

Trabajo Fin de Máster

Simulación del comportamiento de barras de
puerta de automóvil de protección frente a
choque lateral

Simulation of the behaviour of automobile door
bars for protection against side impact

Autor/es

Rubén Lorenz García

Director/es

Luis Castejón Herrer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Año 2024

1. Resumen

En este trabajo se ha hecho un estudio de simulación del comportamiento de las barras de protección frente al escenario de choque lateral. Para ello, se ha hecho una investigación previa de los aspectos más importantes del escenario de colisión lateral, así como de las normativas que aplican al ensayo de colisión lateral para la homologación de un vehículo. Junto con el estudio de contexto de la normativa, se ha realizado una investigación de los materiales de aceros empleados en las aplicaciones de automoción.

A partir de la información recopilada y junto con la información de un ensayo real de colisión, se ha realizado un estudio para diseñar una barra de protección lateral en varias fases. En primer lugar, se ha hecho una selección de geometrías de sección de barra sobre la que estudiar su idoneidad frente al comportamiento mecánico solicitado, a igual material y espesor y sin contar con los anclajes de la barra. Con esta selección de geometrías, se han sometido a simulación para determinar la geometría de barra con mejores prestaciones. Sobre dicha geometría de barra, se han buscado materiales para considerar en el diseño de la barra y se ha simulado el comportamiento de la barra frente a distintos escenarios de material y espesor. A partir de los resultados obtenidos de mejor geometría, material y espesor, se ha realizado un diseño de barra incluyendo los anclajes de forma genérica a la estructura de la puerta del vehículo. Con los resultados obtenidos, se ha realizado una mejora del diseño con la cual mejorar las prestaciones de protección suministradas por la barra.

El proyecto y los resultados permiten ilustrar la importancia de estos elementos de seguridad, sus capacidades y los avances en materia de seguridad y prestaciones estructurales que han introducido los nuevos aceros desarrollados en el contexto de la automoción.

2. Tabla de contenido

Contenido

1.	Resumen	2
2.	Tabla de contenido	3
3.	Contexto y normativa aplicable del ensayo de colisión lateral.	4
4.	Barras de protección lateral en automóviles.	12
5.	Materiales empleados en elementos estructurales del automóvil.....	19
6.	Metodología del estudio de simulación de barras laterales	25
7.	Fases y resultados obtenidos del estudio.....	27
7.1.	Selección de geometrías de barra	27
7.2.	Resultados de las simulaciones en la comparativa de geometrías.....	29
7.3.	Evaluación de las secciones y elección de una geometría para el estudio profundo de optimización.....	34
7.4.	Realización de un estudio de simulación de la geometría de interés para optimizar su diseño variando espesor y tipo de material.....	39
7.4.1.	Selección del materiales y espesores para la simulación de la geometría de barra escogida	40
7.4.2.	Resultados del estudio de simulación del material y espesor sobre la geometría escogida	47
7.5.	Evaluación y selección del material y espesor más favorable para el diseño final de la barra	60
7.6.	Estudio de simulación sobre la geometría, material y espesor escogido.....	61
8.	Conclusiones.....	73
9.	Referencias	74
10.	Índices.....	80
10.1.	Figuras	80
10.2.	Gráficas.....	81
10.3.	Ilustraciones	83
10.4.	Tablas.....	85

3. Contexto y normativa aplicable del ensayo de colisión lateral.

La colisión lateral es una de las causas de muerte y lesiones más comunes en los accidentes de automóviles. El lateral del vehículo resulta una zona más vulnerable que la parte frontal, siendo más susceptible de alcanzar a los ocupantes del vehículo en caso de colisión. Las puertas disponen de una rigidez menor que los pilares del vehículo, siendo esta zona el foco de deformación y alcance a los ocupantes en la colisión lateral.



Ilustración 1. Colisión lateral de un automóvil VW ID4. (EuroNCAP, n.d.)

El interés por mejorar la seguridad de los ocupantes en el transporte ha conducido a la mejora de los sistemas y tecnologías para su protección. Dentro de un marco de libertad de construcción de vehículos por los fabricantes, el desarrollo de los vehículos pasa por el cumplimiento de normativas que verifican unas condiciones mínimas de seguridad del vehículo.

Las normativas aplicables en la construcción del automóvil tienen unos procedimientos que ensayan el comportamiento del vehículo frente a diferentes escenarios en caso de accidente. El cumplimiento de las normativas permite que los fabricantes de automóviles homologuen sus vehículos, pudiendo ser comercializados y circular por los países en los que se aplican dichas normativas. La implementación de un procedimiento sistematizado para ensayar la seguridad del vehículo permite la contrastación de los requisitos de seguridad, así como de la comparación de resultados y escenarios entre diferentes vehículos.

Existen múltiples normativas que regulan este tipo de ensayos por todo el mundo. Principalmente las normativas más significativas son las aplicadas en Estados Unidos y Europa. A continuación, se muestran algunas de las más significativas en lo que respecta específicamente a colisión lateral, homologación y seguridad aplicable en estos países:

- La normativa relativa a la colisión lateral en Estados Unidos es la FMVSS214.(571.214 Standard No. 214; Side Impact Protection., n.d.)
- La normativa que aplica en Europa respecto a la protección de ocupantes corresponde al Reglamento n. 29 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) — Prescripciones uniformes sobre la homologación de vehículos en lo relativo a la protección de los ocupantes de la cabina de un vehículo comercial [2019/1850].(Reglamento n. 29 de La Comisión Económica de Las Naciones Unidas Para Europa (CEPE) — Prescripciones Uniformes Sobre La Homologación de Vehículos

En Lo Relativo a La Protección de Los Ocupantes de La Cabina de Un Vehículo Comercial [2019/1850] , 2019)

- La normativa aplicable en España relativa a la homologación por colisión lateral es el Reglamento n. 95 de las Naciones Unidas — Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión lateral [2021/1861].(Reglamento n. 95 de Las Naciones Unidas — Prescripciones Uniformes Sobre La Homologación de Los Vehículos En Lo Relativo a La Protección de Sus Ocupantes En Caso de Colisión Frontal [2021/1860], 2021)
- En Europa y en España en caso de colisión lateral contra poste aplica Reglamento n. 135 de las Naciones Unidas - Prescripciones uniformes sobre la homologación de vehículos en lo relativo a su comportamiento en caso de colisión lateral contra un poste [2020/486].(Reglamento n 135 de Las Naciones Unidas — Prescripciones Uniformes Sobre La Homologación de Vehículos En Lo Relativo a Su Comportamiento En Caso de Colisión Lateral Contra Un Poste [2020/486] , 2020)
- En lo que implica a homologación por seguridad, en Europa impera el Reglamento (CE) No 661/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de julio de 2009 relativo a los requisitos de homologación de tipo referentes a la seguridad general de los vehículos de motor, sus remolques y sistemas, componentes y unidades técnicas independientes a ellos destinados.(REGLAMENTO (CE) No 661/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de Julio de 2009 Relativo a Los Requisitos de Homologación de Tipo Referentes a La Seguridad General de Los Vehículos de Motor, Sus Remolques y Sistemas, Componentes y Unidades Técnicas Independientes a Ellos Destinados, 2009)

A su vez, existen diversos organismos que regulan el procedimiento de ensayo de los vehículos para su verificación, evaluación y homologación. En el caso de Europa, el organismo es Euro NCAP, y en Estados Unidos es el Departamento de Transportes, teniendo a la NHTSA al cargo de lo relativo a los vehículos que se transportan por carretera.

Las normativas describen con detalle el procedimiento de ensayo, objetivos y criterios de validez de los métodos y de superación de normativa. El foco principal de la normativa es la seguridad y la afección de la colisión sobre los ocupantes. La manera de conocer los efectos de los accidentes es replicar un caso de colisión con los ensayos y las posibles afecciones a los ocupantes. Para ello, se recurre a maquetas sensorizadas del cuerpo humano o “dummies”, que permiten registrar información sobre la afección al dummy en diferentes partes del cuerpo. Los dummies son colocados en los asientos del vehículo replicando a personas que viajan en el mismo. La normativa contempla la afección a elementos como la cabeza, cuello, clavículas, tórax, costillas, espina dorsal, abdomen, pelvis o piernas. A continuación, se muestra una imagen extraída directamente de la normativa estadounidense FMVSS214 que ilustra la morfología de estos dummies:

IV-9

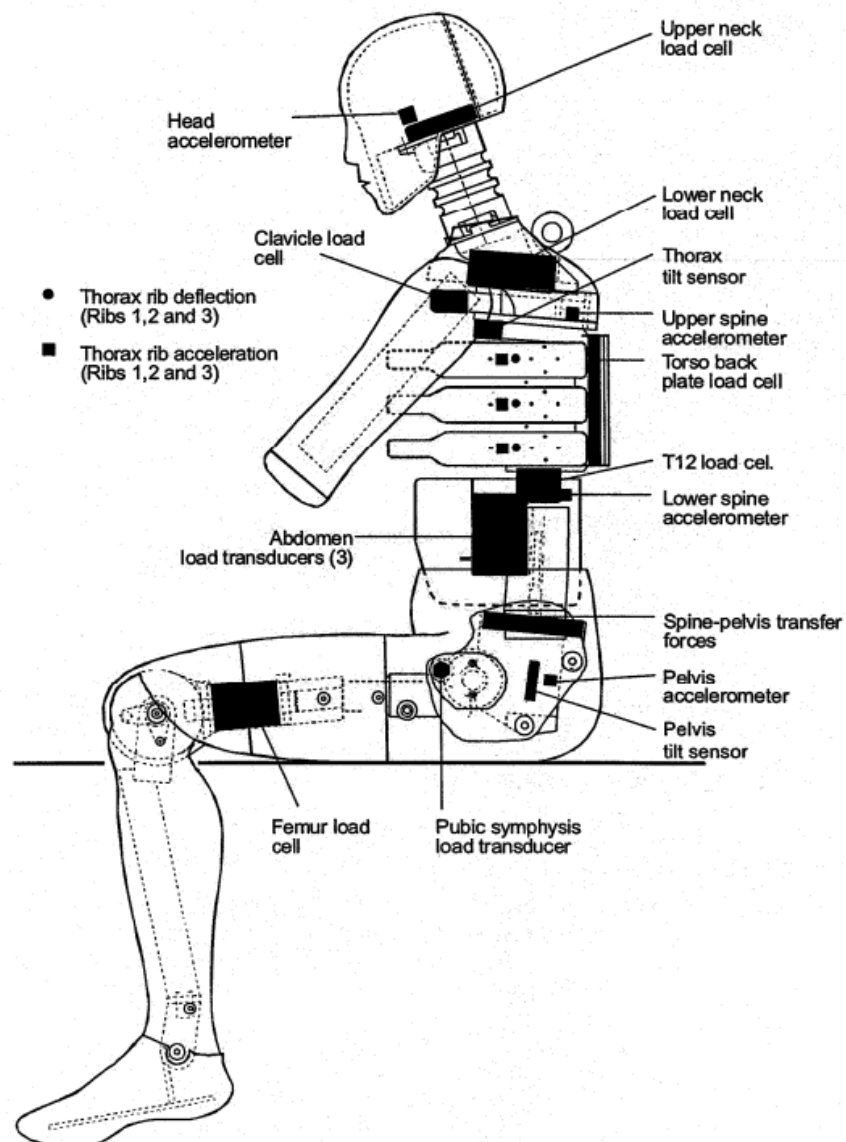


Figure IV-3. Instrumentation Location in ES-2

Ilustración 2. Detalle descriptivo de un dummy para ensayos de colisión. (571.214 Standard No. 214; Side Impact Protection., n.d.)

Los sensores presentes en el dummy recopilan datos de fuerzas, aceleraciones y deformaciones durante la colisión que son contrastados frente a los límites que imponen las normativas. Además de los sensores, se pueden incorporar durante el ensayo elementos como pintura sobre las superficies de los dummies para tener evidencia de contacto con otras superficies del vehículo en caso de colisión.

TP-214D-09

CHECK SHEET NO. 14
Apply Chalk Paint Color to Test Dummy

After the test dummies have been properly positioned and final measurements have been taken, using the chart and photo below as guides, apply chalk paint color to the head, face, hip and shoulder of each dummy as follows;



Dummy Part	Color
Face	Blue
Top of Head	Yellow
Side of Head	Green
Back of Head	Red
Shoulder	Orange
Hip	Red

CHALK COLORS TO BE USED ON TEST DUMMIES

Ilustración 3. Pintura sobre las superficies de dummies para detectar contacto.(LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION -Moving Deformable Barrier Impact Test Requirements APPENDIX B CHECK SHEETS, 2012)

Puesto que existe una gran variabilidad morfológica del cuerpo humano en la sociedad, los ensayos se realizan con dummies que replican condiciones estadísticas de altura y peso en la población para hombres y mujeres. Algunos de los dummies más empleados en colisión lateral son el de hombres del percentil 50 de población (como el ES-2re o el WorldSID-50M) o el de mujeres en el percentil 5 de población (como es el SID-11s o el WorldSID-5F).



Ilustración 4. Dummy para colisión lateral WorldSID-50M.(Humanetics, n.d.-b)



Ilustración 5. Dummy para colisión lateral WorldSID-5F.(Humanetics, n.d.-a)

Los objetivos a alcanzar principalmente son que en la colisión no se produzca contacto entre el exterior o partes del vehículo y el dummy, que no se sobrepasen los límites de la normativa, que se minimice el daño y aceleración recibida a los ocupantes del vehículo y que se puedan abrir las puertas del vehículo después de la colisión.

El comportamiento de choque lateral se somete a 3 tipos de ensayos o escenarios regulados. Este tipo de pruebas son realizadas por diferentes normativas en el mundo, con diferentes matices en función de la legislación vigente. De manera resumida, los ensayos con sus generalidades más importantes en Europa y en Estados Unidos son:

- **Colisión lateral dinámica contra Barrera Móvil Deformable** (Según la normativa estadounidense FMVSS 214-MDB). En este modo de ensayo se lanza un carro con una superficie de impacto deformable sensorizada contra el lateral del vehículo. La velocidad de impacto es de 50 km/h en Europa y en Estados Unidos es 33.5 mph (53.9km/h).

TEST EXECUTION.....Continued

TP-214D-09

J. CONDUCT THE TEST

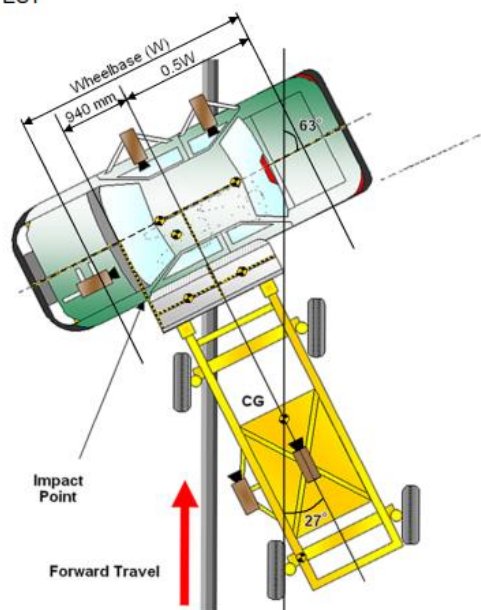


Ilustración 6. Esquema de colisión lateral contra Barrera Móvil Deformable.(LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION -Moving Deformable Barrier Test Requirements Using Advanced Test Dummies- , 2012)

- **Colisión lateral dinámica contra barra rígida** (Según la normativa estadounidense FMVSS 214-Pole). En este ensayo se lanza el vehículo lateralmente contra una barra rígida vertical sensorizada, de forma perpendicular o formando un ángulo (normalmente un ángulo de 75 grados) entre la línea central del vehículo y la línea de impacto de referencia. La velocidad de aplicación del ensayo es de 32 km/h o 20mph.

IV-5

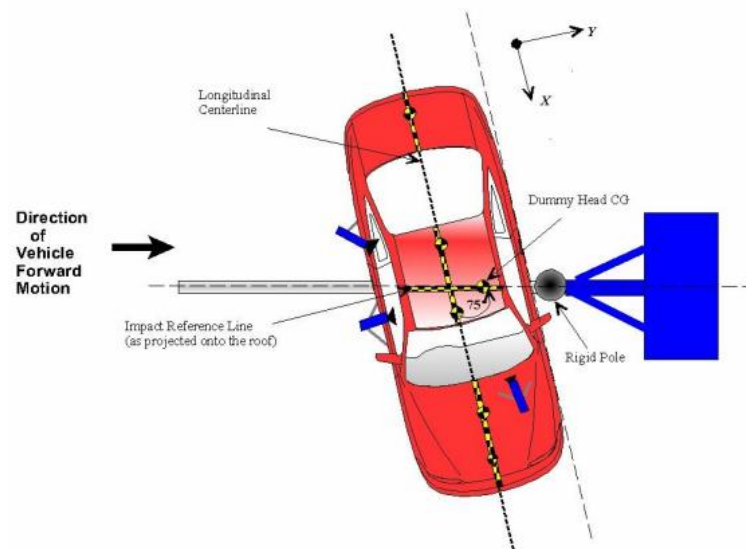


Figure IV-1. Illustration of Oblique Pole Impact

Ilustración 7. Esquema de colisión lateral contra Barra Rígida. (LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION - Rigid Pole Side Impact Test Requirements, 2012)

- **Colisión lateral estática contra puerta** (Según la normativa estadounidense FMVSS 214-S). En este ensayo se lanza una superficie de colisión mediante un actuador sensorizado contra el lateral del vehículo.

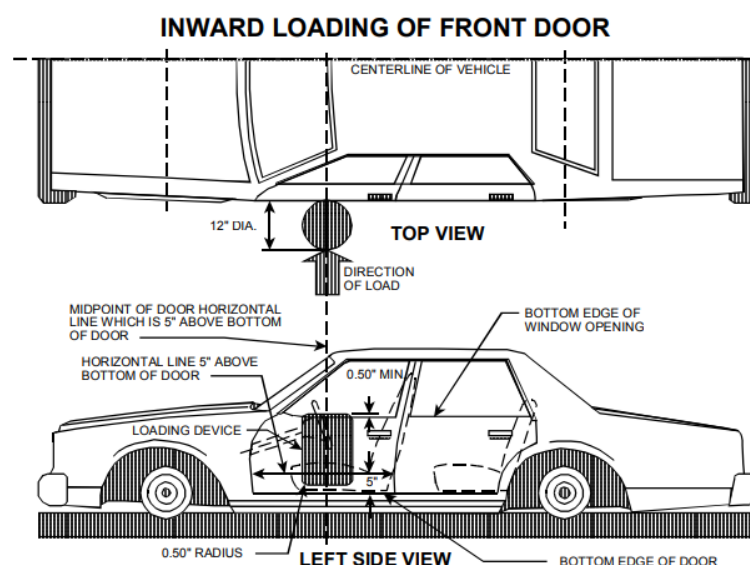


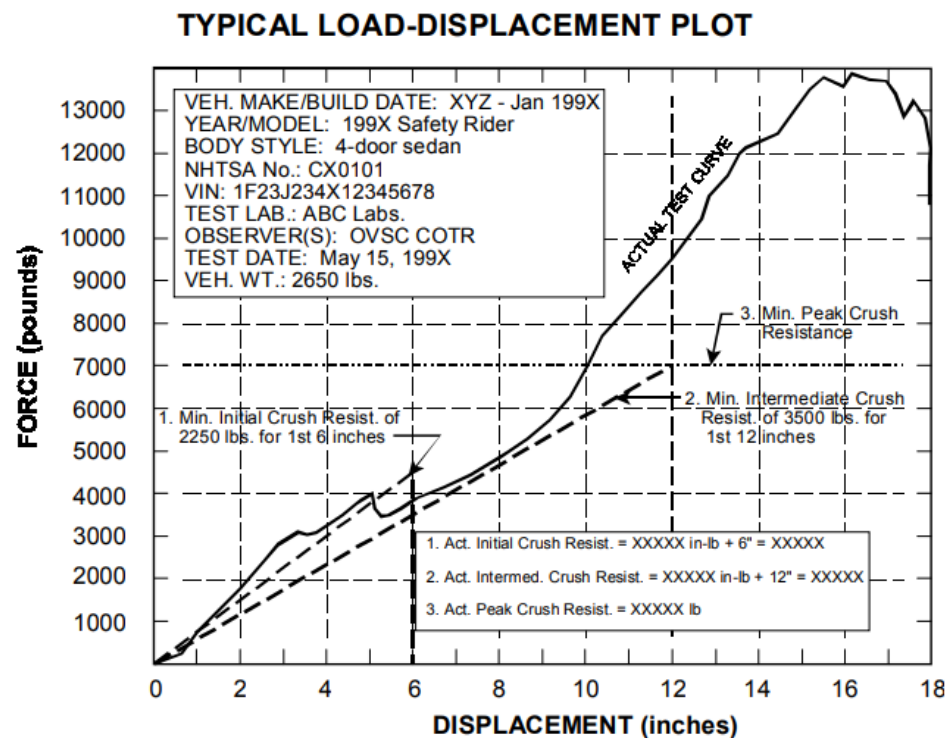
FIGURE 1

Ilustración 8. Esquema de colisión lateral estática contra puerta. (LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS 214S (STATIC) Side Impact Protection, n.d.)

