en cuenta su sección, y por ello su peso.

Como en este estudio el parámetro crítico es la altura disponible para la barra, se sigue considerando que la barra 2 es la elección óptima.

Si la altura disponible no fuese un parámetro crítico, a igualdad de espesor la barra 3 dimensionada con mayor altura funcionaría mejor frente a aplastamiento que la barra 2.

3.3 Elección de la geometría óptima de la barra en base a la rigidez a torsión.

Dado que la rigidez torsional es un parámetro importante para el buen comportamiento dinámico del vehículo, es interesante evaluar qué geometría de barra aporta más rigidez torsional.

Se ha decidido evaluar la rigidez a torsión del conjunto barra-panel exterior de puerta mediante un análisis modal.

Para ello se va a restringir el movimiento del conjunto y se van a determinar las frecuencias de los primeros modos de vibración.

3.3.1 Condiciones de contorno y contactos.

Se permite el movimiento del conjunto de la barra y el panel exterior de la puerta, restringidos de forma que pueda producirse torsión en la puerta. Para asegurar el movimiento solidario de la barra y la esquina del panel que puede torsionar libremente, se han incluido unos elementos de unión entre puntos de ambas geometrías.

Las condiciones de contorno pueden verse en la ilustración 21:

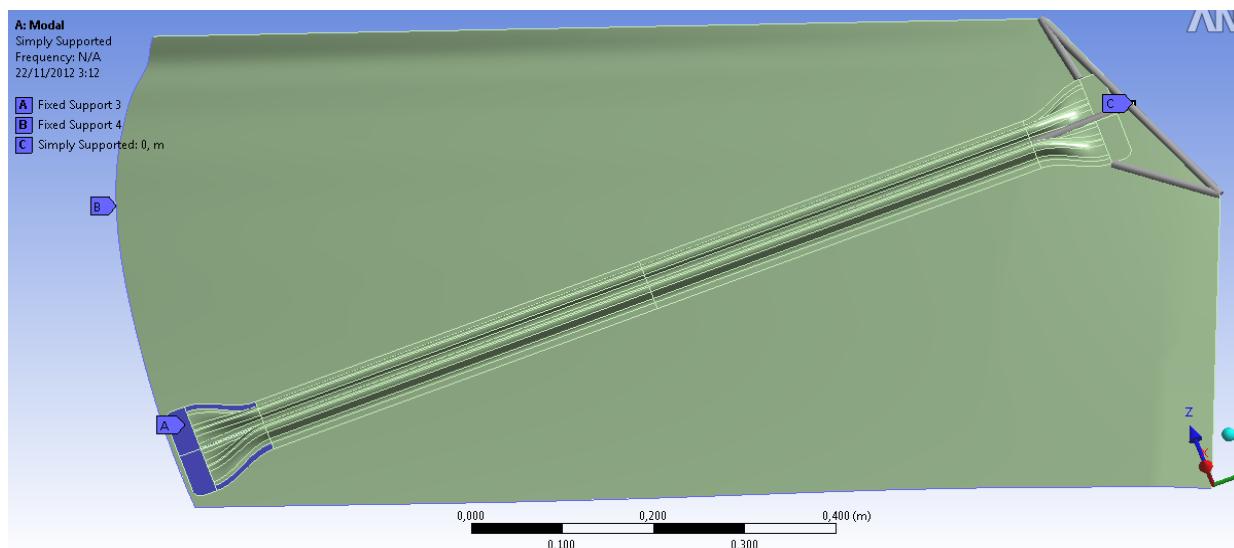


Ilustración 21: Condiciones de contorno en el problema de análisis modal: Empotramiento en A y B y apoyo simple en el punto C.

3.3.2 Resultados.

Se obtienen las frecuencias de los primeros 4 modos de vibración para cada una de las 5 barras, que se muestran gráficamente en la serie de ilustraciones 22 a 26:

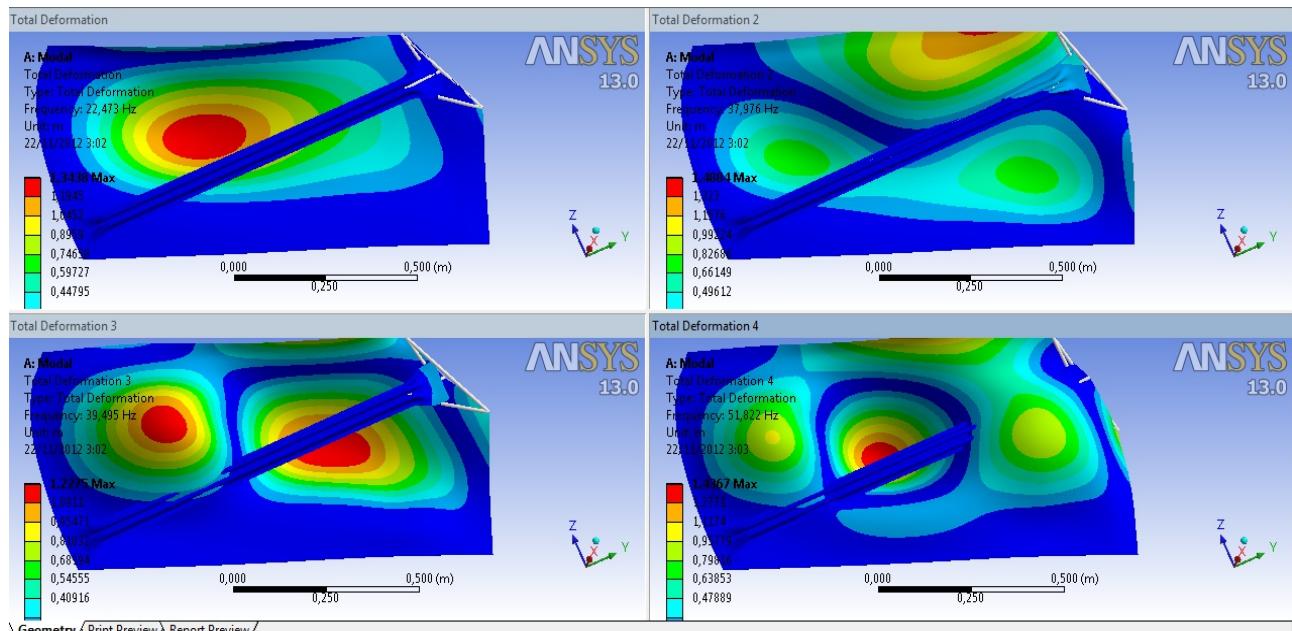


Ilustración 22: Primeros 4 modos de vibración para la barra 1.