El sistema registra la fuerza necesaria para alcanzar unos determinados niveles de deformación sobre las puertas del vehículo. La norma hace hincapié en la obtención de la resistencia de impacto inicial, media y pico. La energía absorbida en la colisión está directamente relacionada con la integral de la curva fuerza versus deformación.

A partir de estas fuerzas, la normativa establece unos valores comparativos para establecer si el resultado del ensayo es apto o no. Según la normativa, dichos valores son los siguientes:

- **Resistencia de impacto inicial.** Corresponde a la fuerza necesaria para deformar la puerta 6 pulgadas. El valor que establece la norma como límite de conformidad es que la fuerza de impacto tiene que ser no inferior a 2250 libras.
- **Resistencia de impacto media.** Corresponde a la fuerza necesaria para deformar la puerta 12 pulgadas. El valor que establece la norma como límite de conformidad es que la fuerza de impacto tiene que ser no inferior a 3500 libras sin asientos y 4375 libras con asientos instalados.
- **Resistencia de impacto pico.** Corresponde a la fuerza necesaria para deformar la puerta 18 pulgadas. El valor que establece la norma como límite de conformidad es que la fuerza de impacto tiene que ser el mínimo entre 2 veces al peso en vacío del vehículo o 7000 libras en caso de ser sin asientos. En caso de ser con asientos es el umbral es el mínimo entre 3.5 veces el peso en vacío del vehículo o 12000 libras.



Gráfica 1. Curva modelo de carga-desplazamiento en colisión estática. (LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS 214S (STATIC) Side Impact Protection, n.d.)

A continuación, se muestra un esquema ilustrativo de los ensayos anteriormente citados con casos de vehículos reales:

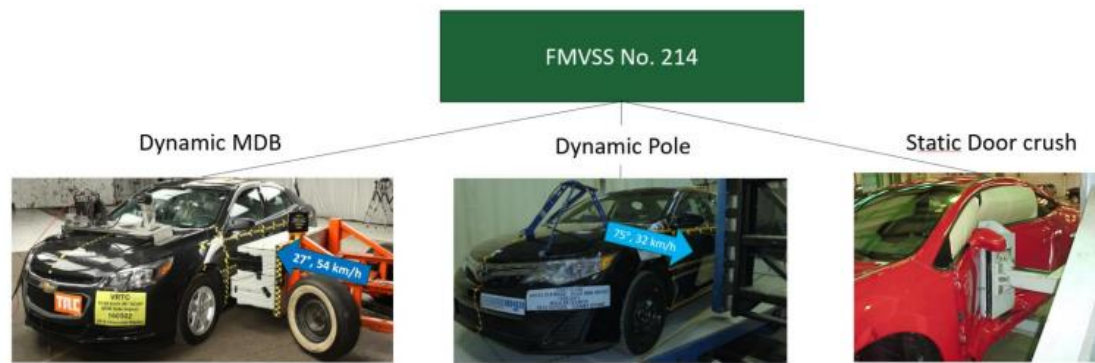


Ilustración 9. Esquema de los tipos de ensayos de colisión lateral FMVSS 214 con vehículos reales. (Reichert, n.d.)

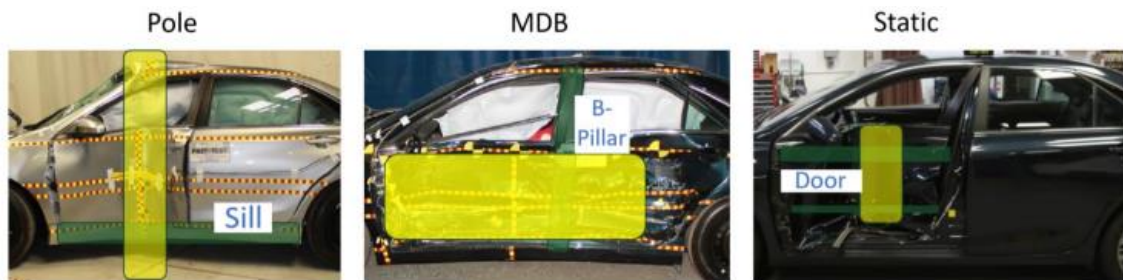


Ilustración 10. Área afectada en los ensayos de colisión lateral de FMVSS 214. (Reichert, n.d.)

Además de los efectos sobre los dummies mediante sus sensores asociados, el vehículo también es sensorizado y grabado en vídeo durante la ejecución del ensayo de colisión. De esta manera, el comportamiento del vehículo puede ser analizado en cualquier momento y extraer conclusiones de su comportamiento.

Los detalles en profundidad sobre cada ensayo pueden encontrarse en la descripción técnica de cada normativa anteriormente citadas, las cuales son de libre acceso para su consulta.

4. Barras de protección lateral en automóviles.

Las barras de protección lateral son elementos de seguridad pasiva instalados en el automóvil. Los avances en materia de seguridad han introducido este tipo de elemento en la construcción del automóvil. Las barras laterales son elementos que absorben energía mediante deformación.



Ilustración 11. Saab 9000 comercializado entre 1984 y 1988 con detalle de la barra de protección lateral instalada. (Billur & WorldAutoSteel, n.d.)(Saab, n.d.)(Lagneborg, 1991)

[PHS Automotive Applications and Usage - AHSS Guidelines \(ahssinsights.org\)](https://www.ahssinsights.org/)

Inicialmente, los vehículos no montaban este tipo de elementos en las puertas. La inclusión de este elemento de seguridad ha reducido significativamente los riesgos de muerte y lesiones en los ocupantes de un vehículo en caso de accidente por choque lateral.

En un choque lateral, el escenario más desfavorable para afectar a los ocupantes es una colisión de la puerta, entre el pilar A y B de un vehículo, o entre el pilar B y C. Este tipo de colisiones pueden deberse a otros vehículos, elementos presentes en las vías de circulación, pilares estructurales, farolas, edificios u otros elementos urbanos o naturales.

La inclusión de una barra entre pilares permite actuar como elemento de barrera, absorbiendo parte de la energía en el impacto antes de que llegue a los ocupantes del vehículo. De manera simplificada, actúa como una barra sujeta por sus dos extremos sometida a una carga. Sin embargo, el comportamiento de este elemento integrado con el resto de los elementos del vehículo es más complejo. Un modelo más acertado para estimar el comportamiento de las barras es el que se presenta a continuación:

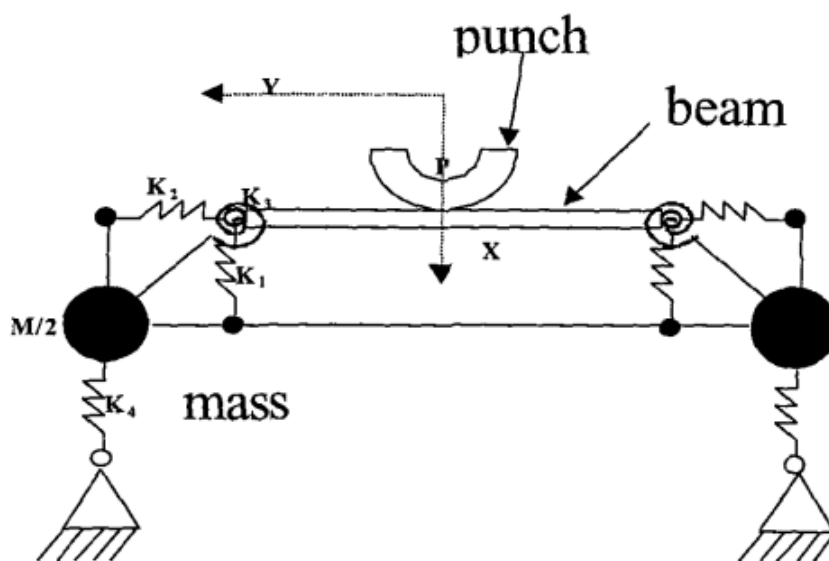


Ilustración 12. Esquema del modelo de comportamiento mecánico de una barra de protección lateral con los elementos alrededor de ella. (T. Coppola et al., n.d.)

En la colisión lateral, los elementos estructurales del vehículo sobre los que se ancla la barra también son susceptibles a ser deformados. Por ello, la estructura equivalente en el análisis de cargas considera un comportamiento que tiene en cuenta la rigidez del resto de elementos estructurales del vehículo. El comportamiento integra estos elementos en torno a la barra como resortes de un mecanismo, con una masa determinada por el vehículo. El principal inconveniente de este modelado es que requiere de conocer los datos de cómo se comportan mecánicamente el resto de los elementos estructurales del vehículo. En algunos casos, esta información no está disponible, requiere de tiempo para poder estimarse y viene arrastrada por el diseño global del resto de los elementos del vehículo.

En el caso del análisis de diferentes diseños y materiales para las barras, resulta más rápido, práctico y directo de comparar emplear un modelo más simplificado que no tenga en cuenta el resto de elementos estructurales del vehículo. A nivel de diseño, comparación y experimentación resulta más sencillo aplicar el típico caso de ensayo de carga sobre 3 puntos en una barra.

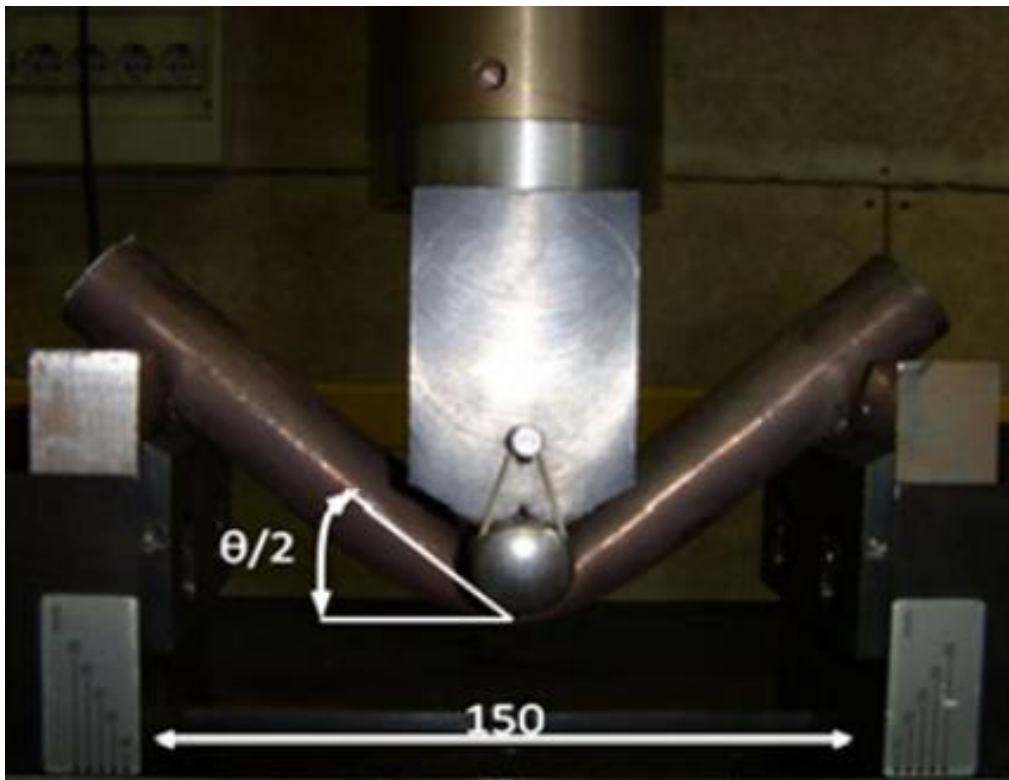


Ilustración 13. Ensayo de carga de 3 puntos sobre barra. (Strano et al., 2013)

El diseño de una barra lateral pretende lograr el máximo de energía absorbida por deformación en el impacto, dentro de los límites morfológicos del vehículo. Los elementos de seguridad en el vehículo deben pretender a su vez impedir que se produzca contacto con los ocupantes. Las barras laterales tienen que servir como elemento barrera para que el objeto que colisione con el vehículo no alcance a los ocupantes. Para conseguir estos objetivos, el ejercicio de diseño descansa en la elección de la geometría de la barra, su ubicación y anclaje en el vehículo, así como de los materiales empleados. La elección de una geometría tiene un gran impacto en los resultados obtenidos, así como de su factibilidad de cara al proceso de fabricación e integración en el vehículo.



Ilustración 14. Integración de la barra de protección lateral en la estructura del vehículo Hyundai Azera. (WorldAutoSteel, n.d.-f) (Saraf & Bajaj, 2017)

La elección de un diseño de barra lateral está condicionada por diferentes variables que confluyen al mismo tiempo, con diferentes repercusiones:

- **El material.** La elección de un determinado material tiene fundamentalmente efecto en la resistencia de la barra y su capacidad de absorber energía. Existen múltiples opciones de materiales para escoger. Por una parte, aceros de ultra alta resistencia otorgan una resistencia muy alta a la barra, siendo más idóneos si el objetivo deseado es reducir la intrusión de la barra en el habitáculo en el choque, permitiendo usar espesores bajos y menos peso. Sin embargo, en algunos casos la energía absorbida en la deformación plástica puede ser menor que otros aceros con resistencias menores y características diferentes, o incluso puede existir una diferencia significativa en la complejidad de la fabricación. En caso de choque, la energía del impacto es repartida entre el vehículo y los ocupantes. A mayor energía absorbida por deformación, menor energía reciben los ocupantes y por tanto menos riesgo de lesiones y de incumplimiento de normativa.
- **La sección o geometría del elemento barra.** Una mayor sección e inercia geométrica proporciona una mayor resistencia de barra frente a mismo peso o espesor. Elegir una determinada forma tiene un impacto muy significativo en el rendimiento de la barra al ser sometida a carga. Los automóviles disponen de un espacio reducido en las puertas, en las cuales confluyen múltiples elementos funcionales que deben ubicarse. Por tanto, surge una limitación dimensional directamente relacionada con la sección y geometría que puede adoptar la barra. Existen muchos tipos de geometrías empleadas en este tipo de elementos, desde perfiles de ala abierta, omegas combinadas con diferentes materiales, tubos redondos, tubos rectangulares conformados, etc. Cada tipo de geometría tiene una serie de ventajas e inconvenientes respecto a espacio, inercia, complejidad de fabricación, materiales y precio, que en cualquier caso deben ser estudiados para cada caso particular.
- **El coste.** Esta variable resulta en muchos casos un peso de suficiente influencia como para descartar u optar por un tipo de solución o material. De esta manera, una solución condicionada por esta variable puede llevar a usar una geometría sin tanta capacidad específica de absorber energía de deformación, pero compensándolo con algo más de espesor y evitando complejidad de fabricación o el uso de un material más caro; se consigue un resultado suficiente por menor precio. Típicamente ha habido casos en los que se han elegido barras más económicas si el segmento y tipo de mercado al que va enfocado el automóvil es de coste más bajo.

La decisión de diseño queda sujeta a múltiples condicionantes a la vez. Además de estos factores, se debe tener en cuenta que el diseño estructural del vehículo está compuesto por muchos más elementos interconectados.

A pesar de los múltiples condicionantes, para el diseño de estos elementos resulta de utilidad emplear medidas cuantitativas para comparar diseños. Cuando una barra es sometida a colisión, la energía absorbida por este elemento está directamente vinculada con la deformación plástica de la barra. Por ello, la energía absorbida es la siguiente:

$$E_{abs} = \int P \cdot \delta l \quad [J]$$

Ecuación 1. Energía absorbida de un elemento al ser deformada. (Strano et al., 2013)

Siendo la energía absorbida la suma de la fuerza multiplicada por la deflexión de la barra.

- La energía absorbida del elemento E_{abs} . Unidades: $[J]$.
- La fuerza o carga aplicada sobre el elemento P . Unidades: $[N]$.
- La deformación producida δl . Unidades: $[m]$.

Durante el ensayo de colisión, los elementos del ensayo tienen la capacidad de recopilar datos para evaluar los resultados. Es común usar indicadores de rendimiento para poder establecer valores comparativos a partir de esta información, estableciendo la energía absorbida en el impacto y el rendimiento de la barra frente a colisión (Strano et al., 2013). Para un determinado valor de deflexión máxima, la curva de carga de ensayo proporcionará un valor máximo de carga, un valor medio y una cantidad de energía absorbida por unidad de volumen. La energía absorbida se puede calcular como:

$$E_{abs}(\delta L_{max}) = P_{avg} \cdot \delta L_{max}$$

Ecuación 2. Energía absorbida por una barra sometida a carga centrada. (Strano et al., 2013)

Siendo:

- La energía absorbida por la barra sometida a carga $E_{abs}(\delta L_{max})$. Unidades: $[J]$.
- La fuerza media aplicada sobre la barra P_{avg} . Unidades: $[N]$.
- La deflexión máxima de la barra δL_{max} . Unidades: $[m]$.

La eficiencia de la curva de fuerzas en la colisión se define como el ratio entre la carga media y la carga máxima de la curva de desplazamiento:

$$\eta(\delta L_{max}) = \frac{P_{avg} \cdot \delta L_{max}}{P_{max} \cdot \delta L_{max}}$$

Ecuación 3. Eficiencia de curva de colisión. (Strano et al., 2013)

Siendo:

- La eficacia de la curva de fuerza-colisión $\eta(\delta L_{max})$. Es un ratio adimensional.
- La fuerza media aplicada sobre la barra P_{avg} . Unidades: $[N]$.
- La fuerza máxima aplicada sobre la barra. Unidades: $[N]$.
- La deflexión máxima sobre la barra. Unidades: $[m]$.

Además de esto, se puede definir un ratio de energía específica absorbida en función de la energía absorbida por unidad de masa (Specific Energy Absortion):

$$SEA(\delta L_{max}) = \frac{E_{abs}(\delta L_{max})}{M}$$

Ecuación 4. Ratio de energía específica absorbida por unidad de masa. (Strano et al., 2013)

Siendo:

- La energía específica absorbida por unidad de masa $SEA(\delta L_{max})$. Unidades: $\left[\frac{J}{kg}\right]$.
- La energía absorbida por la barra sometida a carga $E_{abs}(\delta L_{max})$. Unidades: $[J]$.
- La masa de la barra M . Unidades: $[kg]$.

El diseño de estos elementos tiene en cuenta otros aspectos y restricciones, como la geometría de la barra. El ancho de la sección de la barra es un condicionante del diseño del vehículo, ya que el espacio disponible en las puertas es reducido. Recurrir a un ancho de barra mayor puede implicar engrosar la puerta, con la consiguiente pérdida de habitabilidad del interior del vehículo. Para tener en cuenta esta variable y el rendimiento de los ratios anteriores, surge el siguiente indicador artificial para comparar la carga que la barra es capaz de soportar por unidad de ancho y masa:

$$\gamma(\delta L_{max}) = \frac{SEA(\delta L_{max}) \cdot \eta(\delta L_{max})}{W \cdot \delta L_{max}} = \frac{P_{avg}^2 \cdot \delta L_{max}}{P_{max}(\delta L_{max}) \cdot M \cdot W}$$

Ecuación 5. Indicador artificial de rendimiento de la barra respecto a su ancho y masa. (Strano et al., 2013)

Siendo:

- El indicador artificial de rendimiento con respecto al ancho y masa de la barra. Unidades: $\left[\frac{N}{kg \cdot m}\right]$.
- La energía específica absorbida por unidad de masa $SEA(\delta L_{max})$. Unidades: $\left[\frac{J}{kg}\right]$.
- La eficacia de la curva de fuerza-colisión $\eta(\delta L_{max})$. Es un ratio adimensional.
- El ancho de la barra W . Unidades: $[m]$.

Mediante el cálculo de ratios se pueden establecer comparaciones entre diferentes criterios sobre la factibilidad de diferentes diseños de barras, lo cual supone un recurso de apoyo eficaz en el diseño.

Respecto a la tipología de los diseños de barras, principalmente la distinción es entre elementos de perfil abierto o cerrado. Los elementos de perfil de ala abierta tienen la ventaja de partir de preformas de planchas de chapa, siendo una materia prima sencilla, barata y configurable. El uso de matricería o de laminado permite conformar la geometría de barra de perfil abierto.