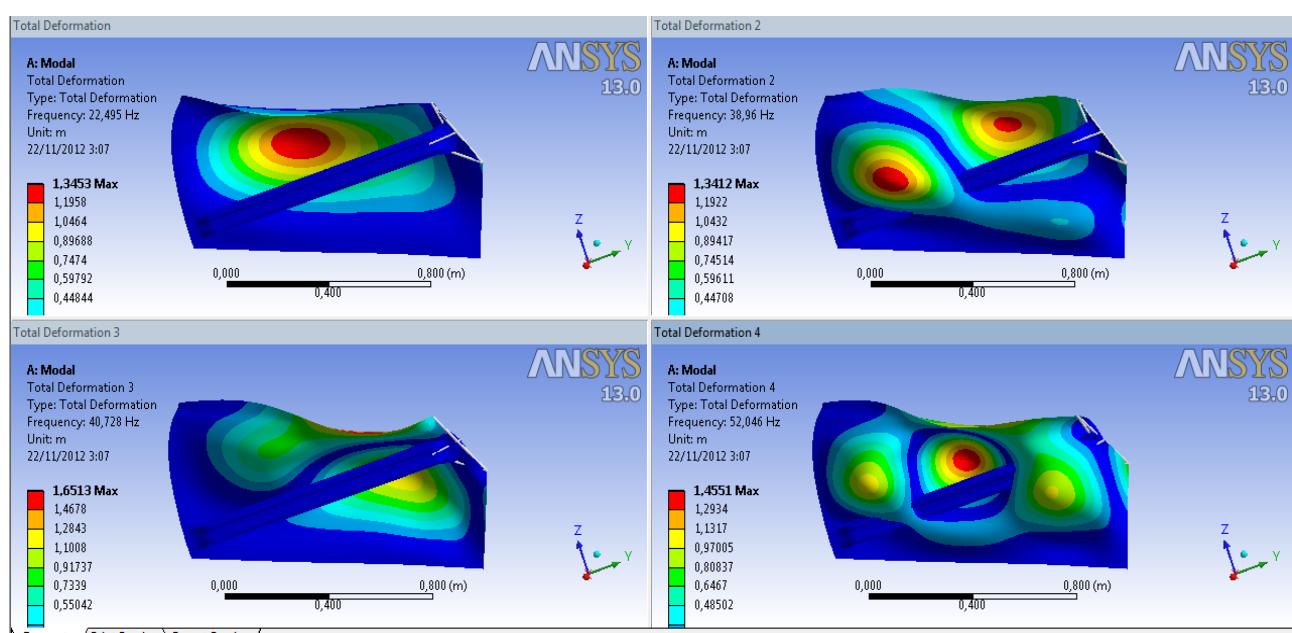


Ilustración 23: Primeros 4 modos de vibración para la barra 2.

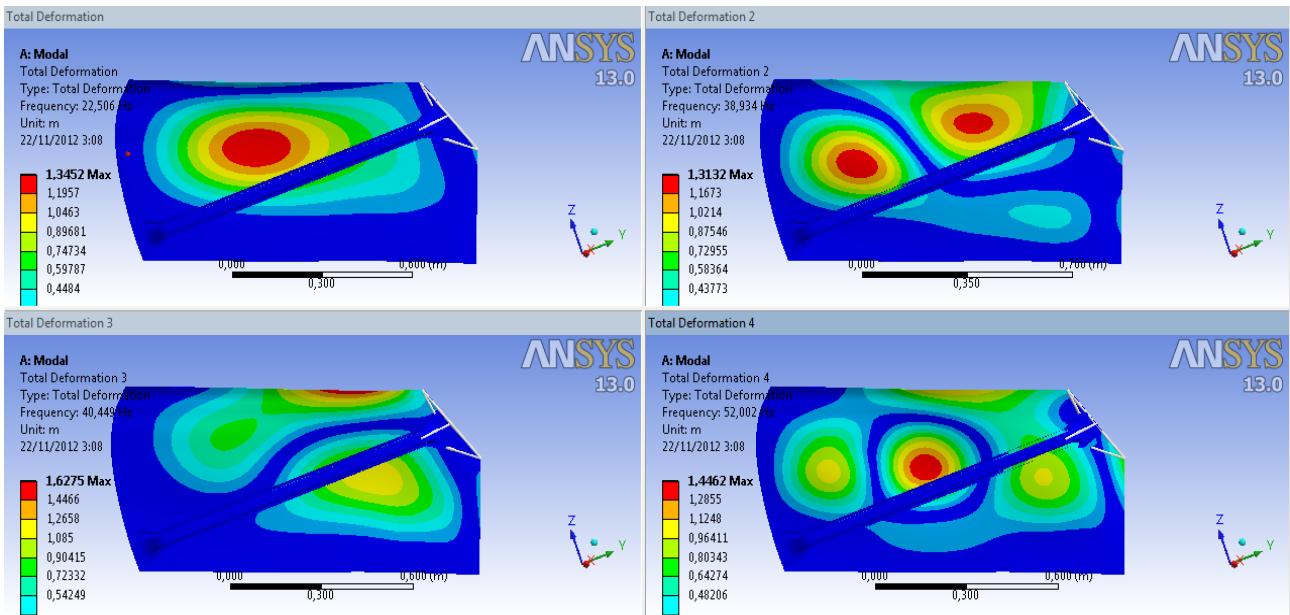


Ilustración 24: Primeros 4 modos de vibración para la barra 3.