Ilustración 15. Barra de protección lateral fabricada por laminado y estampado. (D. Kim, 2015)

Respecto de las geometrías de perfil cerrado, inicialmente las geometrías más sencillas se obtenían por extrusión directa, como es el caso de las barras circulares. Los nuevos avances en las tecnologías de fabricación han permitido conformar barras de sección cerrada por técnicas

de hidroconformado para conseguir mucha mayor configurabilidad y complejidad del diseño. A continuación, se muestra un ejemplo de barras hidroconformadas empleadas en los pilares A del vehículo:



Ilustración 16. Ejemplo de barra hidroconformada en un Nissan Titan XD. (WorldAutoSteel, n.d.-d) (J. Tessmer et al., 2016)

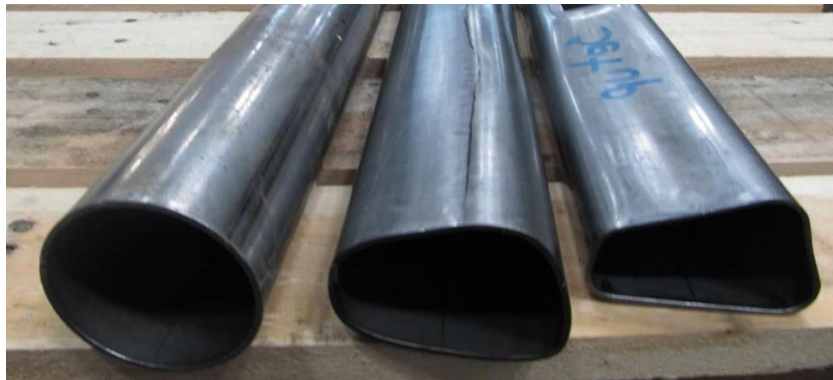


Ilustración 17. Evolución de la forma de un tubo hidroconformado desde su material de partida para vigas del techo en DP 800/1000. (WorldAutoSteel, n.d.-d) (K. Hertell, 2015)

La combinación de varios materiales en el diseño de la barra también ha sido una tendencia común, como espumas de materiales plásticos o metálicos.

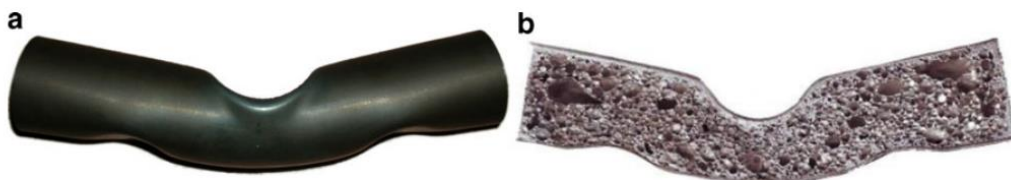


Fig. 1 **a** Stainless steel tube after 3 point bending, filled by an aluminium foam; **b** longitudinal cross section

Ilustración 18. Ejemplo de barra de protección de acero inoxidable rellena con una espuma de aluminio. (Strano et al., 2013)

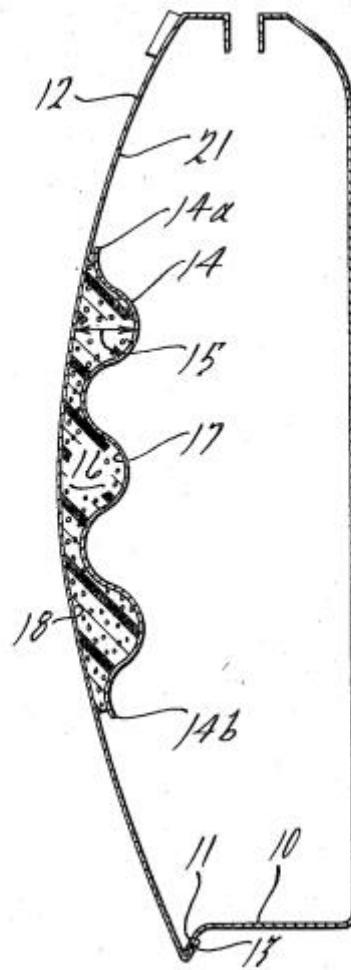


Ilustración 19. Barra de protección lateral combinada con composite en forma de espuma patentada por Ford en 1975.(BUSH GEORGE F, 1975)

En cualquier caso, los avances en el campo de los materiales y procesos de fabricación brindan la posibilidad de desarrollar un gran abanico de posibilidades de diseño de barras en función de las especificaciones de diseño impuestas.

5. Materiales empleados en elementos estructurales del automóvil.

Los materiales más empleados en el diseño de barras son el acero, el aluminio y materiales compuestos con polímeros y espumas. De manera generalizada, el acero ha sido el material más utilizado y ha experimentado una gran evolución y desarrollo en busca de mejorar sus propiedades. La automoción ha impulsado el desarrollo de nuevos aceros técnicamente muy superiores a los que se usan comúnmente en aplicaciones estructurales clásicas. Con el paso del tiempo y tras varias generaciones de nuevas pruebas, se han conseguido desarrollar nuevos y mejores materiales con resistencias mucho mayores, mejores propiedades de absorción de energía de impacto, conformidad en fabricación, resistencia a los ambientes, soldabilidad o imprimación entre otras cualidades. Las necesidades de cada tipo de componente en los elementos estructurales del vehículo han conducido los objetivos de las propiedades buscadas en los nuevos materiales desarrollados.

En el mundo de la automoción existe una gran variedad de clases de aceros, fundamentalmente clasificados por su tipología en función de su microestructura, tratamientos aplicados, proceso y resistencia. En la construcción de los automóviles, está instaurado el uso de materiales con diferentes propiedades en función de los requisitos funcionales y estructurales de cada zona. A continuación, se muestran una serie de ejemplos de usos de diferentes aceros por su resistencia y tipología en la construcción de un mismo automóvil:

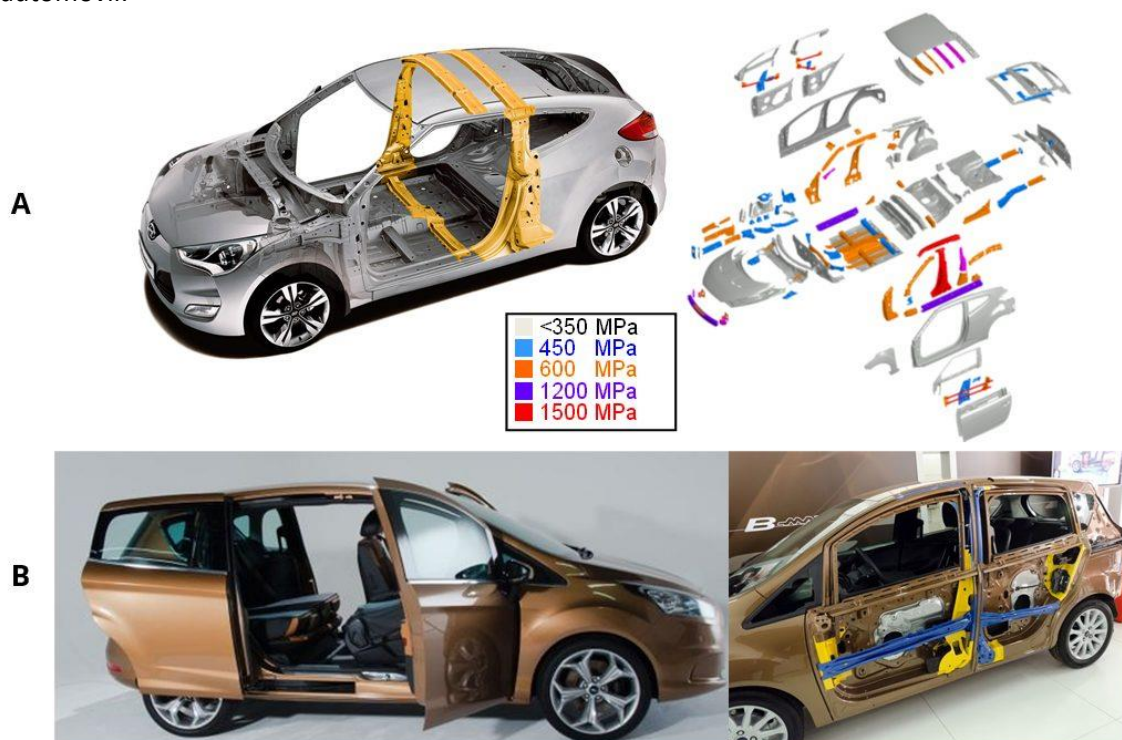


Ilustración 20. Ejemplo de uso de diferentes aceros dentro del mismo vehículo. Acero estampado PHS empleado en las barras de protección lateral del Hyundai Veloster (A) y Ford B-Max (B), así como en otros elementos estructurales del vehículo. (Billur & WorldAutoSteel, n.d.) (B. Ramirez, 2012) (D. Ludlow, 2012)

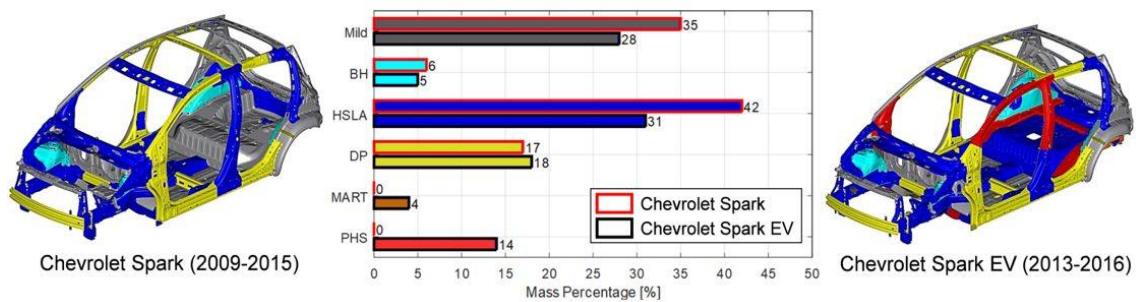


Ilustración 21. Ejemplo de uso de diferentes tipos de acero dentro de un vehículo. Comparación de porcentaje en peso de la arquitectura de un Chevrolet Spark. (Billur & WorldAutoSteel, n.d.) (I. Han, 2014)

Desde una perspectiva general, los aceros se agrupan en aceros de baja resistencia, aceros convencionales de alta resistencia y aceros avanzados de alta resistencia. Los aceros también pueden estar endurecidos, tratados, recubiertos, conformados en caliente, estampados o conformados en frío. La variabilidad de procesos es amplia y cada fabricante aplica diferentes técnicas para conformar distintos aceros.

La diferencia más importante entre los aceros convencionales de alta resistencia y los aceros avanzados es la microestructura. Los aceros avanzados disponen de una microestructura multifase, conteniendo una o más fases diferentes a la ferrita, perlita o cementita, como la martensita, bainita o austenita con diferentes variaciones. A nivel de resistencia de los aceros avanzados, suelen partir de los 440 MPa. Dentro de los aceros avanzados es común hacer una distinción con los aceros avanzados de ultra alta resistencia (UHSS), pero no existe un valor fijo establecido entre distintos fabricantes de acero a partir del que se consideran aceros de ultra alta resistencia. Este umbral de resistencia ronda los 900 a 1300 MPa dependiendo de las fuentes y fabricantes.

A continuación, se muestra una representación que muestra el rango de curva de tensión-deformación máximas que puede alcanzar los distintos tipos de aceros presentes en la industria automovilística:

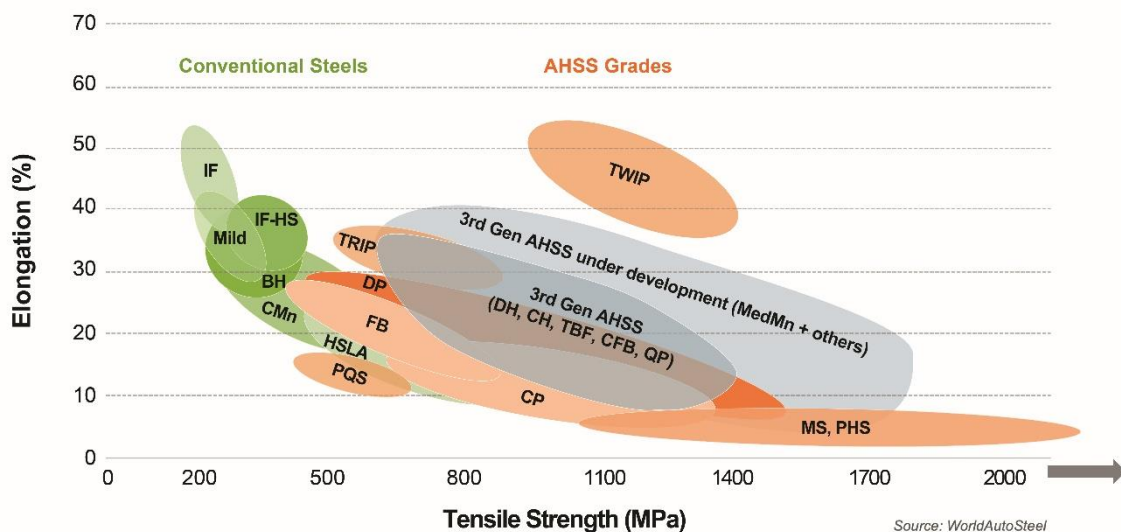


Ilustración 22. Diagrama de conformabilidad global mediante curva de tensión-deformación de diferentes aceros disponibles en la actualidad y nuevos materiales emergentes. (WorldAutoSteel, n.d.-b)

Initials	Type of steel	Initials	Type of steel
IF	Interstitial Free	CFB	Carbide-Free Bainite
IF-HS	Interstitial Free - High Strength	TBF	TRIP-Aided Bainitic Ferrite
CMn	Carbon-Manganese	TR	Transformation Induced Plasticity (TRIP)
BH	Bake Hardenable	QP	Quenching & Partitioning
LA	High Strength, Low Alloy (HSLA)	TW	Twinning-Induced Plasticity (TWIP)
DP	Dual Phase	Med-Mn	Medium-Manganese
DH	Dual Phase – High Ductility	RA	Retained Austenite (encompasses TRIP, QP, TW, med Mn, and others)
CP	Complex Phase	MS	Martensitic
CH	Complex Phase – High Ductility	PQS	Press Quenched Steel
FB	Ferrite Bainite	PHS	Press Hardening Steel

Tabla 1. Designación de aceros junto con sus abreviaturas. (WorldAutoSteel, n.d.-b)

Como se puede observar, las líneas generales de prestaciones tienen una distribución aplanada, mostrando una tendencia en la que a medida que los aceros ganan más resistencia a la tracción, se deforman en menor proporción cuando alcanzan el fallo. Tal y como ya se ha mencionado, es deseable que la capacidad de absorber energía se maximice, lo cual significa que el área bajo la curva de resistencia frente a la deformación interesa que se maximice también. Los nuevos desarrollos de aceros pretender crear nuevos materiales que aumenten la deformación en niveles de resistencia altos, para que así sean capaces de absorber más energía y tender a una relación resistencia-peso y peso-energía absorbida excelente.

Como se ha ido mencionando anteriormente, la variedad de aceros y de propiedades mecánicas es amplia en función de la aplicación escogida. Principalmente los datos a nivel mecánico de mayor interés son la resistencia a la tracción y la elongación a la que se pueden someter dichos aceros, así como su límite elástico. A continuación se muestra una tabla que presenta diferentes grados de acero con sus características principales:

Cold rolled and coated steels

TS	DP & DH		CP & CH		RA & TW		MS	PQS & PHS
	Steel Grade	min El	Steel Grade	min El	Steel Grade	min El	Steel Grade	Steel Grade
< 500	CR260Y450T-DP	27						PQS-CR450T-LA
	CR290Y490T-DP	25						PQS-CR500T-LA
590	CR300Y590T-DP	16	CR360Y590T-CP	17	CR340Y590T-RA	27		PQS-CR550T-LA
	CR340Y590T-DP	21			CR400Y600T-RA	26		PQS-CR600T-LA
	CR420Y590T-DP	17			CR400Y690T-RA	25		
	CR330Y590T-DH	26						
780	CR420Y780T-DP	15	CR570Y780T-CP	11	CR400Y780T-RA	22		
	CR500Y780T-DP	13	CR680Y780T-CP	10				
	CR440Y780T-DH	19						
900	CR690Y900T-DH	30						
980	CR550Y980T-DP	9	CR700Y980T-CP	8	CR480Y950T-TW	45		PHS-CR1000T-MB
	CR590Y980T-DP	11	CR780Y980T-CP	7	CR600Y980T-RA	20		
	CR700Y980T-DP	9						
	CR560Y980T-DH	14	CR780Y980T-CH	10				
	CR700Y980T-DH	14						
1100							CR860Y1100T-MS	
1180	CR740Y1180T-DP	7	CR900Y1180T-CP	5	CR700Y1180T-medMn	12	CR950Y1180T-MS	PHS-CR1200T-MB
	CR800Y1180T-DP	7						
	CR860Y1180T-DP	7						
	CR850Y1180T-DH	10	CR900Y1180T-CH	8	CR850Y1180T-RA	12		
1300							CR1030Y1300T-MS	
1400			CR1000Y1370T-CH	5			CR1150Y1400T-MS	
1500	CR1200Y1470T-DP	4			CR1000Y1500T-RA	12	CR1000Y1470T-MS	PHS-CR1500T-MB
							CR1200Y1470T-MS	
1700							CR1350Y1700T-MS	PHS-CR1700T-MB
1800								PHS-CR1800T-MB
1900								PHS-CR1900T-MB
2000							CR1550Y2000T-MS	PHS-CR2000T-MB

Hot rolled steels

TS	DP		FB		CP		MS	PHS
	Steel Grade	min El	Steel Grade	min El	Steel Grade	min El	Steel Grade	Steel Grade
440			HR300Y450T-FB	25				
590	HR330Y580T-DP	20	HR440Y580T-FB	16				
780			HR600Y780T-FB	14	HR660Y760T-CP	10		
980					HR720Y950T-CP	9		
1180							HR900Y1180T-MS	
1500								PHS-HR1500T-MB
1700								PHS-HR1700T-MB
1800								PHS-HR1800T-MB
1900								PHS-HR1900T-MB
2000								PHS-HR2000T-MB

Tabla 2. Recopilación de varios grados de aceros comercialmente disponibles para su uso. De manera general y exceptuando a los aceros PHS y PQS, la nomenclatura indica el valor mínimo de límite elástico, el valor mínimo de resistencia a la tracción. "EL" indica la elongación mínima que se obtiene al someter a resistencia a la tracción. "TS" indica el valor de resistencia a la tracción que alcanza el acero. (WorldAutoSteel, n.d.-b)

En los anexos se puede encontrar una descripción de los principales grupos de aceros mencionados, así como un resumen de las características principales de los aceros disponibles anteriormente mencionados. (Consultar anexo 2.Descripción y notas sobre los aceros empleados en la automoción.)

En el diseño de los elementos estructurales de los vehículos se encuentran diferentes tipos de materiales a la vez. Cada tipo de material aporta una serie de características y se escoge cada material en función de los requisitos de diseño de cada elemento o conjunto.

Al margen de la microestructura y de la resistencia a la tracción de los aceros, existen otras propiedades de interés para su uso y selección. De cara a la fabricación, las propiedades relativas al conformado adquieren una gran importancia de cara a las limitaciones de forma alcanzables. En los distintos materiales se realizan ensayos como de plegado, de expansión de agujero, m valor, endurecimiento (n valor) o fricción en los que se evalúa su conformabilidad global y local al intentar realizar una geometría determinada. Este tipo de pruebas permiten conocer los límites de conformado sin que aparezcan defectos o roturas, así como estimar los requisitos o limitaciones en la fabricación de elementos.



Ilustración 23. Ejemplo de fallo de material con fractura por insuficiente conformabilidad local. (WorldAutoSteel, n.d.-c)(Habibi et al., 2019)

Los límites que presenta cada material en su conformado condicionan variables como la geometría alcanzable, el proceso y los utillajes necesarios o la temperatura a la que conformar el material. Tomando un ejemplo comparativo con un acero convencional, un acero de ultra alta resistencia requiere de fuerzas mayores para su deformación en matricería, lo que condiciona a los equipos y maquinaria a trabajar con cargas mayores, utillajes más robustos y mayor complejidad en formas alcanzables asociadas a su recuperación elástica y conformidad. A continuación se muestran algunos de los fallos más comunes que aparecen en los elementos de matricería en el proceso de estampación de los aceros:



Ilustración 24. Fallos comunes en elementos de matricería y estampación de aceros. (WorldAutoSteel, n.d.-e)(Uddeholm AB, 2018)

En los procesos de fabricación, cumplir con los objetivos dimensionales y de tolerancias es de suma importancia para poder armar los elementos estructurales del vehículo. A medida que los aceros aumentan su complejidad de conformado, alcanzar los objetivos dimensionales se vuelve más difícil. Las herramientas de simulación son útiles de cara a poder predecir el comportamiento mecánico del elemento a fabricar, especialmente para evitar roturas, defectos, los fallos de forma en el conformado o las desviaciones por recuperación elástica o “springback”. El estudio de simulación previo a la experimentación con utillajes reales ayuda significativamente a conseguir el objetivo de pieza deseado, disminuyendo los costes y tiempo invertido, así como a determinar la factibilidad de un diseño.

Angular Change and Curl

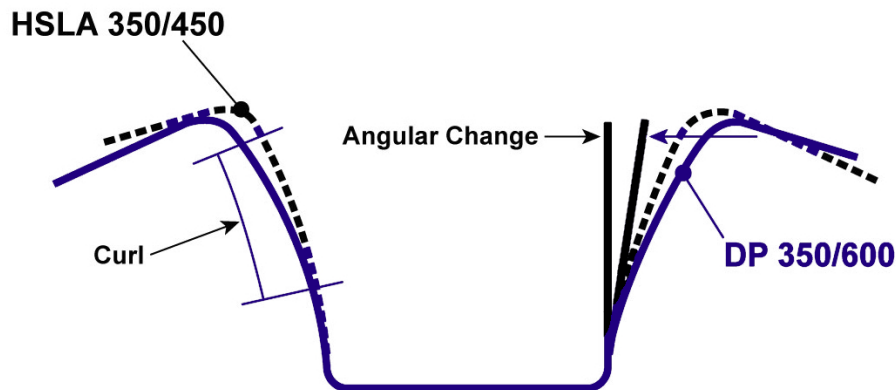


Ilustración 25. Esquema del fenómeno "springback" sobre el cambio de geometría en el conformado de acero. (WorldAutoSteel, n.d.-a)

6. Metodología del estudio de simulación de barras laterales

El objetivo del estudio es realizar la simulación de barras laterales con el objetivo de evaluar un diseño para cumplir las normativas aplicables al automóvil en colisión lateral. Puesto que en este caso solamente aplica a la barra por sí misma y no tiene vinculación con el resto de elementos del vehículo, se establecen unas directrices de cómo va a realizarse este estudio:

- El cumplimiento de la normativa proporciona unos valores de las fuerzas frente a deflexión en el habitáculo que deben soportar en colisión lateral. No procede aplicar esos valores directamente a la barra, como si se tratara del caso en el que la barra sometida a carga absorbiera todas esas cifras de energía en el impacto por sí sola. La razón es porque el vehículo dispone de más elementos estructurales que interaccionan entre sí en el choque, es decir, la energía absorbida en el impacto se reparte en más elementos como la puerta, vigas en el techo, taloneras, etc. Eso implica que dentro del objetivo de fuerzas que impone la norma, la barra de protección lateral es una fracción que contribuye a cumplir este objetivo. Puesto que no se dispone de un modelo completo de automóvil para simular en colisión lateral, no se puede hacer la comparación directamente con un valor de la normativa.
- La variabilidad de diseño y materiales es amplia, por lo que se ha acotado el estudio bajo unos objetivos para realizar comparaciones entre diseños y optimizar el diseño en base a una elección de geometría más conveniente.

El procedimiento operativo del estudio pasa por las siguientes etapas:

1. Selección de geometrías de barra para ejecutar una comparación entre sí. Se han realizado 5 variantes de diseño, con el objetivo de evaluar el comportamiento de cada sección de manera global. El objetivo de esta comparación es identificar qué secciones de barras resultan de mejores resultados sin tener en cuenta el diseño de sus anclajes. La comparativa impone como restricciones que deben tener la misma superficie de sección transversal, peso por unidad de longitud, espesor y tipo de material.
2. Simulación el comportamiento de los diseños escogidos frente a una sollicitación de flexión con el poste de colisión con carga centralizada común a todos los diseños.
3. Evaluación de las secciones y elección de una geometría para el estudio profundo de optimización.
4. Realización de un estudio de simulación de la geometría de interés para optimizar su diseño variando espesor y tipo de material.
5. Evaluación y selección del material y espesor más favorable para el diseño final de la barra.
6. Diseño de la morfología de barra final con el material y espesor seleccionados, teniendo en cuenta el apoyo sobre el que se ensambla al resto de elementos estructurales del vehículo. Sobre este diseño, realizar la simulación para evaluar el comportamiento con la geometría, material y espesor finales.

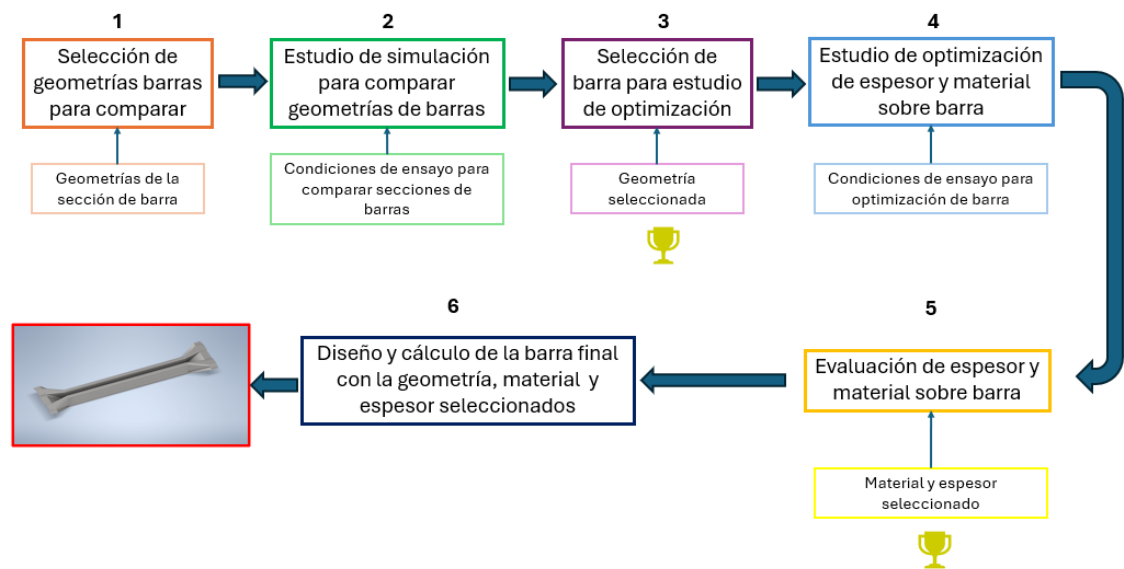


Figura 1. Diagrama de las fases del proyecto

7. Fases y resultados obtenidos del estudio

7.1. Selección de geometrías de barra

Las geometrías de partida seleccionadas para el estudio son las que se muestran a continuación:

Geometrías	Imagen representativa
Barra 1 "tipo sombrero"	
Barra 2 "tipo M"	
Barra 3 "tipo circular"	
Barra 4 "tipo epsilon"	
Barra 5 "tipo C"	

Tabla 3. Selección de geometrías de barras de protección para el estudio

Para realizar una evaluación en igualdad de condiciones es necesario que la sección del perfil tenga la misma superficie. De esta manera, el peso por unidad de longitud es el mismo para todas las variantes de geometría. Para esta primera fase no se tiene en cuenta el apoyo de la barra en la estructura del vehículo, por lo que geométricamente se excluye este elemento. Como referencia para estimar las longitudes de las barras, se han tomado medidas desde el exterior de la puerta de un coche como referencia para estimar una longitud de diseño. Midiendo sobre la longitud de una puerta del conductor de un BMW serie 3 E46 berlina, se ha estimado una longitud máxima aproximada de 1 metro. Puesto que se va a analizar en primer

lugar la sección primitiva, para realizar el estudio se han diseñado barras de 750mm de longitud, dejando espacio preparado para los apoyos y la transición entre la sección principal y el apoyo.

Los detalles geométricos de las barras se pueden encontrar en los anexos 3.1. *Descripción de las geometrías de sección de las barras.*

A continuación se muestra una tabla resumen con las características principales de los diseños mencionados:

Tipo de barra	Peso (kg)	Longitud barra (mm)	Peso (kg)	Alto volumen ocupado (mm)	Ancho volumen ocupado (mm)	Superficie genérica ocupada (mm ²)	Inercia a flexión pura respecto a ejes principales (mm ⁴)
1 "sombbrero"	2,915	750	2,915	150	50	7500	185782,902
2 "M"	2,931	750	2,931	101	50	5050	134710,623
3 "circular"	2,922	750	2,922	81	81	6561	387480,111
4 "épsilon"	2,917	750	2,917	115	50	5750	125869,088
5 "C"	2,914	750	2,914	149	50	7450	107556,139

Tabla 4. Características físicas de los diseños de secciones de barras de protección lateral

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se han modelado las geometrías primitivas:

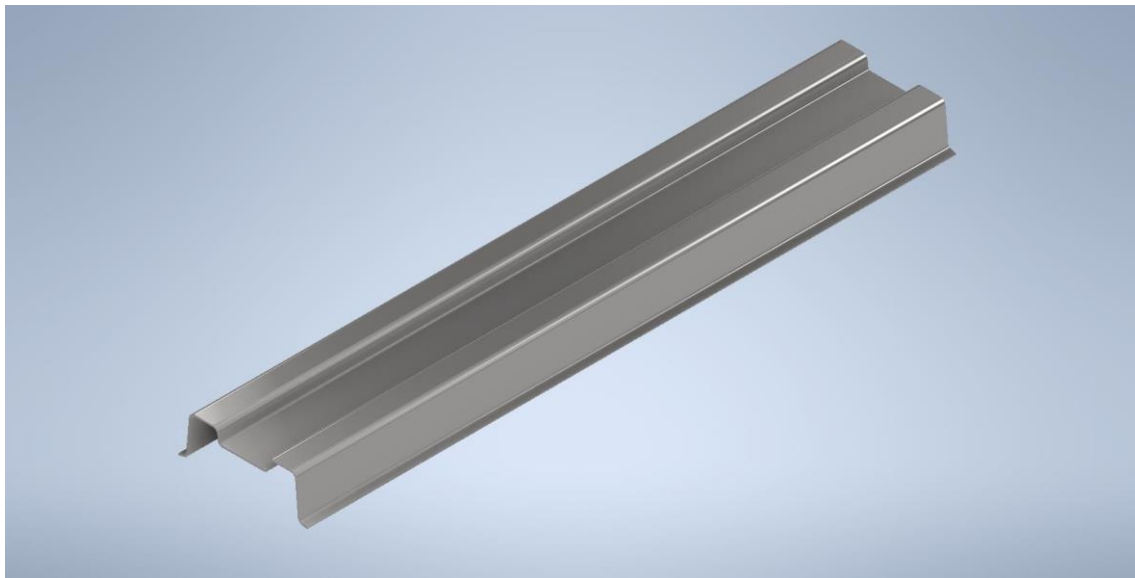
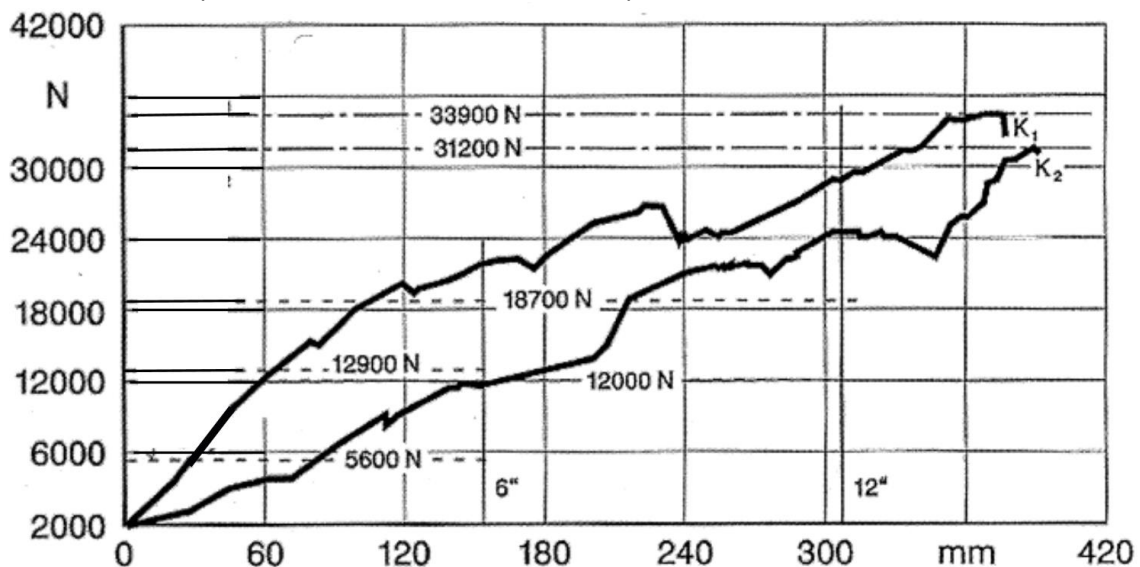


Ilustración 26. Ejemplo de barra modelada en 3D para el estudio de geometría. Ejemplo tomado de la barra 5 "tipo C".

7.2. Resultados de las simulaciones en la comparativa de geometrías

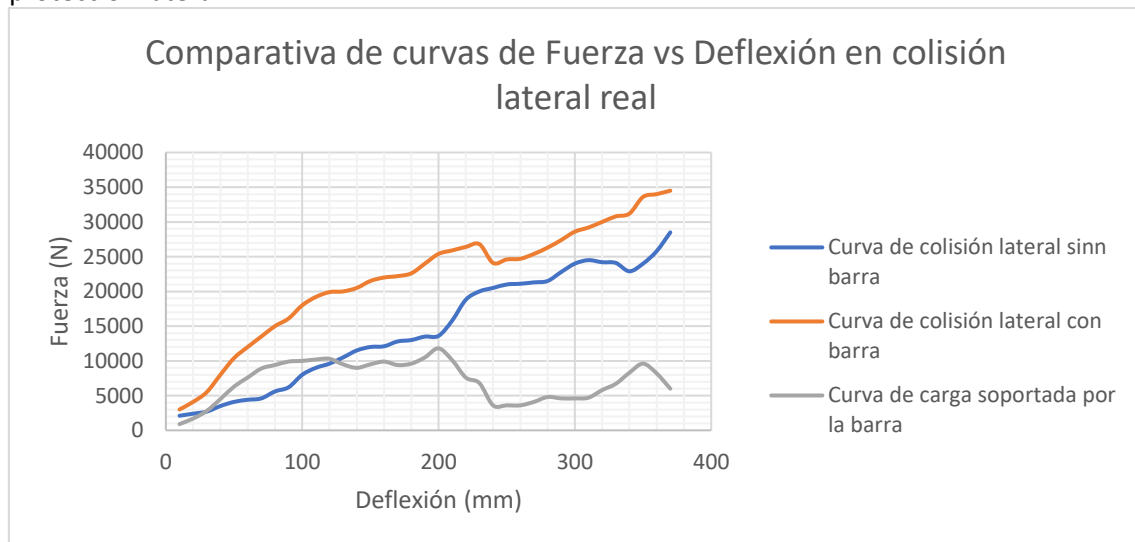
Para la realización de las simulaciones se ha tomado como referencia una curva existente real del comportamiento de un ensayo de choque lateral, en el cual se compara el efecto en los resultados de la presencia o ausencia de la barra de protección lateral.



Gráfica 2. Curva de ensayo de colisión lateral contrastando el efecto con y sin barra de protección lateral en un Ford Focus del año 1996. (Castejón Herrero, n.d.)

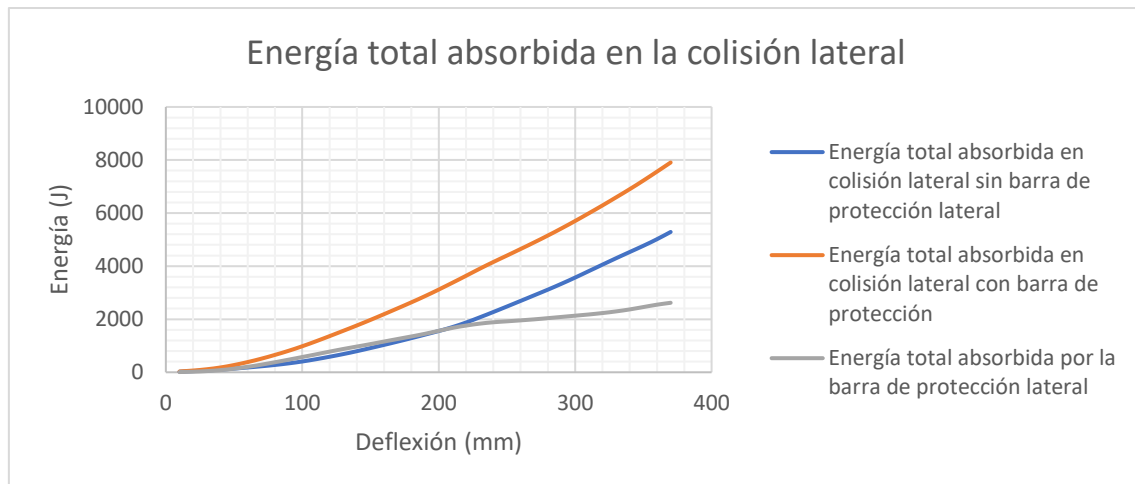
Se pueden encontrar más detalles en los anexos 3.2. *Obtención del comportamiento de una barra en un caso real.*

Analizando estos resultados experimentales, se extrae el comportamiento de la barra de protección lateral:



Gráfica 3. Desglose de curva de fuerza frente a desplazamiento en colisión lateral de Ford Focus 1996 desglosando el comportamiento aportado por la barra de protección lateral

Extrapolando la fuerza y el desplazamiento de la barra a una estimación de energía total absorbida, el comportamiento experimentado es el siguiente:



Gráfica 4. Desglose de curva de energía total calculado absorbida frente a desplazamiento en colisión lateral de Ford Focus 1996 desglosando el comportamiento aportado por la barra de protección lateral

Como se puede apreciar, la barra cumple un papel de absorción de energía, especialmente en el comienzo de la colisión. La mayor parte de la absorción energética de la barra se focaliza en el contacto inicial de la colisión y en el primer límite de fuerza analizado por la normativa. A partir de dichos desplazamientos, la intrusión supone un peligro para la seguridad de los ocupantes del vehículo, ya que entraría en contacto el ocupante del vehículo con los elementos de colisión.

La curva de fuerza frente a desplazamiento de la barra analizada se ha usado como referencia de partida para realizar el estudio de simulación de las geometrías. Para este estudio, se ha tomado el valor de fuerza máxima registrada por la barra, de tal forma que se pueda enlazar una comparativa frente a un resultado ya existente. Es decir, se someten las barras a una carga de 12.000N para el estudio de geometría, la misma fuerza máxima que se ha registrado en la curva de fuerza frente al desplazamiento extraída del ensayo del Ford Focus de 1996.

La disponibilidad de este valor de fuerza es de vital importancia. Se podría realizar el mismo estudio aplicando un desplazamiento impuesto del poste de colisión frente a las barras de protección lateral, pero sin información previa se complica la valoración sobre los resultados de la fuerza soportada.

Para el estudio de simulación, se ha evaluado el conjunto de geometrías mencionadas bajo el comportamiento del mismo material y mismas condiciones de carga. Puesto que las condiciones reales de apoyo reales de la barra en el vehículo son caso intermedio entre biapoyado y biempotrado, se han realizado las simulaciones teniendo en cuenta estos dos casos. El comportamiento de la rigidez de los apoyos no se ha incluido por no disponer de información suficiente. Respecto del material empleado, se ha recurrido a acero estructural S235 en 2mm de espesor. La geometría de la barra se ha modelado para la simulación como un elemento Shell, y el poste como un cuerpo que se comporta como un sólido rígido. El objetivo por sí solo de esta prueba es la evaluación de la geometría por sí sola. Al homogeneizar material, espesor y peso, la comparación busca encontrar la geometría óptima frente a impacto lateral.