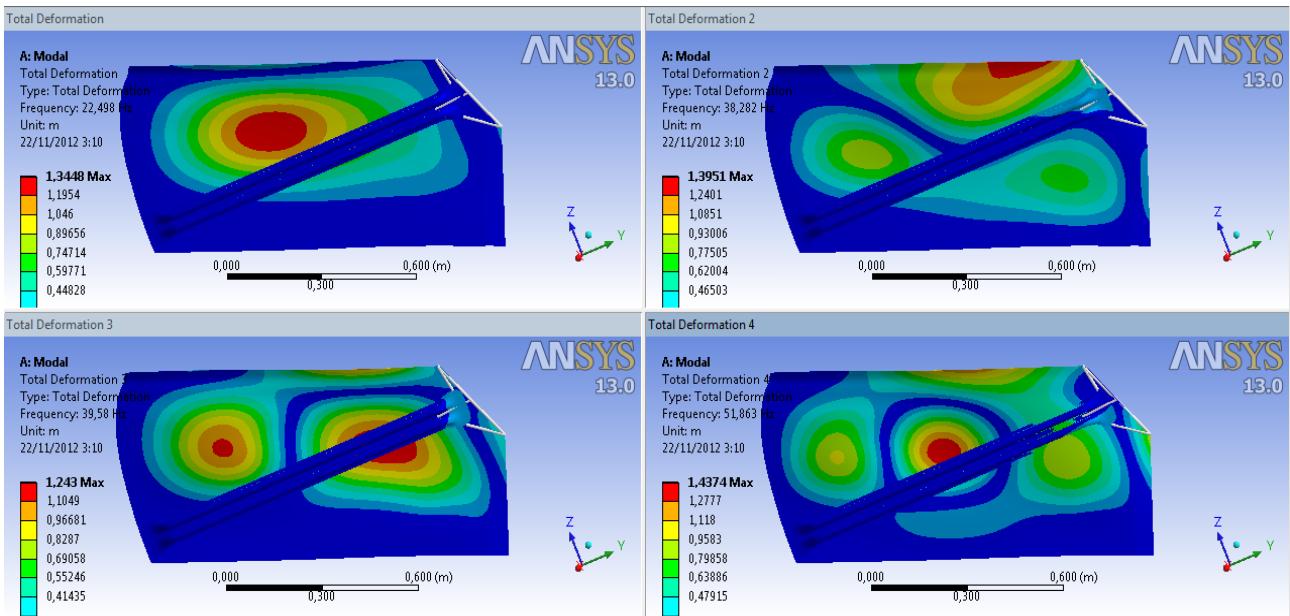


Ilustración 25: Primeros 4 modos de vibración para la barra 4.

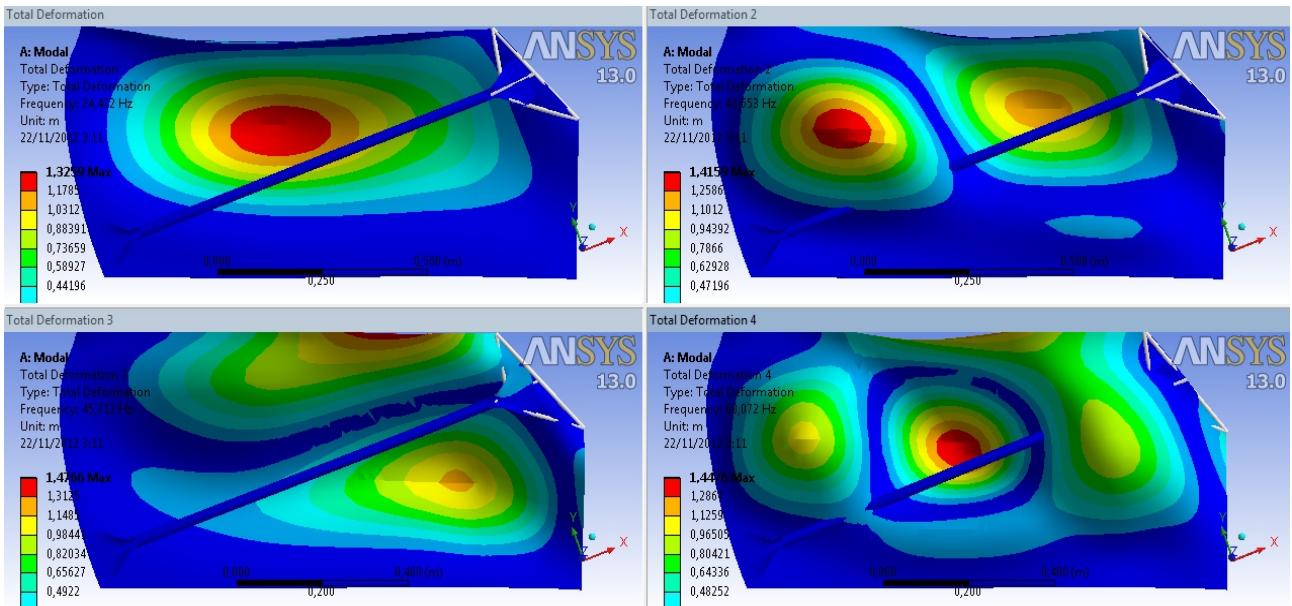


Ilustración 26: Primeros 4 modos de vibración para la barra 5.