Los detalles de la configuración de la simulación se pueden encontrar en los anexos (3. *Estudio de simulación de barras laterales*). El estudio de simulación se ha realizado empleando el software ABAQUS en su versión de licencia de estudiante. A continuación, se muestra una imagen ilustrativa de un caso de simulación:

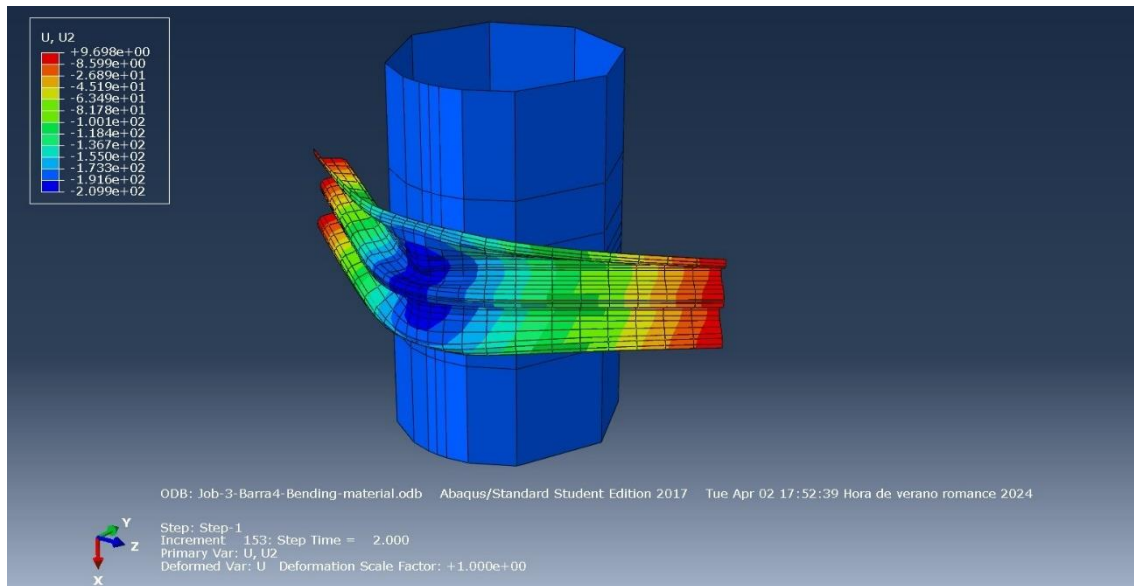
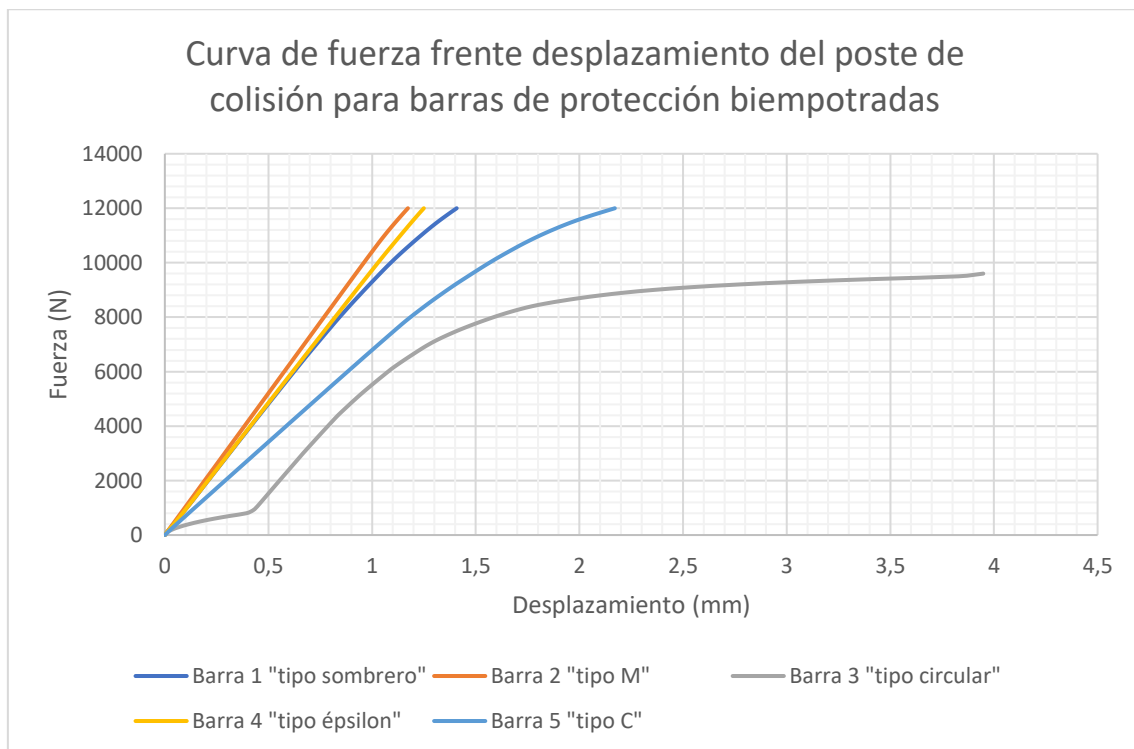
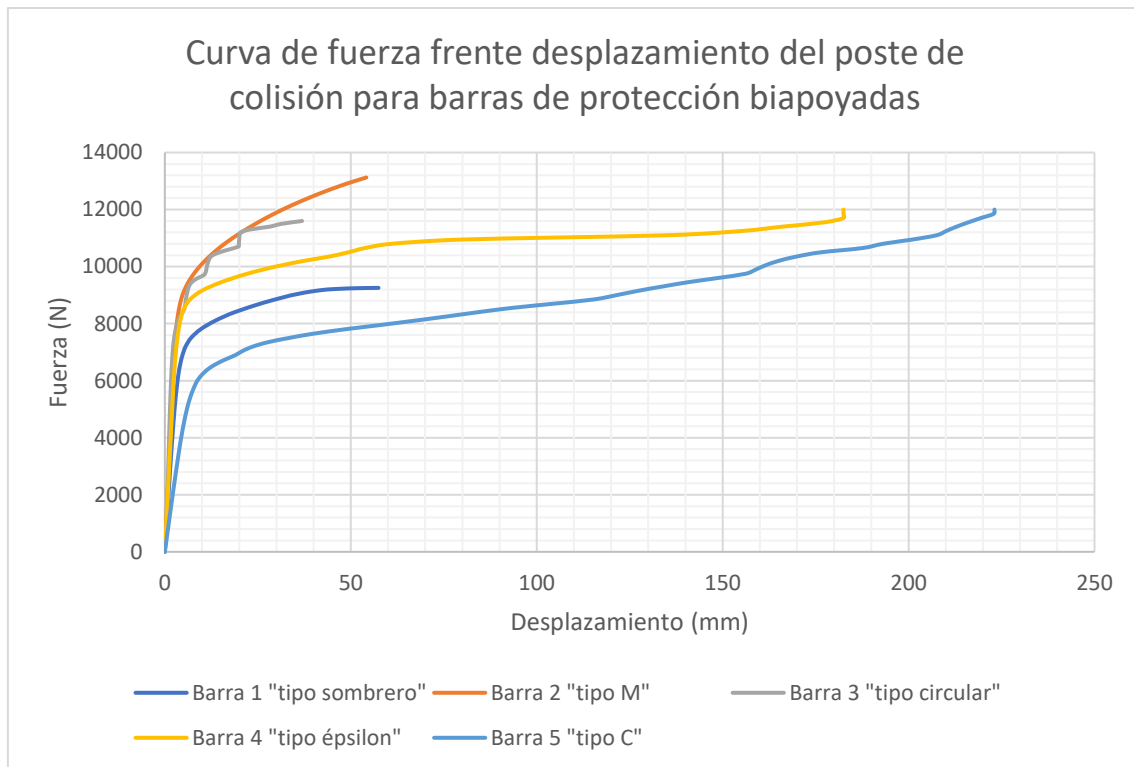


Ilustración 27. Ejemplo de resultados de simulación en el estudio de la geometría de barras de protección lateral. Ilustración de una representación del campo de desplazamientos en la dirección de avance del poste de colisión sobre la barra 4 de "tipo épsilon".

Las curvas de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión obtenidas se muestran a continuación:

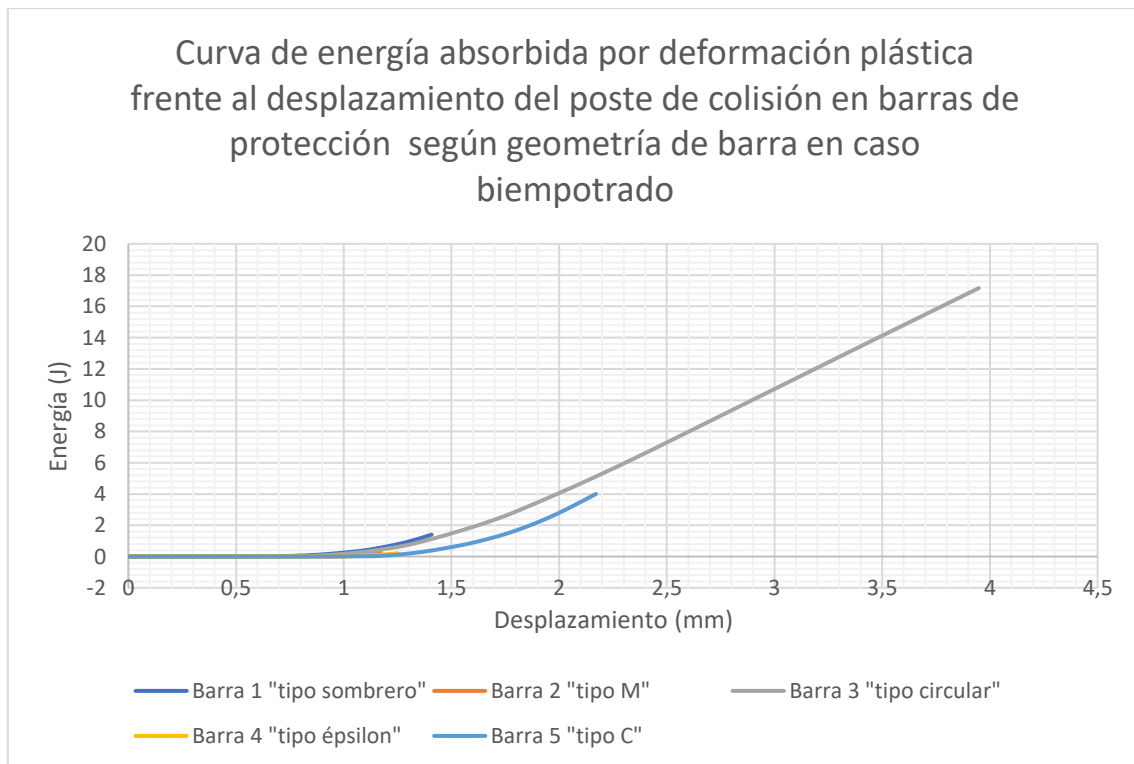


Gráfica 5. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión para las distintas geometrías de barras ensayadas en condición biempotrada.

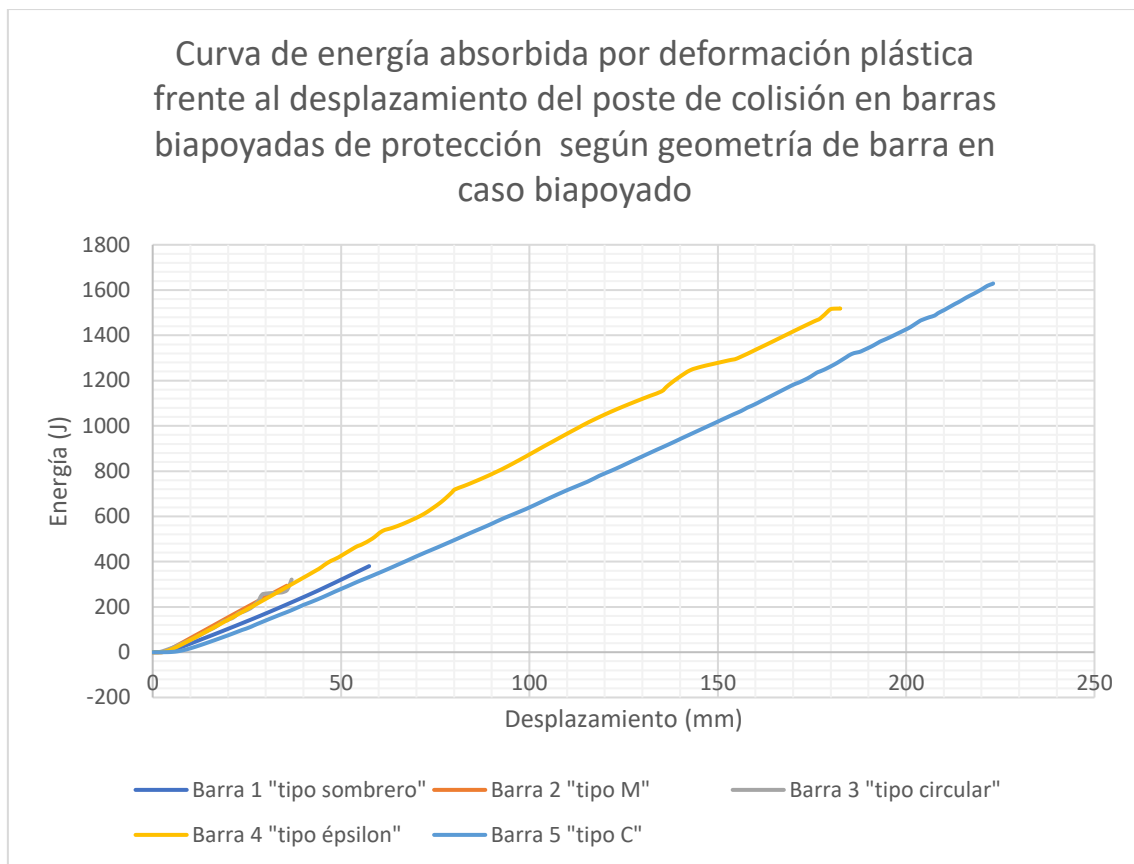


Gráfica 6. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión para las distintas geometrías de barras ensayadas en condición biapoyada.

Las curvas de energía absorbida por deformación plástica frente al desplazamiento del poste de colisión son las siguientes:



Gráfica 7. Curva de energía absorbida por deformación plástica frente al desplazamiento del poste de colisión en barras de protección según geometría de barra en caso biempotrado.



Gráfica 8. Curva de energía absorbida por deformación plástica frente al desplazamiento del poste de colisión en barras de protección según geometría de barra en caso biapoyado.

Los detalles de resultados de las geometrías de barras se pueden encontrar en los anexos 4.1. *Resultados de la simulación del estudio de geometría de barra.*

Los detalles de las condiciones de modelado de material para el caso de las geometrías se pueden encontrar en los anexos 3.3. *Modelado de las condiciones de comportamiento de material para el estudio previo de geometrías.*

7.3. Evaluación de las secciones y elección de una geometría para el estudio profundo de optimización

El análisis de los resultados en este proyecto recurre al uso de indicadores, ratios y valores para evaluar el rendimiento y los resultados obtenidos por cada barra. Junto con los valores obtenidos en la simulación de fuerza, desplazamiento, tensiones y energía absorbida de la barra, se han recopilado múltiples indicadores que permiten evaluar los resultados obtenidos. Los detalles sobre los indicadores e información asociada puede encontrarse en los anexos 1.4 *Ratios e indicadores de evaluación*.

Prestando atención a la curva de fuerza frente a desplazamiento del poste, se pueden extraer indicadores y conclusiones de rendimiento asociado a la geometría de la barra. A continuación, se muestra un diagrama esquematizado del comportamiento de la barra respecto de la curva de fuerza aplicada frente a la deflexión experimentada:

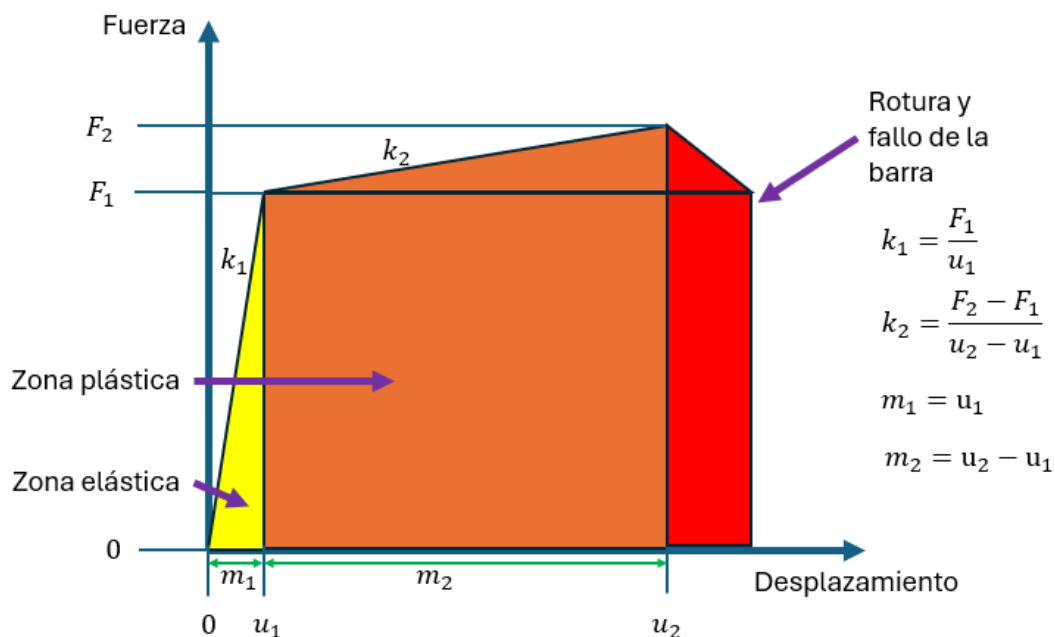


Figura 2. Esquema de comportamiento mecánico de la barra de protección lateral con indicadores extraídos de la curva fuerza frente a desplazamiento.

El análisis parte de inspeccionar el comportamiento de la barra en la zona inicial en la que no hay plastificación y la zona final en la que se produce la plastificación hasta el fallo:

- **Zona inicial elástica.** Sobre esta zona, el comportamiento de la barra sigue una tendencia elástica, aumentando la fuerza frente al desplazamiento de forma lineal y pronunciadamente. El nivel de fuerza y desplazamiento que es alcanzado en esta fase tiene vital importancia en la absorción de energía de la barra. El objetivo deseable es que minimizando la deflexión de la barra al máximo se maximice la fuerza a la que termina este límite. Esto significa que prima la obtención de una rigidez estructural alta de la geometría de la barra. Sobre esta zona se extraen los siguientes indicadores de interés:
 - Fuerza máxima elástica F_1 .
 - Desplazamiento máximo elástico u_1 .
 - Incremento de deflexión elástica m_1 .
 - Rigidez de la barra en la zona elástica k_1 .
- **Zona de plástica.** Sobre esta zona, la barra experimenta comportamiento plástico y absorbe energía permanentemente en forma de deformación plástica. De manera simplificada, la barra experimenta una zona de fluencia del material, en la cual se consigue deformar la barra ampliamente si elevar significativamente la carga.

Dependiendo de cada barra y el material, el comportamiento de la curva suele tender a ser plano o con poco incremento de la fuerza requerida, llegando hasta el fallo de la barra. Sobre esta zona se extraen los siguientes indicadores de interés:

- Fuerza máxima plástica F_2 .
- Desplazamiento máximo plástico u_2 .
- Incremento de deflexión plástica m_2 .
- Rigidez de la barra en la zona elástica k_2 .

Se pueden encontrar más detalles de estos indicadores en los anexos. (1.4.2. Indicadores sobre las curvas)

Los resultados de estos indicadores mencionados obtenidos en cada barra son los siguientes:

Barras Biempotradas	Barra 1 "tipo sombrero"	Barra 2 "tipo m"	Barra 3 "tipo circular"	Barra 4 "tipo épsilon"	Barra 5 "tipo C"
u_1 (mm)	1,4079	1,1726	1,7703	1,2494	1,8842
m_1 (mm)	1,4079	1,1726	1,7703	1,2494	1,8842
F_1 (N)	12000	12000	8400	12000	11250
K_1 (N/mm)	8523,089	10233,86	4744,914	9604,226	5970,76
u_2 (mm)	1,4079	1,1726	8,3511	1,2494	2,1711
m_2 (mm)	0	0	6,5808	0	0,2869
F_2 (N)	12000	12000	11600	12000	12000
K_2 (N/mm)	N/A	N/A	486,263	N/A	2614,22

Tabla 5. Indicadores de fuerza, desplazamiento y rigidez según tipología de barra en caso biempotrado

Barras Biapoyadas	Barra 1 "tipo sombrero"	Barra 2 "tipo m"	Barra 3 "tipo circular"	Barra 4 "tipo épsilon"	Barra 5 "tipo C"
u_1 (mm)	7,0421	5,6014	6,4512	6,7908	13,9988
m_1 (mm)	7,0421	5,6014	6,4512	6,7908	13,9988
F_1 (N)	7500	9275	9300	8850	6600
K_1 (N/mm)	1065,0213	1655,836	1441,600	1303,243	471,4691
u_2 (mm)	57,463	54,184	36,8873	182,439	222,8777
m_2 (mm)	50,420	48,583	30,436	175,649	208,8789
F_2 (N)	9254,595	13125	11600	11700	11850
K_2 (N/mm)	34,7993	79,2458	75,5680	16,2256	25,1342

Tabla 6. Indicadores de fuerza, desplazamiento y rigidez según tipología de barra en caso biapoyado

De acuerdo a los resultados de los indicadores mostrados, la barra 2 posee la mayor rigidez inicial k_1 , lo cual le confiere a priori una posición más ventajosa frente a las demás, seguida por la barra 3. El segundo tramo de comportamiento según la rigidez en k_2 sugiere un aumento de capacidad de endurecimiento mayor para la barra 2 en comparación al resto.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las barras de los siguientes indicadores:

Barras Biapoyadas	Barra 1 "tipo sombrero"	Barra 2 "tipo m"	Barra 3 "tipo circular"	Barra 4 "tipo épsilon"	Barra 5 "tipo C"
Peso (kg)	2,915	2,931	2,922	2,917	2,914
Ancho (mm)	50	50	81	50	50
$E_{abs}(\delta L_{max})$ (J)	265,896	325,107	213,946	1095,085	1338,598
$\eta(\delta L_{max})$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$y(\delta L_{max})$	15874,090	20470,82	12252,727	20569,078	20590,25

Tabla 7. Indicadores de rendimiento de absorción energética según geometría en caso biapoyado

Barras Biempotradas	Barra 1 "tipo sombrero"	Barra 2 "tipo m"	Barra 3 "tipo circular"	Barra 4 "tipo épsilon"	Barra 5 "tipo C"
Peso (kg)	2,915	2,931	2,922	2,917	2,914
Ancho (mm)	50	50	81	50	50
$E_{abs}(\delta L_{max})$ (J)	8,4476	7,0355	18,953	7,4967	13,0264
$\eta(\delta L_{max})$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$y(\delta L_{max})$	20583,2	20470,8	10140,2	20569,1	20590,3

Tabla 8. Indicadores de rendimiento de absorción energética según geometría en caso biempotrado

Respecto a los valores de rendimiento de energía específica absorbida SEA, los resultados obtenidos son los siguientes (Se remarca que el SEA está calculado en base a la energía absorbida por deformación plástica de aquí en adelante):

$SEA(\delta L_{max})$ (J/kg)	Barra 1 "tipo sombrero"	Barra 2 "tipo m"	Barra 3 "tipo circular"	Barra 4 "tipo épsilon"	Barra 5 "tipo C"
Barras biapoyadas	91,217	110,920	73,219	375,415	459,368
Barras biempotradas	2,8980	2,4004	6,4864	2,5700	4,4703

Tabla 9. Resultados de SEA en el estudio de geometrías de barras de protección lateral

El SEA es un parámetro importante de cara a evaluar el rendimiento de absorción de energía por unidad de masa de material. Lo deseable es obtener el mejor valor de SEA, lo cual viene asociado a que el material está mejor aprovechado para absorber energía.

Como primera consideración para el análisis de los resultados, se ha observado que el modelo de simulación de barra biempotrada no ha resultado verosímil con el comportamiento esperado. La fijación por los extremos ha limitado el desplazamiento de la barra, introduciendo un exceso de rigidez. La consecuencia más directa es la baja absorción de energía y deflexión observada en las barras. Comparativamente con la curva de comportamiento disponible que se ha tomado como referencia, el modelo biapoyado presenta resultados significativamente más factibles. Es por ello que se ha tomado como referencia al modelo de simulación biapoyado para analizar y evaluar los rendimientos de cada geometría de barra.

Además de los indicadores mostrados sobre la curva de fuerza frente a desplazamiento de la barra, se han considerado indicadores adicionales sobre los diseños de las barras. Puesto que las geometrías son variadas y son susceptibles de múltiples variantes de diseño, el enfoque por el que se opta a la hora de evaluar es medir datos específicos en forma de ratio a la vez que valores absolutos. La contrastación frente a un valor absoluto no siempre es directa ni proporciona suficiente información para comprender las ventajas de un diseño. Los ratios y

variables compuestos considerados se pueden encontrar detallados en los anexos (1.4.1. Ratios obtenidos sobre los resultados energéticos de las barras).

Barras Biapoyadas	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
<i>Fuerza máxima registrada en simulación (N)</i>	9254,6	12000	11600	12000	12000
<i>Promedio fuerza (N)</i>	4627,3	6000	5800	6000	6000
<i>Desplazamiento máximo (mm)</i>	57,463	54,184	36,887	182,514	223,100
<i>Tensión Máxima Von Mises de simulación (MPa)</i>	379,8	275	307	454,2	461
<i>Energía por deformación calculada en deflexión (J)</i>	2686,22	603,816	2756,92	1938,39	1978,44
<i>Energía absorbida por deformación plástica ALLPD (J)</i>	380,167	472,36	320,902	1518,66	1629,15
<i>Ratio teórico energía / deformación (J/mm)</i>	8,3325	11,143	10,1428	10,620	8,868
<i>Ratio simulación energía plástica /deformación (J/mm)</i>	6,6159	8,7177	8,6995	8,3208	7,3024
<i>Ratio teórico (J/mm)/alto(mm)</i>	0,0556	0,1103	0,1252	0,09235	0,05952
<i>Ratio teórico (J/mm)/ancho(mm)</i>	0,16665	0,2228	0,125	0,21241	0,17736
<i>Ratio teórico (J/mm)/superficie externa (mm²)</i>	0,00111	0,0022	0,00155	0,00185	0,00119
<i>Ratio simulación (J/mm)/alto(mm)</i>	0,04411	0,0863	0,10740	0,07235	0,04901
<i>Ratio simulación (J/mm)/ancho(mm)</i>	0,13232	0,1743	0,10740	0,16642	0,14605
<i>Ratio simulación (J/mm)/superficie externa(mm²)</i>	0,00088	0,0017	0,00133	0,00145	0,00098

Tabla 10. Indicadores elaborados de ratios de energía absorbida en función de las características geométricas de las barras para caso biapoyado

Los detalles de los resultados obtenidos se pueden encontrar en los anexos 4.1.Resultados de la simulación del estudio de geometría de barra.

Después de presentar los ratios y resultados asociados a cada barra cabe realizar una reflexión sobre las características observadas:

- Como norma general, a igualdad de condiciones de peso, la sección de las barras 2 y 3 han conseguido los mejores resultados frente al resto.
- La geometría circular de la barra 3 resulta una forma con muy buenas capacidades para absorber el impacto lateral, tanto por la rigidez de la barra como por su capacidad de absorber energía de deformación. Los ratios evaluados permiten deducir que consigue un buen compromiso para mantener una intrusión en el habitáculo más reducida, con mayor margen de absorción de carga y energía frente al resto de barras. Es la única alternativa de perfil cerrado en estudio. A pesar de la simplicidad de su forma exterior, su principal contrapartida es que exteriormente es más voluminoso frente a las demás alternativas bajo mismo espesor de material. Esto implica que en

alguna de las direcciones del espacio o visto bajo el espacio ocupado por el perfil es más costoso dimensionalmente para conseguir los mismos resultados de protección.

- La geometría de la barra 2, aunque en el estudio de simulación se ha deformado poco en comparación con otros diseños, presenta los mejores ratios según la simulación y calculado teóricamente de absorción de energía por superficie externa, ancho de barra y por cada milímetro de deflexión. Presenta valores más bajos de tensión, lo cual indica que esta barra dispone de mayor potencial de agotamiento hasta la aparición de fallo.

Tras una valoración de los resultados ejercidos por la simulación, se procede a seleccionar la geometría 2 “tipo M” para el estudio en profundidad de la barra de protección lateral.

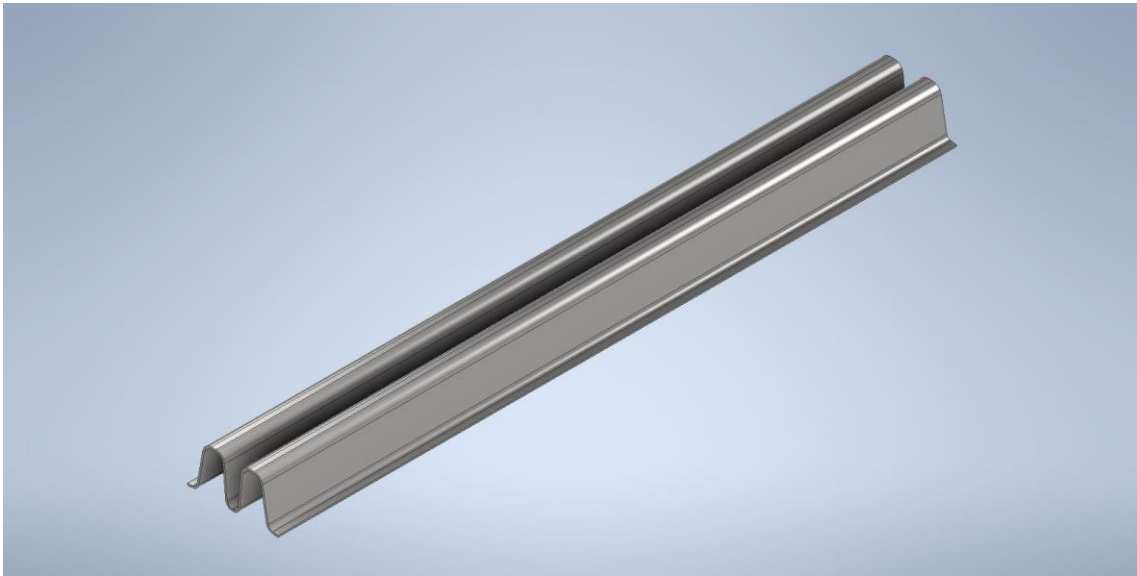


Ilustración 28. Geometría primitiva de la barra de protección lateral "tipo M" escogida como mejor geometría del estudio

7.4. Realización de un estudio de simulación de la geometría de interés para optimizar su diseño variando espesor y tipo de material

Tras los resultados y conclusiones del estudio de geometría, a continuación se procede a realizar una selección de material y espesor adecuados para la geometría elegida. Se tomará una muestra de materiales y espesores sobre los que comparar entre sí frente al comportamiento de la sección pura de la barra. Este paso intermedio pretende simplificar el proceso de diseño de la barra como pieza terminada. Hasta el momento, no se ha considerado el diseño del apoyo. Puesto que el apoyo tiene una complejidad de modelado mucho mayor que la sección por sí sola, una vez que se determina la geometría, material y espesor adecuados se procede a diseñar los anclajes de la barra. Tras diseñar los anclajes, se procederá a simular el comportamiento de la barra completa, en las condiciones más cercanas a la instalación en el vehículo. Cabe destacar que el estudio está teniendo solamente en cuenta a la barra por sí sola y al material, por lo que la morfología de los anclajes en la puerta del vehículo no se está teniendo en cuenta. No se dispone de un modelo sobre el que instalar la barra, por tanto es un estudio genérico por sí solo, con potencial de aplicar correcciones finales para adaptarse a la geometría de un vehículo real.

Esta fase se separa en dos pasos consecutivos:

- Seleccionar los materiales y espesores para realizar el estudio. Para reducir la carga de selección, se ha realizado una búsqueda de materiales candidatos y sobre ellos se han cribado según un sistema de puntuación sobre sus propiedades. A partir de las puntuaciones, se ha seleccionado un material comercial de aceros martensíticos (MS), de fase compleja (CP) y de fase dual (DP) con diferentes espesores para el estudio.
- Realizar el estudio de simulación a partir de los materiales y espesores seleccionados. El estudio de simulación es similar a las condiciones en las que se evaluó la geometría de la barra, añadiendo un estudio de la influencia de pandeo en función del espesor escogido.

7.4.1. Selección del materiales y espesores para la simulación de la geometría de barra escogida

Para realizar este estudio, se ha hecho una preselección de tipos de materiales candidatos a incluir en el estudio, evaluado y aplicando un sistema de puntuación entre ellos. Junto con la información sobre aceros mencionada en apartados anteriores y con las indicaciones de recomendaciones de uso del fabricante SSAB, se ha realizado un cribado de tipología de material. (*Steel Grades Used in Automotive Industry - Docol - SSAB*, n.d.)

Los detalles sobre los materiales pueden encontrarse en los anexos 3.4. *Materiales considerados para la selección de material sobre la barra optimizada.*

Dentro de la gama de aceros sobre aplicación automovilística, se han preseleccionado como tipología de aceros a considerar a los martensíticos (MS), de fase compleja (CP) y de fase dual (DP). A partir de esta selección, se han considerado los aceros disponibles de esta tipología y se ha procedido a aplicar una selección dentro de cada grupo. Sobre esta selección, se han tenido en cuenta los datos aportados por la ficha técnica del material disponible por el fabricante. Se ha optado por seleccionar un material dentro de cada tipología de acero.

		Designación del material	Espesor min (mm)	Espesor max (mm)	Radio de plegado (Veces espesor)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	% Elong. A80
Tipología de acero	Martensíticos	Docol CR700Y 900T-MS	0,5	2,1	3	700	900	3
		Docol CR860Y 1100T-MS	0,5	2,1	3,5	860	1100	3
		Docol CR 950Y1200T-MS	0,5	2,1	3,5	950	1200	3
		Docol CR 1030Y 1300TMS	0,5	2,1	3,5	1030	1300	3
		Docol CR1150Y 1400T-MS	0,5	2,1	4	1150	1400	3
	Fase Dual	Docol CR 440Y780T-DP	0,5	2,1	1	440	780	14
		Docol CR 450Y780T-DP	0,8	2,5	1	450	780	15
		Docol CR 390Y 800T-DL	0,5	2,1	1	390	800	13
		Docol CR 500Y 800T-DP	0,5	2,1	1	500	800	10
		Docol 800DPX	0,8	2,1	0,9	620	800	10
	Fase Compleja	Docol CR350Y 600T-CP	0,7	2,5	1	350	600	16
		Docol CR 570Y 780T-CP	0,5	2,1	-	570	780	10
		Docol CR780Y 980T-CP	0,5	2,1	-	780	980	6
		Docol CR900Y 1180T-CP	0,5	2,1	-	900	1180	5

Tabla 11. Listado de materiales considerados para preselección con sus características

El sistema de puntuación tiene en cuenta los datos de la ficha técnica mostrados y añade nuevos indicadores para estimar un mejor comportamiento frente a la absorción de energía. Los indicadores desglosados pueden encontrarse detallados en los anexos.

Material	Indicadores artificiales de material		
	Banda de tensión elástica-plástica	Tensión máxima * Deformación	Banda de tensión * deformación
Docol CR700Y 900T-MS	200	2700	600
Docol CR860Y 1100T-MS	240	3300	720
Docol CR 950Y1200T-MS	250	3600	750
Docol CR 1030Y1300TMS	270	3900	810
Docol CR1150Y 1400T-MS	250	4200	750
Docol CR 440Y780T-DP	340	10920	4760
Docol CR 450Y780T-DP	330	11700	4950
Docol CR 390Y800T-DL	410	10400	5330
Docol CR 500Y800T-DP	300	8000	3000
Docol 800DPX	180	8000	1800
Docol CR350Y 600T-CP	250	9600	4000
Docol CR 570Y780T-CP	210	7800	2100
Docol CR780Y 980T-CP	200	5880	1200
Docol CR900Y 1180T-CP	280	5900	1400

Tabla 12. Ponderadores generados para evaluar los materiales a seleccionar.

Junto con los datos anteriores de la ficha técnica se realiza la evaluación dentro de cada tipología de acero. Se aplica una puntuación ascendente en función de los criterios:

- *Máxima tensión*. Se evalúa el valor de resistencia mecánica del material. A mayor resistencia, se asigna una puntuación más alta.
- *Elongación*. Se evalúa la deformación admisible en la resistencia mecánica. A mayor porcentaje de deformación, se asigna una puntuación más alta.
- *Incremento de tensión*. Se evalúa el valor de la banda de tensión elástica-plástica. A mayor banda, se asigna una puntuación más alta.
- *Tensión máxima * deformación*. A mayor valor, se asigna una puntuación más alta.
- *Incremento de tensión * deformación*. A mayor valor, se asigna una puntuación más alta.

Se reserva la posibilidad de realizar acciones correctivas en la puntuación para no polarizar las diferencias bajas entre valores.

Las tablas de puntuación elaboradas para evaluar los aceros son las siguientes:

Evaluación de puntuaciones por tipo de acero					
Total puntos	5	9	15	19	19
Incremento de tensión * deformación	1	2	4	5	4
Tensión máxima * deformación	1	2	3	4	5
Incremento tensión	1	2	4	5	4
Elongación	1	1	1	1	1
Máxima Tensión	1	2	3	4	5
Material	Docol CR700Y 900T-MS	Docol CR860Y 1100T-MS	Docol CR 950Y1200T-MS	Docol CR 1030Y 1300T MS	Docol CR1150Y 1400T-MS
	Martensíticos				

Tabla 13. Puntuaciones de aceros martensíticos evaluados

Evaluación de puntuaciones por tipo de acero					
Total puntos	19	21	21	13	11
Incremento de tensión * deformación	3	4	5	2	1
Tensión máxima * deformación	4	5	3	2	2
Incremento tensión	4	3	5	2	1
Elongación	4	5	3	2	2
Máxima Tensión	4	4	5	5	5
Material	Docol CR 440Y 780T-DP	Docol CR 450Y 780T-DP	Docol CR 390Y 800T-DL	Docol CR 500Y 800T-DP	Docol 800DPX
	Fase Dual				

Tabla 14. Puntuaciones de aceros de Fase Dual evaluados

Evaluación de puntuaciones por tipo de acero				
Total puntos	16	13	8	13
Incremento de tensión * deformación	4	3	1	2
Tensión máxima * deformación	4	3	1	2
Incremento tensión	3	2	1	4
Elongación	4	3	2	1
Máxima Tensión	1	2	3	4
Material	Docol CR350Y 600T-CP	Docol CR 570Y 780T-CP	Docol CR780Y 980T-CP	Docol CR900Y 1180T-CP
	Fase compleja			

Tabla 15. Puntuaciones de aceros de Fase Compleja evaluados

A partir de este punto, con estos materiales parte la selección de espesores sobre los que se van a ensayar. El objetivo de la selección de materiales y espesores elegidos ha sido establecer una comparativa frente a escalones de espesor similares, de tal manera que se puedan sacar conclusiones si para un mismo espesor es recomendable cambiar a un tipo de material u otro. La selección de materiales para el estudio es la siguiente:

Material	Espesor elegido (mm)
<i>Docol CR1150Y 1400T-MS</i>	0,5
<i>Docol CR1150Y 1400T-MS</i>	0,8
<i>Docol CR1150Y 1400T-MS</i>	1
<i>Docol CR1150Y 1400T-MS</i>	1,2
<i>Docol CR900Y 1180T-CP</i>	0,8
<i>Docol CR900Y 1180T-CP</i>	1
<i>Docol CR900Y 1180T-CP</i>	1,2
<i>Docol CR 450Y 780T-DP</i>	0,5
<i>Docol CR 450Y 780T-DP</i>	0,8
<i>Docol CR 450Y 780T-DP</i>	1
<i>Docol CR 450Y 780T-DP</i>	1,2

Tabla 16. Materiales y espesores elegidos para realizar el estudio de simulación

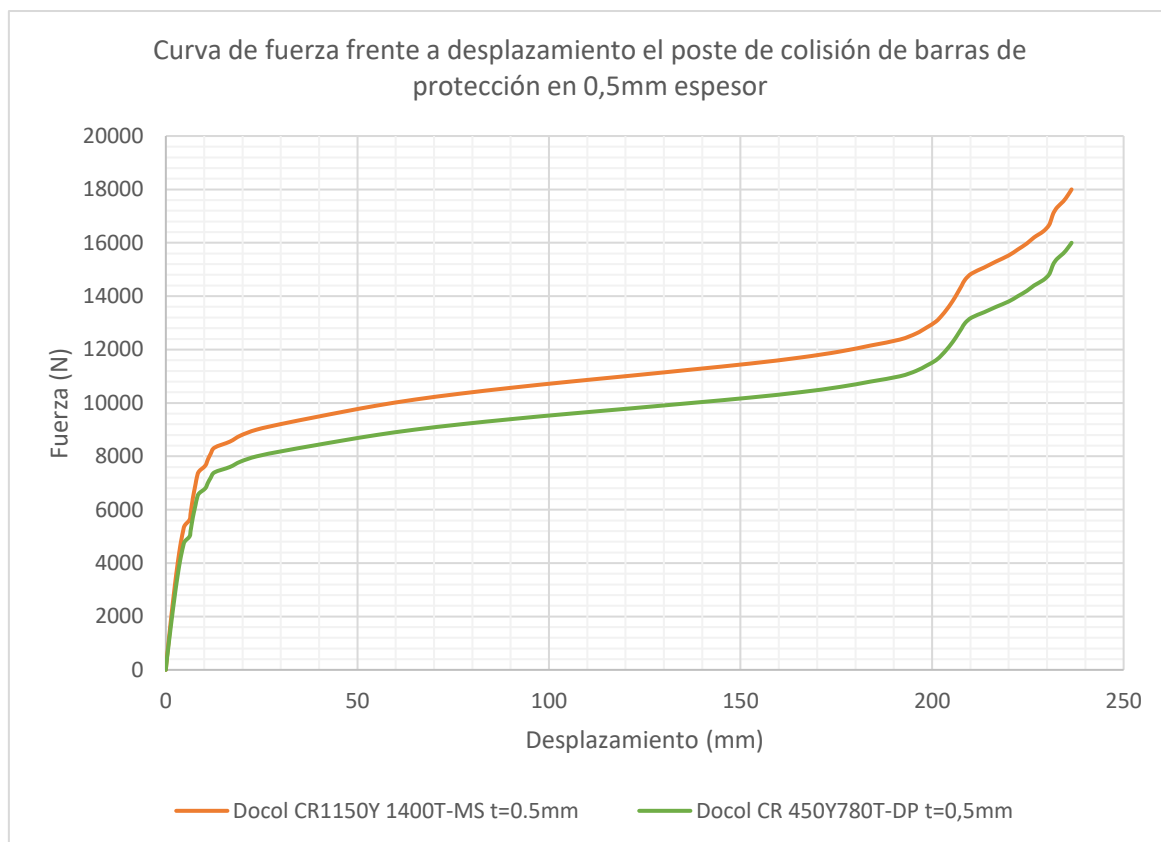
Se ha partido del espesor mínimo en cada material para realizar el estudio. La razón por la que el acero de fase compleja Docol CR900Y 1180T-CP se ha excluido de ensayar a 0,5mm de espesor es porque el espesor mínimo de suministro es 0,8mm. En la selección del acero de fase compleja no se ha escogido el de mayor puntuación porque dicho acero tiene propiedades peores que uno similar disponible en fase dual para similar alargamiento. El material escogido supone un comportamiento intermedio entre el acero martensítico y de fase dual escogido.