Los valores de frecuencias se resumen en la tabla 4:

Modo	Frecuencia [Hz]				
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
1	22,473	22,495	22,506	22,498	24,422
2	37,976	38,96	38,934	38,282	43,653
3	39,495	40,728	40,449	39,58	45,712
4	51,822	52,046	52,002	51,863	60,072

Tabla 4: Frecuencias de vibración para los primeros 4 modos de las barras.

No existe una diferencia apreciable entre las barras 1, 2, 3 y 4, pero la barra 5 tiene las frecuencias más elevadas.

Eso implica que presenta el mejor comportamiento a torsión, se puede justificar porque la geometría de la barra 5 es una sección circular cerrada.

3.3.3 Elección final de la barra.

Atendiendo al criterio de resistencia al aplastamiento como criterio primario y al criterio de rigidez a torsión como secundario, se ha elegido la barra 2 para los análisis de influencia de espesor, análisis en materiales alternativos al acero y la construcción del modelo completo junto con el panel exterior de la puerta.

3.4 Análisis de la influencia del espesor del perfil en la barra de acero.

Sobre la barra 2, que ha sido elegida como geometría óptima, se va a analizar la influencia del tipo de acero utilizado, repitiéndose la simulación con Docol 800 DP y con Docol 1200 M, manteniendo un espesor de 1,2mm.

La tabla 5 muestra los resultados obtenidos:

Barra 2	Docol 1000DP	Docol 800 DP	Docol 1200M
Resistencia inicial al aplastamiento [N]	30306,213	22023,284	42439,540
Resistencia media al aplastamiento [N]	30710,671	32244,950	21150,197
Resistencia máxima al aplastamiento [N]	118560,000	106390,000	116690,000
Energía de deformación [J]	9227,700	9693,800	6470,800
“Instante” de rotura [s]	5,850	7,100	4,000
Posición de impactador en rotura [m]	0,199	0,231	0,152

Tabla 5: Resultados aplastamiento barra 2, en Docol 1000DP, 800DP y 1200M, 1,2mm.

Todos los aceros cumplirían con la norma, y se observa que la elección de un acero u otro dependería de si se prima más un buen comportamiento en la penetración inicial del impactador o se quiere conseguir que la barra sea capaz de deformarse sin que se produzca la rotura.

3.5 Análisis de la barra en aluminio.

Se va a analizar la posibilidad de sustituir el acero en la barra 2 por aluminio manteniendo una resistencia al aplastamiento similar a la obtenida con el acero Docol 1000DP.

El aluminio elegido es un 6082, con dos posibles tratamientos: T4 y T6.

Conocido el espesor y densidad del acero empleado y la densidad del aluminio (tabla 6), se determina el espesor máximo que permitiría un ahorro de peso, siendo éste de 3,4mm.

Barra 2	Acero	Aluminio
Superficie [m ²]	0,150	0,150
Espesor [mm]	1,200	3,400
Densidad [kg/m ³]	7850,000	2770,000
Masa [kg]	1,409	1,408

Tabla 6: Comparativa de espesores máximos para igual peso de barra 2, en acero y aluminio.

En la tabla 7 se pueden observar los resultados obtenidos con el aluminio 6082-T6 y -T4.

Barra 2	Docol 1000DP	6082-T6	6082-T4
Resistencia inicial al aplastamiento [N]	30306,213	22986,278	20466,159
Resistencia media al aplastamiento [N]	30710,671	11455,457	48050,040
Resistencia máxima al aplastamiento [N]	118560,000	66861,000	112360,000
Energía de deformación [J]	9227,700	2406,500	15253,000
“Instante” de rotura [s]	5,850	3,328	9,875
Posición de impactador en rotura [m]	0,199	0,129	0,302
Cumple con la norma	Sí	No	Sí

Tabla 7: Resultados aplastamiento barra 2, en Docol 1000DP (1,2mm), aluminio 6082-T6 y T4 (3,4mm).

El rendimiento de la barra en aluminio 6082-T4 en una prueba de resistencia frente a aplastamiento es suficientemente bueno, siendo superior a la barra en acero Docol D1000DP en absorción de energía y resistencia media al aplastamiento.

Se podría reducir el espesor de la barra en aluminio 6082-T4 y seguir cumpliendo con los requisitos.

3.6 Análisis de la barra en CFRP.

Se va a analizar la posibilidad de sustituir el acero en la barra 2 por epoxy reforzado con un laminado quasi-isótropo de fibra de carbono (a partir de ahora “CFRP”) manteniendo una resistencia al aplastamiento similar a la obtenida con el acero Docol 1000DP.

Se va a estudiar el CFRP para el fallo de la primera fibra.

Conocido el espesor y densidad del acero empleado y la densidad del CFRP (tabla 8), se determina el espesor máximo que permitiría un ahorro de peso.

Barra 2	Acero	CFRP
Superficie [m ²]	0,150	0,150
Espesor [mm]	1,200	6,000
Densidad [kg/m ³]	7850,000	1550,000
Masa [kg]	1,409	1,391

Tabla 8: Comparativa de espesores máximos para igual peso de barra 2, en acero y CFRP.

Los resultados mostrados en la tabla 9 indican que es posible cumplir la norma con el espesor de 6mm, pero con el valor de la resistencia media muy próximo al requisito de 15500N.

Barra 2	Docol 1000DP	CFRP
Resistencia inicial al aplastamiento [N]	30306,213	50683,703
Resistencia media al aplastamiento [N]	30710,671	16467,293
Resistencia máxima al aplastamiento [N]	118560,000	168740,000
Energía de deformación [J]	9227,700	4145,600
“Instante” de rotura [s]	5,850	2,144
Posición de impactador en rotura [m]	0,199	0,105
Cumple con la norma	Sí	Sí

Tabla 9: Resultados aplastamiento barra 2, en Docol 1000DP (1,2mm), CFRP (6mm).

Los resultados del CFRP son especialmente buenos en la resistencia inicial al aplastamiento y resistencia máxima al aplastamiento.

Sería interesante analizar en posteriores estudios el comportamiento de la barra con un modelo de material más complejo que considere el fallo de posteriores fibras, y utilizando distintas configuraciones de laminado optimizadas para el ensayo.

4 Análisis del conjunto barra-panel exterior de puerta.

Se va a analizar el conjunto barra-panel exterior de la puerta para comprobar la influencia que tiene el panel exterior en los resultados del ensayo S6.

Se verificará el cumplimiento de la norma mediante:

- Verificación del último subpaso en el que la barra no ha superado la tensión de rotura en toda su sección. Se considera que la barra rompería en el siguiente subpaso, y no sería capaz de ofrecer resistencia alguna al aplastamiento.
- Verificación del último subpaso en el que el panel exterior de la puerta no ha superado la tensión de rotura en toda su sección. Se considera que el panel exterior de la puerta rompería en el siguiente subpaso, y no sería capaz de ofrecer resistencia alguna al aplastamiento.
- Cálculo de las resistencias a aplastamiento incluyendo datos hasta el subpaso previo a la rotura, para la barra, y para la puerta.

Dado que no se dispone del resto de geometría de la puerta, se impondrán condiciones de contorno que representen cómo limitaría el movimiento de la puerta.

4.1 Desplazamientos impuestos, condiciones de contorno y contactos.

El impactador parte de un estado inicial en el que está en contacto con la puerta, y se mueve 457mm hacia el interior de la puerta.

Se ha restringido totalmente el movimiento de la puerta en todo su contorno excepto en el lado superior.

Esto representaría cómo la puerta está encajada en el vehículo de forma que en caso de impacto los pilares A y B y la talonera impiden que el marco de la puerta penetre en el vehículo, mientras que en la parte superior de la puerta no existe estructura alguna que impida su penetración en el habitáculo.

Las barras se han empotrado en sus extremos, suponiendo que están ancladas a la estructura de la puerta y que la deformación que sufren los puntos de anclaje es despreciable en comparación con la deformación que sufriría la parte central de la puerta, tal y como se puede ver en las ilustraciones 28 a 27.

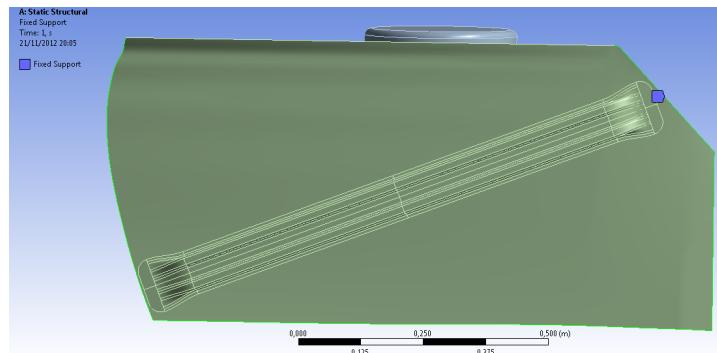


Ilustración 28: Empotramientos en los laterales y parte inferior del panel exterior.

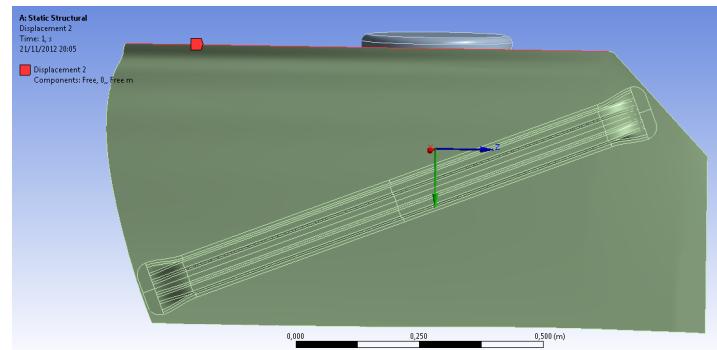


Ilustración 29: Desplazamiento permitido en la dirección de movimiento del impactador, en parte superior del panel exterior.

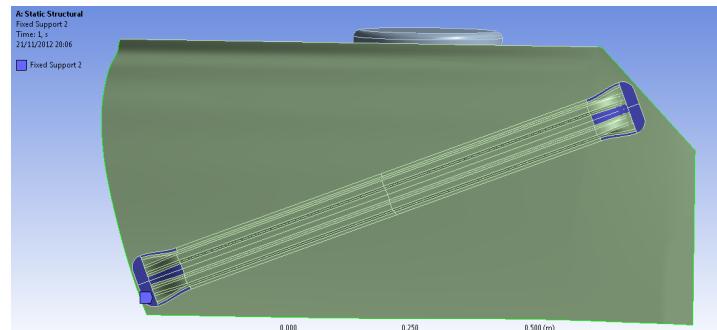


Ilustración 27: Empotramientos en la barra.

Los contactos entre el impactador y el panel exterior de la puerta, y entre el panel exterior de la puerta y la barra se han definido como contactos sin fricción, y se muestran en las ilustraciones 30 y 31.

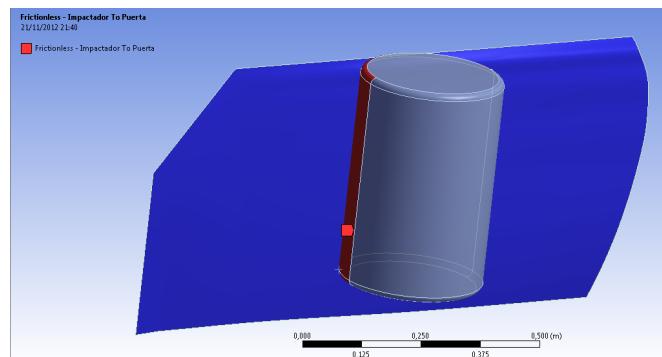


Ilustración 30: Contacto entre impactador y panel exterior.