En los anexos se puede encontrar los folletos de las fichas técnicas de los materiales considerados. En esencia los aceros martensíticos, de fase compleja y dual tienen diferencias notables en la tensión frente al alargamiento obtenido. (3.4.Materiales considerados para la selección de material sobre la barra optimizada).

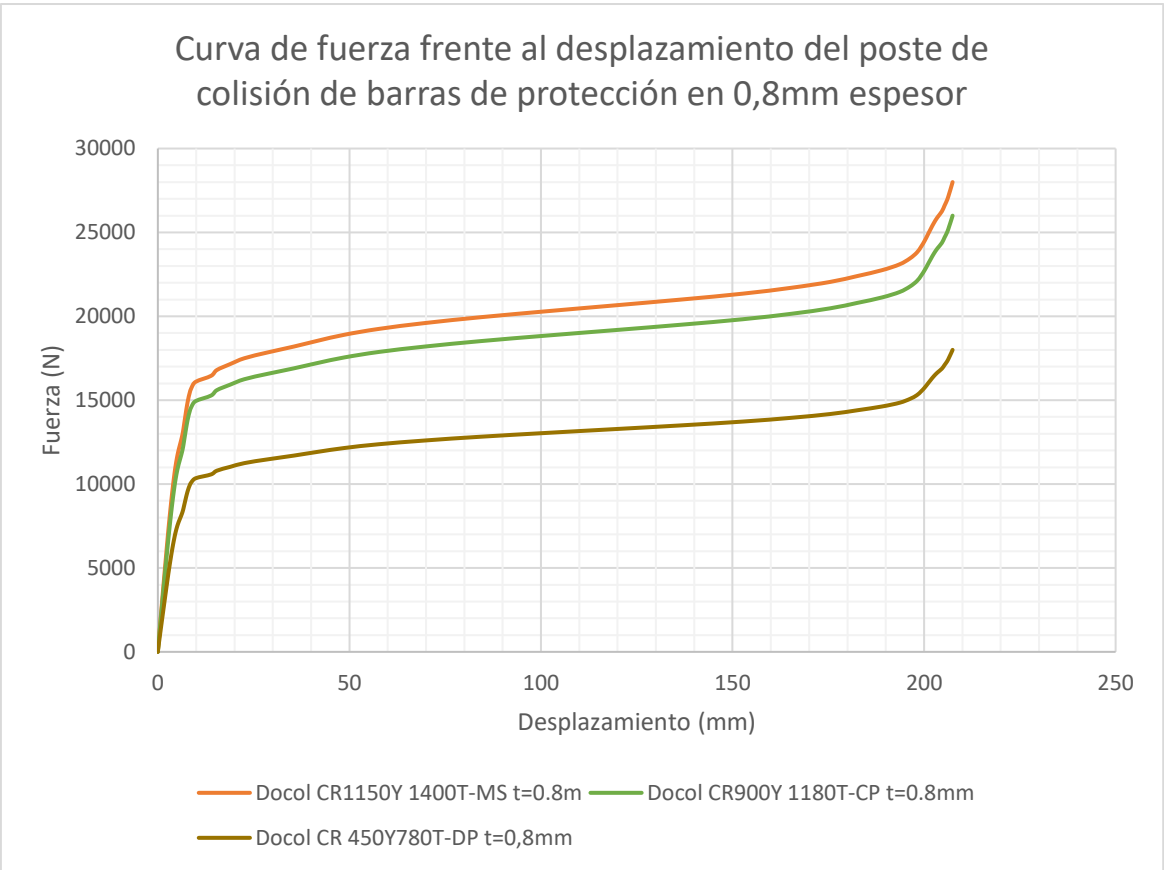
7.4.2. Resultados del estudio de simulación del material y espesor sobre la geometría escogida

Sobre los aceros anteriormente citados, se ha procedido a repetir el mismo tipo de estudio de simulación que en el caso de la geometría, pero cambiando el material y espesor. Además de esto, se ha elevado la carga y se ha buscado obtener el mayor agotamiento del material para una misma sección. De esta manera, se puede establecer una comparativa en términos de rendimientos evaluando deflexión de la barra, fuerza máxima soportada y energía absorbida. Además, para realizar una evaluación más precisa, se ha recurrido a un modelado en simetría de las condiciones de simulación. El comportamiento de los materiales se puede encontrar en los anexos 3.5. *Modelado de las condiciones de comportamiento de material para el estudio de material y espesor.*

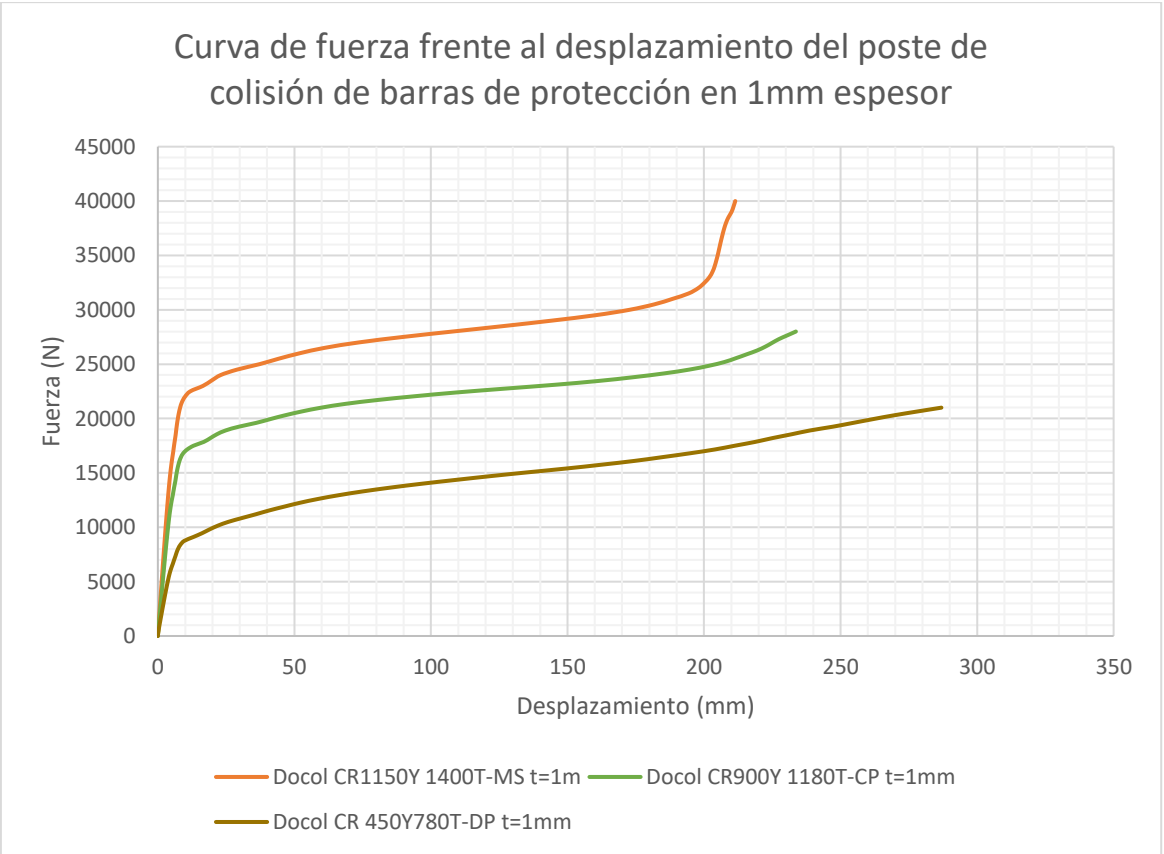
Las curvas de fuerza frente a desplazamiento desglosadas por espesor obtenidas son las siguientes:



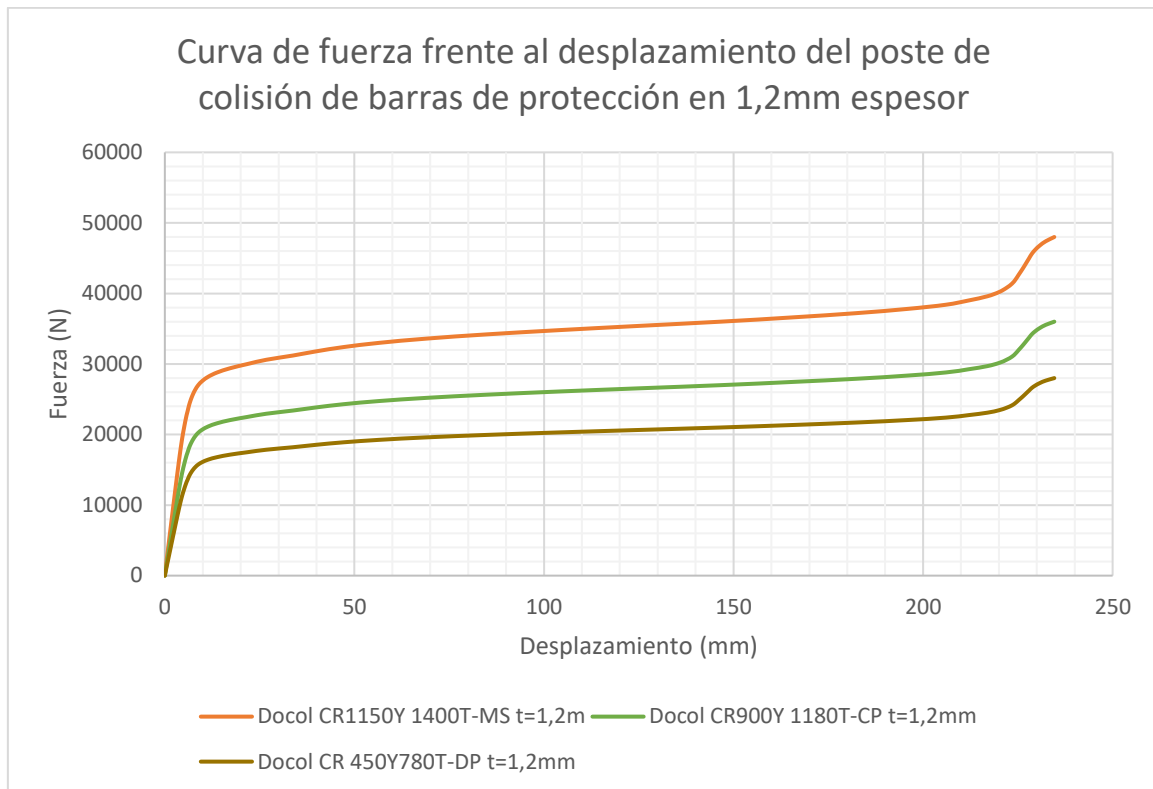
Gráfica 9. Curva de fuerza frente a desplazamiento el poste de colisión de barras de protección en 0,5mm espesor.



Gráfica 10. Curva de fuerza frente al desplazamiento del poste de colisión de barras de protección en 0,8mm espesor.

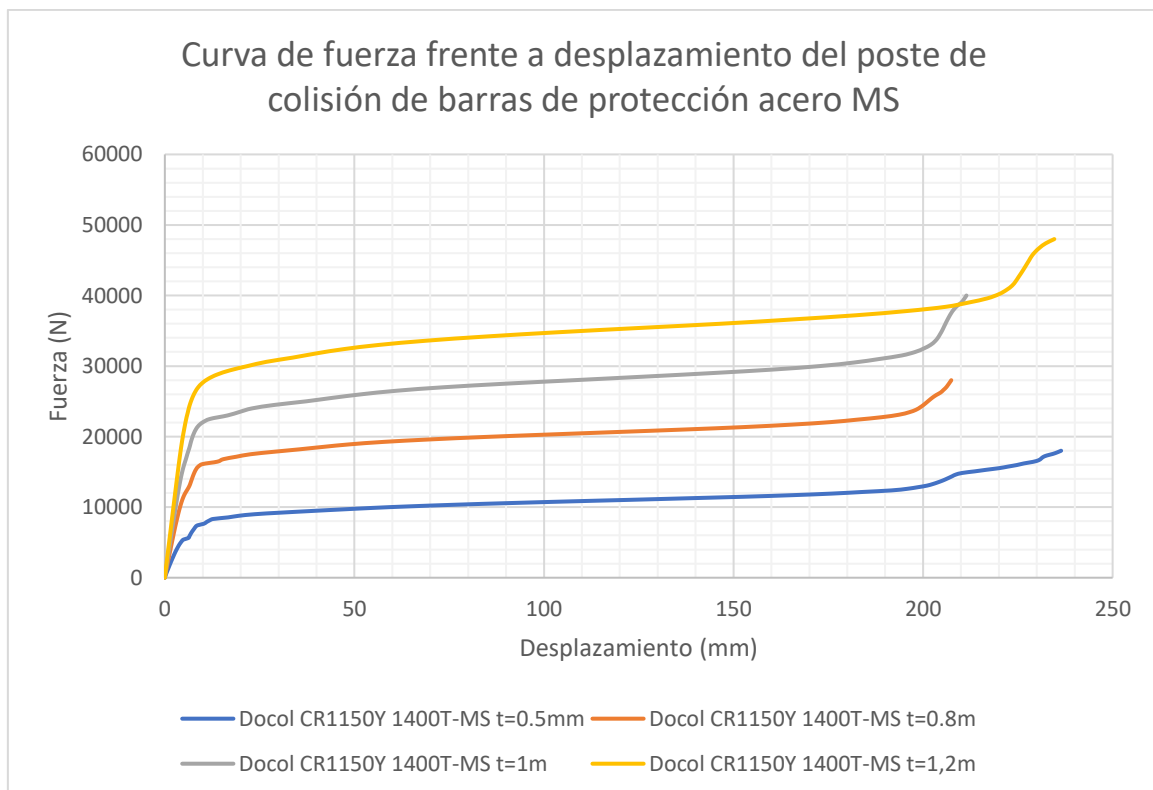


Gráfica 11. Curva de fuerza frente al desplazamiento del poste de colisión de barras de protección en 1mm espesor.

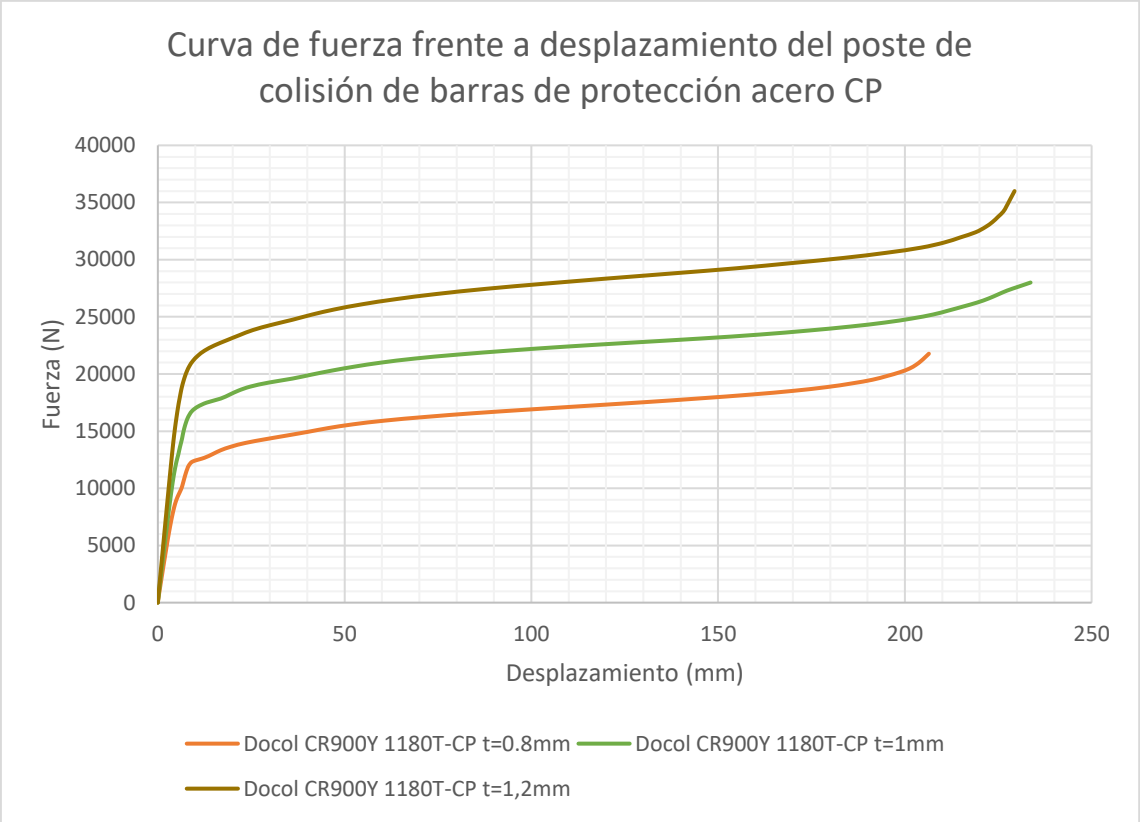


Gráfica 12. Curva de fuerza frente al desplazamiento del poste de colisión de barras de protección en 1,2mm espesor.

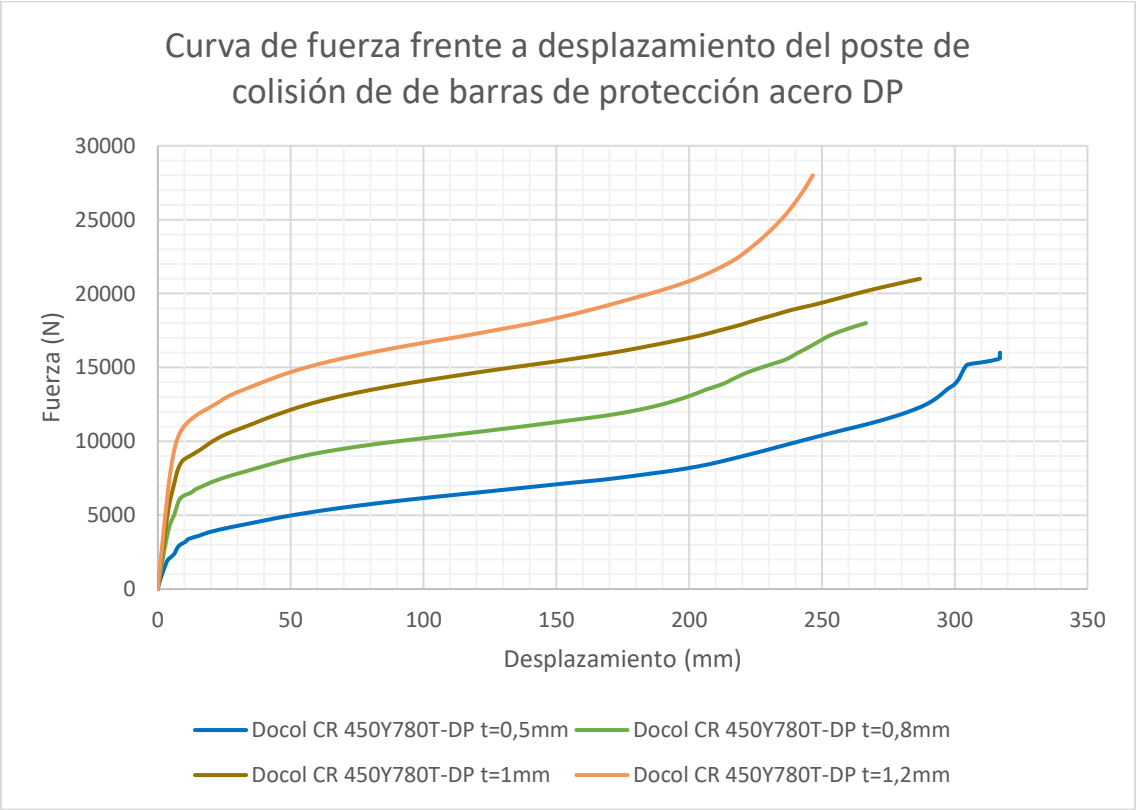
Las curvas de fuerza frente a deformación agrupadas por material en función del espesor obtenidas son:



Gráfica 13. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de barras de protección acero martensítico.