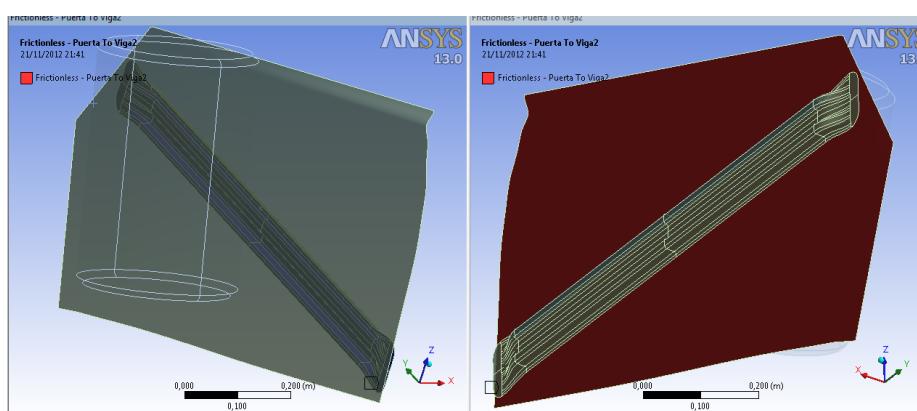


Ilustración 31: Contacto entre panel exterior y barra.

4.2 Resultados.

4.2.1 Acero.

El panel exterior se ha modelado con acero H180BD y la barra 2 con Docol 1000DP, con los siguientes espesores:

- Panel exterior: 0,8mm.
- Barra 2: 1,2mm.

El acero H180BD se utiliza para fabricar paneles de puerta (ver página 20 de (4)).

Se obtienen los siguientes resultados, mostrados en la tabla 10:

Acero	Barra 2 ref.	Barra 2	Panel ext.	Conjunto
Resistencia inicial al aplastamiento [N]	30306,213	42533,0746	44767,522	87300,596
Resistencia media al aplastamiento [N]	30710,671	45058,6882	38751,829	83744,725
Resistencia máxima al aplastamiento [N]	118560,000	151480	114330,000	256370
Energía de deformación [J]	9227,700	12531,5865	10977,030	23508,616

Tabla 10. Resultados aplastamiento barra 2 de referencia (modelo sin panel exterior), barra 2 en modelo con panel exterior, panel exterior y conjunto completo, en acero.

En las ilustraciones 32 y 33 se puede observar el estado tensional de las piezas antes de su rotura:

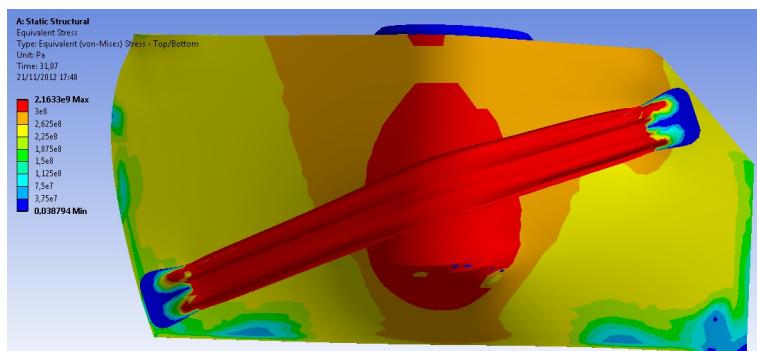


Ilustración 32: Estado tensional del panel exterior de la puerta en H180BD en el subpaso previo a la rotura.

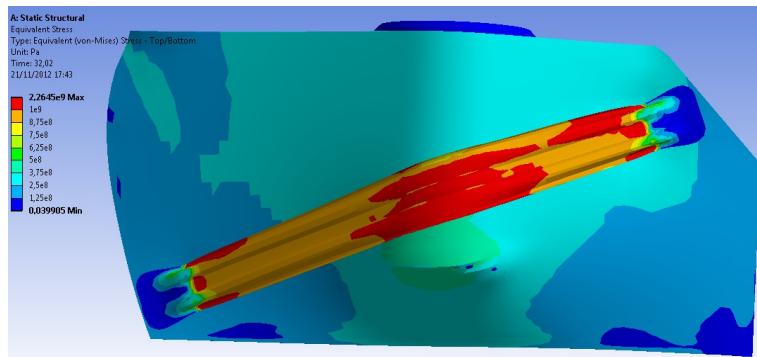


Ilustración 33: Estado tensional de la barra en Docol 1000DP en el subpaso previo a la rotura.

Los resultados numéricos muestran que al modelar el conjunto barra-panel exterior la resistencia al aplastamiento aumenta de forma notable.

Si se analizan los resultados numéricos por separado para la barra y para el panel exterior, se puede comprobar que de forma muy aproximada están aportando la mitad de la resistencia al aplastamiento.

También es destacable que la barra trabaja mejor en contacto con el panel exterior de la puerta que cuando el impactador la deforma directamente. Puede deberse a que el área de contacto es mayor.

4.2.2 Aluminio.

La barra se ha modelado en aluminio 6082-T4, y siguiendo las recomendaciones de la bibliografía (ver página 44 de (5)) se ha modelado el panel exterior de la puerta en aluminio 6016-T4.

Se ha simulado el conjunto de forma que el peso de la estructura sea la misma que en acero. El espesor de la barra en aluminio se ha calculado previamente como 3,4mm, y la tabla 11 muestra que el espesor del panel exterior para mantener el peso debe ser de 2,2mm como máximo.

Panel exterior	Acero	Aluminio
Superficie [m²]	0,656	0,656
Espesor [mm]	0,800	2,200
Densidad [kg/m³]	7850,000	2770,000
Masa [kg]	4,121	3,999

Tabla 11: Comparativa de espesores máximos para igual peso de panel exterior de puerta, en acero y aluminio.

Se obtienen los siguientes resultados, mostrados en la tabla 12:

Aluminio.	Barra 2 ref.	Barra 2	Panel ext.	Conjunto
Resistencia inicial al aplastamiento [N]	20466,159	33497,3646	69889,268	103386,633
Resistencia media al aplastamiento [N]	48050,040	86103,1434	108936,285	192341,319
Resistencia máxima al aplastamiento [N]	112360,000	187990	257040,000	407910
Energía de deformación [J]	15253,000	24708,1533	31534,698	56242,851

Tabla 12: . Resultados aplastamiento barra 2 de referencia (modelo sin panel exterior), barra 2 en modelo con panel exterior; panel exterior y conjunto completo, en aluminio.

En las ilustraciones 34 y 35 se puede observar el estado tensional de las piezas antes de su rotura:

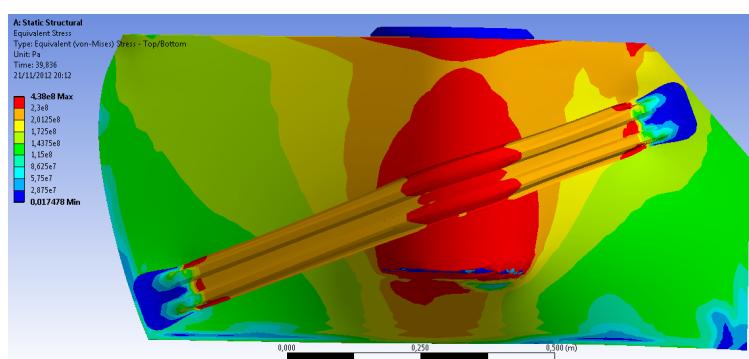


Ilustración 34: Estado tensional del panel exterior de la puerta en aluminio 6016-T4 en el subpaso previo a la rotura.

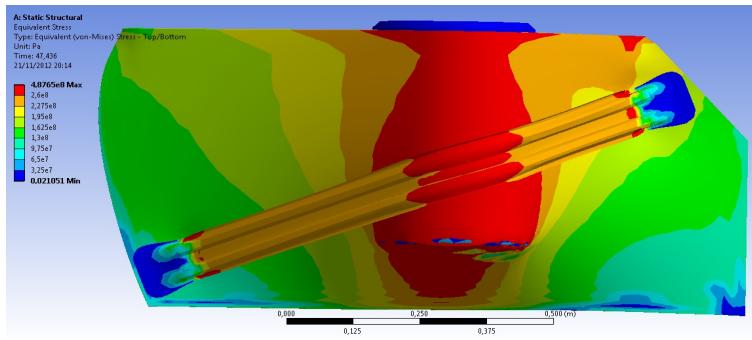


Ilustración 35: Estado tensional de la barra en aluminio 6082-T4 en el subpaso previo a la rotura.

Los resultados numéricos muestran que al modelar el conjunto barra-panel exterior la resistencia al aplastamiento aumenta de forma notable.

Se comprueba que el panel exterior es el que está ofreciendo la mayor resistencia al aplastamiento. Muy probablemente la puerta cumpliese con los requisitos sin necesidad de la barra.

También es destacable que al igual que en el modelo en acero, la barra trabaja mejor en contacto con el panel exterior de la puerta que cuando el impactador la deforma directamente.

4.2.3 CFRP.

Se ha simulado el conjunto de forma que el peso de la estructura sea la misma que en acero. El espesor de la barra en CFRP se ha calculado previamente como 6mm, y la tabla 13 muestra que el espesor del panel exterior para mantener el peso debe ser de 4mm como máximo.

Panel exterior	Acero	CFRP
Superficie [m²]	0,656	0,656
Espesor [mm]	0,800	4,000
Densidad [kg/m³]	7850,000	1550,000
Masa [kg]	4,121	4,069

Tabla 13: Comparativa de espesores máximos para igual peso de panel exterior de puerta, en acero y CFRP.

Se obtienen los siguientes resultados, mostrados en la tabla 14:

CFRP.	Barra 2 ref.	Barra 2	Panel ext.	Conjunto
Resistencia inicial al aplastamiento [N]	50683,703	81917,5305	95272,686	126830,760
Resistencia media al aplastamiento [N]	16467,293	23612,7282	19848,476	43480,7054
Resistencia máxima al aplastamiento [N]	168740,000	326040	431780,000	555680
Energía de deformación [J]	4145,600	7406,6796	6399,027	13805,707

Tabla 14: Resultados aplastamiento barra 2 de referencia (modelo sin panel exterior), barra 2 en modelo con panel exterior, panel exterior y conjunto completo, en CFRP.

En las ilustraciones 36 y 37 se puede observar el estado tensional de las piezas en el momento previo a su rotura:

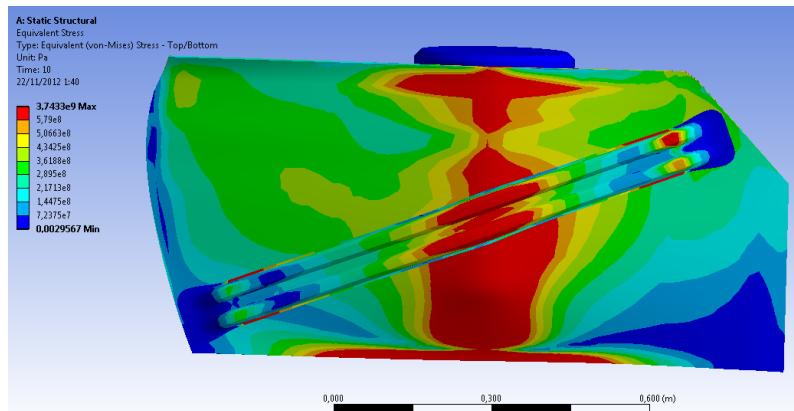


Ilustración 36: Estado tensional del panel exterior de la puerta en CFRP en el subpaso previo a la rotura.

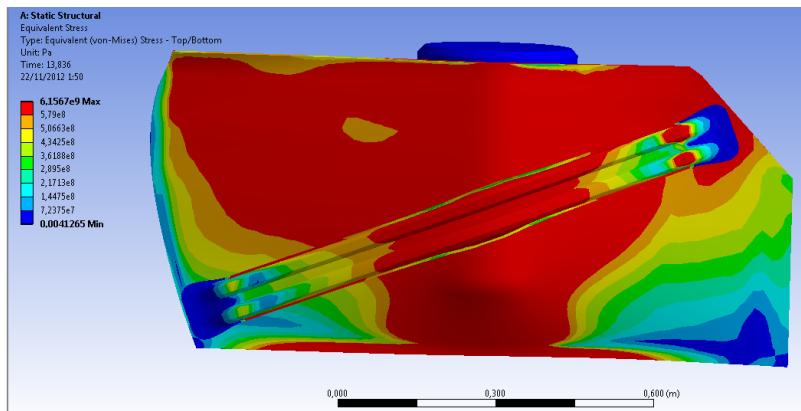


Ilustración 37: Estado tensional de la barra en CFRP en el subpaso previo a la rotura.

Como en los demás análisis del conjunto barra-panel exterior, los datos indican que la aportación del panel exterior a la resistencia al aplastamiento es notable, siendo su contribución aproximadamente la misma que la de la barra, como en el caso de las piezas en acero.

Al igual que en los anteriores casos, la barra trabaja mejor en contacto con la puerta que cuando el impactador la contacta directamente.

5 Conclusiones.

Ha sido posible utilizar software comercial de elementos finitos para simular el ensayo de forma representativa, y se han obtenido resultados coherentes.

De la preparación de la simulación se extraen las siguientes conclusiones:

- Es crucial trabajar sobre una geometría inicial que no presente errores de construcción tales como discontinuidades, falta de tangencia, falta de coincidencia en curvatura. En caso de duda sobre la calidad de la geometría, se recomienda reconstruirla desde cero.
- Es muy importante controlar la calidad del mallado y de adecuarlo al tipo de simulación a realizar, siendo muy recomendable aumentar el número de elementos en las direcciones en las que se prevea deformación o en las superficies en las que se presentará contacto.
- Si se presentan problemas relacionados con contactos, tanto “no contactos” entre piezas que deberían contactar como problemas de convergencia, se recomienda la verificación de la distancia inicial entre piezas y de la rigidez a penetración.
- La mayoría de problemas de convergencia vienen dados por problemas de “no contactos”, mallado defectuoso, un tamaño de subpaso excesivamente grande, o por una aplicación no gradual de fuerzas o de desplazamientos impuestos.
- La parte más importante de la simulación es sin duda la lectura de la ayuda del programa y la búsqueda estructurada de información existente sobre los errores que van apareciendo. No se recomienda el método “ensayo-error”.

De la comparación de la geometría de las barras se extraen las siguientes conclusiones:

- La geometría de barra 2 es la que se comporta de forma más eficiente en el ensayo frente a aplastamiento si se comparan las barras a igualdad de espacio ocupado en el interior del panel de la puerta (espacio ocupado = “altura” de la barra \leq “anchura” de la puerta).
- La geometría de la barra 3 es la que se comporta de forma más eficiente en el ensayo frente a aplastamiento si se comparan las barras a igualdad de peso.
- La geometría de la barra 5 es la que mejor se comporta a torsión debido a su sección cerrada, si se comparan las barras a igualdad de espacio ocupado.

De los análisis comparativos con distintos tipos de acero, aluminio y CFRP hechos sobre la geometría de la barra 2 se extraen las siguientes conclusiones:

- A igualdad de espesor, todos los aceros de la gama Docol (800 DP, 1000 DP y 1200 M) cumplen con la norma. Utilizando el 1000 DP como referencia, el 800 DP presenta mejor resistencia al aplastamiento media y una mayor absorción de energía, mientras que el 1200 M presenta una mayor valor de resistencia al aplastamiento máxima.
- A igualdad de masa, el aluminio 6082-T4 presenta muy buen comportamiento en el ensayo frente a aplastamiento, siendo la resistencia al aplastamiento media y la energía absorbida superiores a las obtenidas con el acero Docol 1000 DP de referencia.
- A igualdad de masa, el CFRP presenta unos valores de resistencia inicial y de resistencia máxima al aplastamiento superiores a las obtenidas con el acero Docol 1000 DP de referencia.
- No hay un material que sea globalmente mejor que los demás en el ensayo frente a aplastamiento a igualdad de peso, pero la elección de material permite determinar en qué partes del ensayo se obtienen mejores resultados.

Del análisis de la barra por separado en comparación con el análisis del conjunto barra-panel exterior de la puerta se extraen las siguientes conclusiones:

- El panel exterior de la puerta tiene una gran influencia sobre los resultados obtenidos en el ensayo.
- La barra presenta mejor resistencia al aplastamiento en contacto con el panel exterior de la puerta presenta un mejor comportamiento que en contacto con el impactador. El impactador deforma el panel exterior de forma que la superficie de contacto entre éste y la barra es mayor.

6 Bibliografía.

1. “*Composite materials: testing and design*”, por Samuel P. Garbo.
2. “*Effect of defects on mechanical properties of composites: Undergraduate research on materials*”, por Mir M. Atiqullah.
3. “*Reliable FE-Modeling with ANSYS*”, conference paper por Thomas Nelson y Erke Wang, de CADFEM GmbH.
4. “*Viabilidad del perfilado en barras de protección lateral en SEAT*”, PFC de Joaquim Xiberta, Universidad Politécnica de Cataluña.
5. “*Recent development in aluminium alloys for the automotive industry*”, abstract publicado por W.S. Miller et al en “Materials Science and Engineering A280 (2000)”.