Gráfica 14. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de barras de protección acero de Fase Compleja



Gráfica 15. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de barras de protección acero de Fase Dual

De la misma forma que se han evaluado las geometrías y el estudio anteriormente, se va a recurrir al uso de indicadores y evaluación de los valores absolutos obtenidos en la simulación. A continuación, se muestran unas tablas resumen con los indicadores evaluados para cada material. Para realizar las comparaciones entre configuraciones, se ha marcado como punto limitante de cálculo a la zona de la curva de fuerza frente a desplazamiento en la que se produce un cambio brusco hacia el fallo. El desplazamiento, fuerza y energía máxima absorbida registrada están consideradas hasta el límite citado.

Docol CR 450Y780T-DP				
1,2	27650	13825	245,4	1,7586
1	21000	10500	286,9	1,4655
0,8	16200	8100	243,29	1,1724
0,5	8400	4200	206,2	0,73275
Docol CR 900Y 1180T-CP				
1,2	32850	16425	221,54	1,7586
1	26250	13125	219,35	1,4655
0,8	19175	9587,5	185,76	1,1724
Docol CR1150Y 1400T-MS				
1,2	40800	20400	222,02	1,7586
1	32500	16250	200,21	1,4655
0,8	23450	11725	207,44	1,1724
0,5	13050	6525	201,01	0,73275
Espesor (mm)	Fuerza máxima registrada en simulación (N)	Promedio fuerza (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Peso del perfil (kg)

Tabla 17. Valores obtenidos de fuerzas, desplazamientos y pesos según el material y espesor en el estudio de simulación.

Docol CR 450Y780T-DP				
1,2	4300	2498,5	17,5	10,18
1	4347,9	1858,6	15,2	6,48
0,8	2599,24	1302,72	10,68	5,35
0,5	1232,3	426,1	6	2,07
Docol CR 900Y 1180T-CP				
1,2	6051,10	3343,58	27,3	15,09
1	4724,49	2672,36	21,53	12,18
0,8	2998,05	1473,9	16,13	7,93
Docol CR1150Y 1400T-MS				
1,2	7575,94	4253,18	34,12	19,15
1	5409,89	2904,78	27,02	14,50
0,8	3860,66	1904,93	18,61	9,18
0,5	2093,34	867,51	10,413	4,31
Espesor (mm)	Energía por deformación calculada en deflexión(J)	Energía absorbida por deformación plástica ALLPD (J)	Ratio teórico energía / deformación (J/mm)	Ratio simulación energía plástica /deformación (J/mm)

Tabla 18. Energía absorbida y ratios de absorción en función del material y espesor obtenidos en la simulación.

Espesor (mm)	Docol CR1150Y 1400T-MS				Docol CR 900Y 1180T-CP			Docol CR 450Y780T-DP			
	0,5	0,8	1	1,2	0,8	1	1,2	0,5	0,8	1	1,2
	1183,91	1624,81	1982,11	2418,50	1257,17	1823,51	1901,27	581,49	1111,16	1268,23	1420,74
	SEA				ALLPD/Peso perfil			(J/kg)			

Tabla 19.Resultados de SEA en el estudio de geometrías de barras de protección según estudio de material y espesor

	Docol CR1150Y 1400T-MS			Docol CR 900Y 1180T-CP			Docol CR 450Y780T-DP		
				</					

Tabla 20. Ratios de energía absorbida asociada a las dimensiones según espesor y material obtenidos a partir de la simulación

En los anexos 4.2. *Resultados de la simulación del estudio de material y espesor sobre la geometría elegida* se puede encontrar un desglose gráfico de los resultados agrupados por cada indicador evaluado.

Además de los resultados obtenidos por la simulación, se ha considerado realizar un estudio de criticidad por pandeo en la barra. La baja resolución de mallado enmascara la comprensión los resultados de fallo en cada zona de la sección de la barra. Se ha recurrido a la herramienta ANSYS, ya que en su versión de software de estudiantes permite una resolución de malla mucho mayor. La consideración del fallo por pandeo local supone un paso más restrictivo y refinado de la selección de espesor y material aplicado. El espesor de material es un factor importante en la aparición de los fenómenos de pandeo. En algunos casos, la ausencia de problemas de pandeo se debe a la aplicación de espesores suficientes para no dar lugar a problemas de colapso estructural por fallo de pandeo, ya que la carga de pandeo está lejos de las condiciones de operación del problema. En este caso, los espesores son reducidos y la barra está sometida a una sollicitación mecánica elevada, por lo que la aparición de pandeo es un escenario que sucederá.

Para realizar el estudio de pandeo, se ha realizado una simulación aplicando un desplazamiento impuesto del poste de colisión sobre la barra. De esta manera, se puede conocer directamente en qué punto de desplazamiento de intrusión se empiezan a producirse el pandeo, así como conseguir una convergencia y estabilidad mejor en comparación a una fuerza aplicada. A partir del desplazamiento impuesto, en la solución se pueden extraer el resto de resultados de la solución, incluyendo la fuerza o carga crítica a la que se detecta que ocurre el pandeo de la barra. Mediante un estudio genérico de desplazamiento impuesto de 1mm, se alimenta un estudio de modos de fallo de pandeo para el espesor y material deseado, dando como salida los modos de fallo de pandeo de la barra.

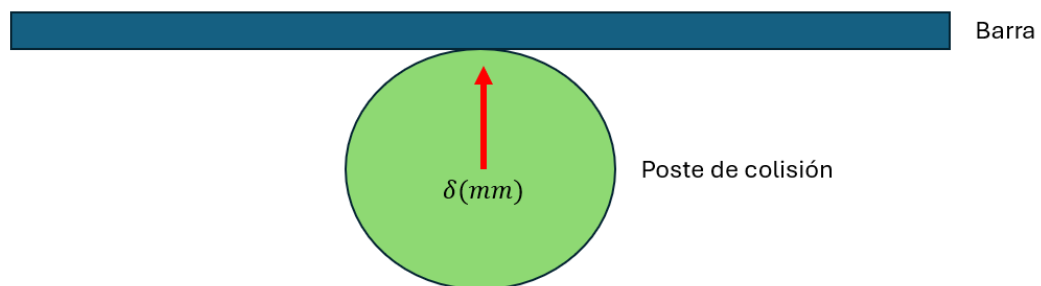


Figura 3. Esquema de aplicación de desplazamiento impuesto

El tipo de modo de fallo fundamentalmente ocurre en la zona de contacto del poste con la barra y en el ala de la sección del perfil. Estos fallos de la sección ocurren en primer lugar. Tras este tipo de fallo, se suceden fallos locales sobre los radios de la parte superior en contacto con el poste y en los tabiques del perfil. Tras colapsar estos primeros elementos en la línea directa de acción del poste de colisión, los fallos por colapso de radios y tabiques se van sucediendo conforme se solicita con más carga a la barra. En las imágenes mostradas a continuación, se puede ver ejemplos de los fallos de pandeo con las zonas enrojecidas en las que se magnifica la propagación del desplazamiento de material, indicando que el desplazamiento abrupto por el pandeo se dará en torno a dichas zonas enmarcadas.

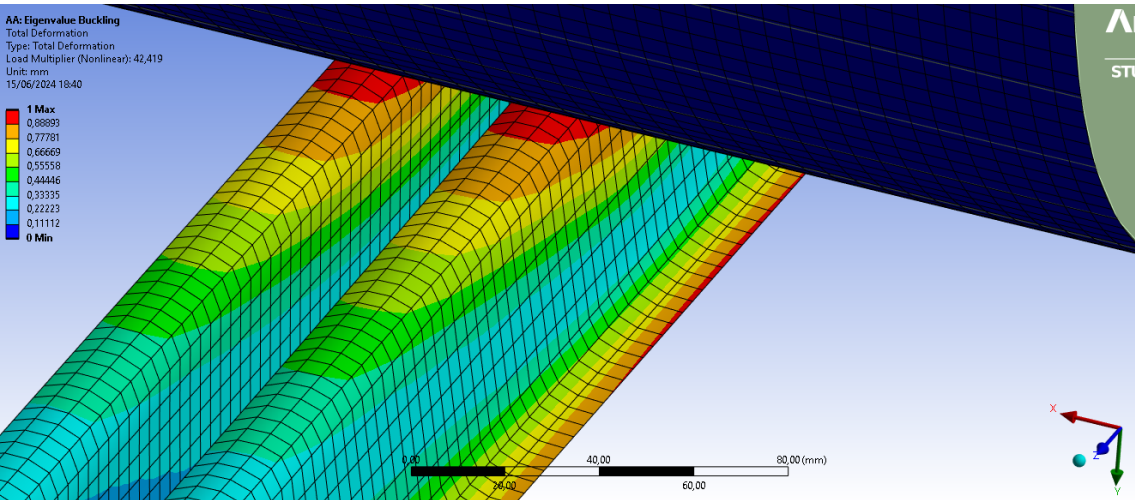


Ilustración 29. Ejemplo de aparición de primeros fallos por pandeo en la barra sobre la zona en contacto con el poste y el ala del perfil.

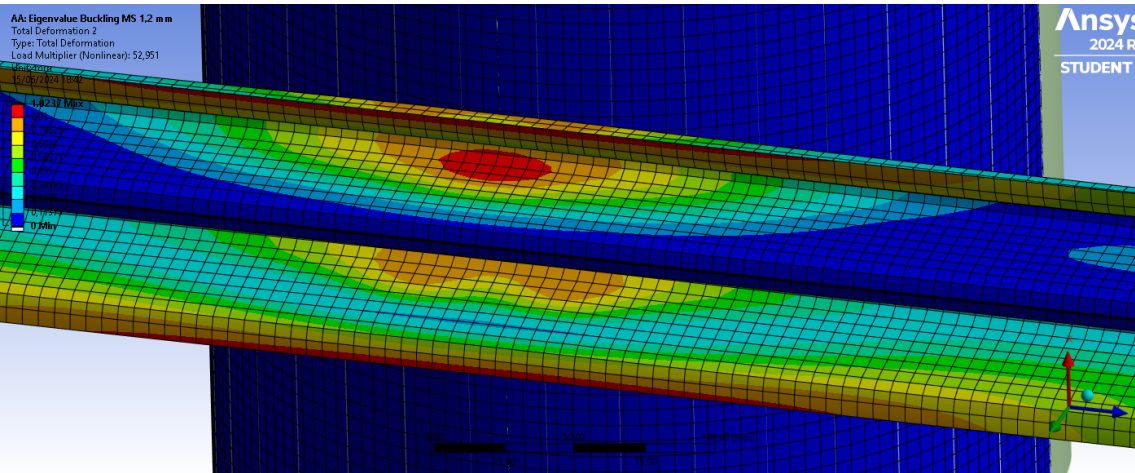


Ilustración 30. Ejemplo de modo de fallo de pandeo sobre los hombros del perfil de la barra.

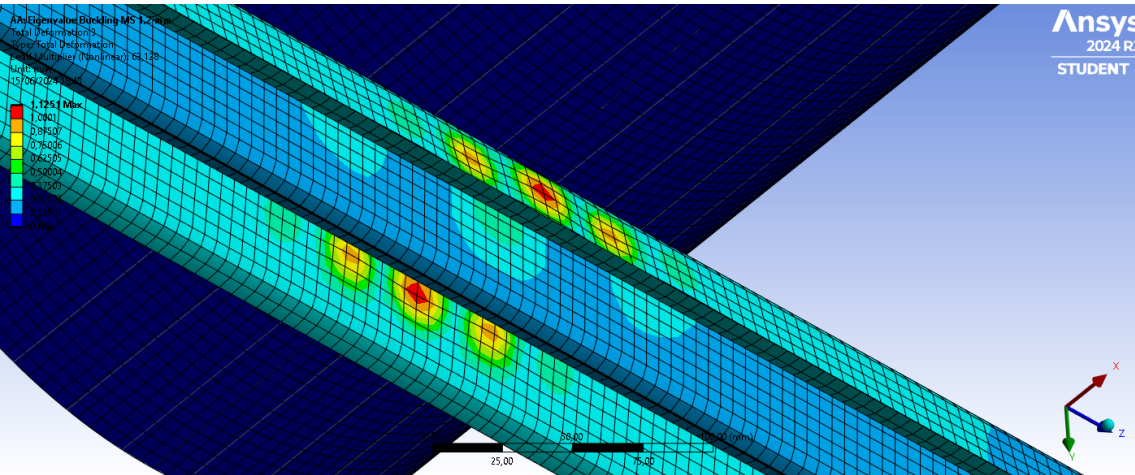
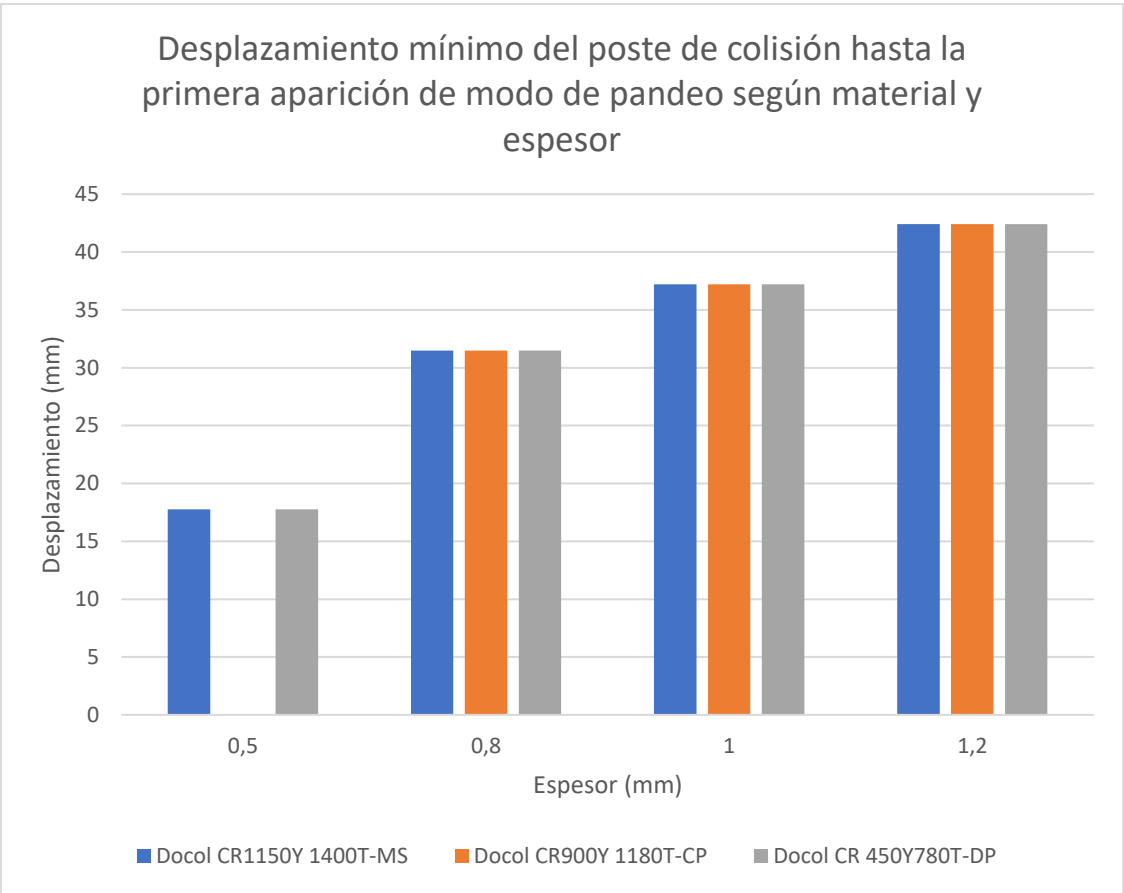
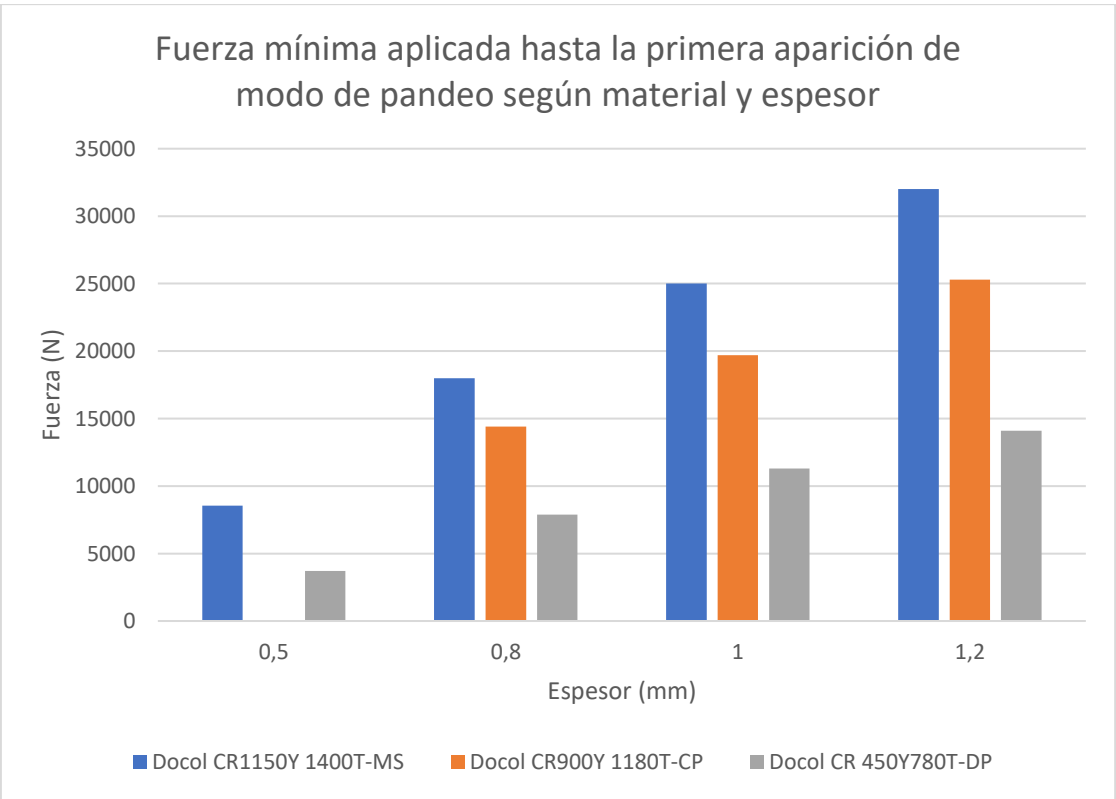


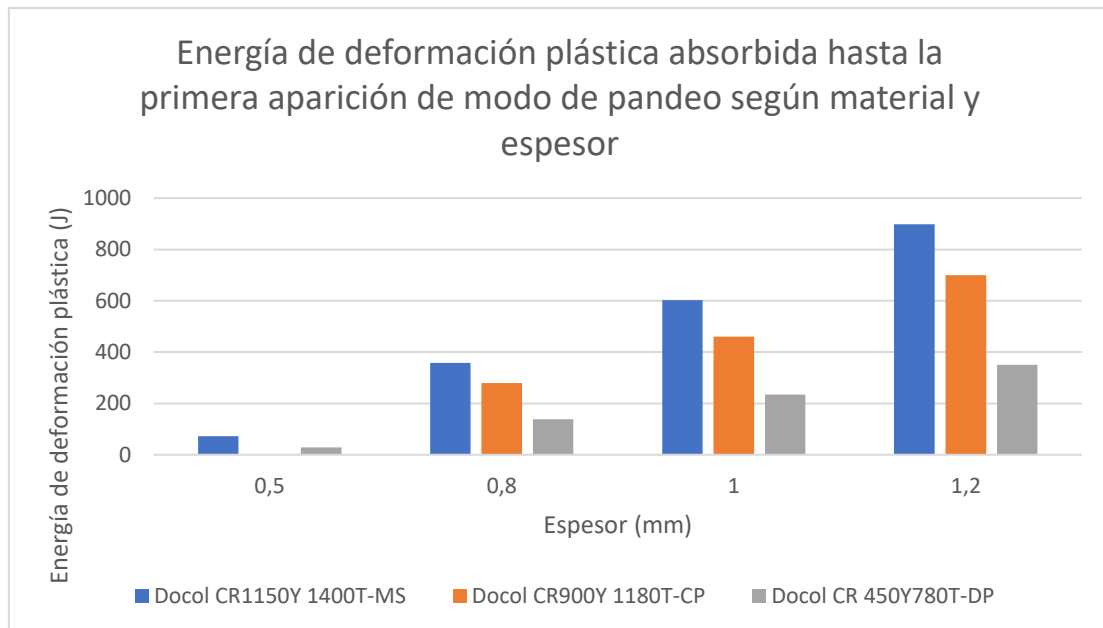
Ilustración 31. Ejemplo de aparición de pandeo sobre los tabiques de la sección de la barra.



Gráfica 16. Desplazamientos del poste de colisión para provocar el primer modo de fallo de pandeo.

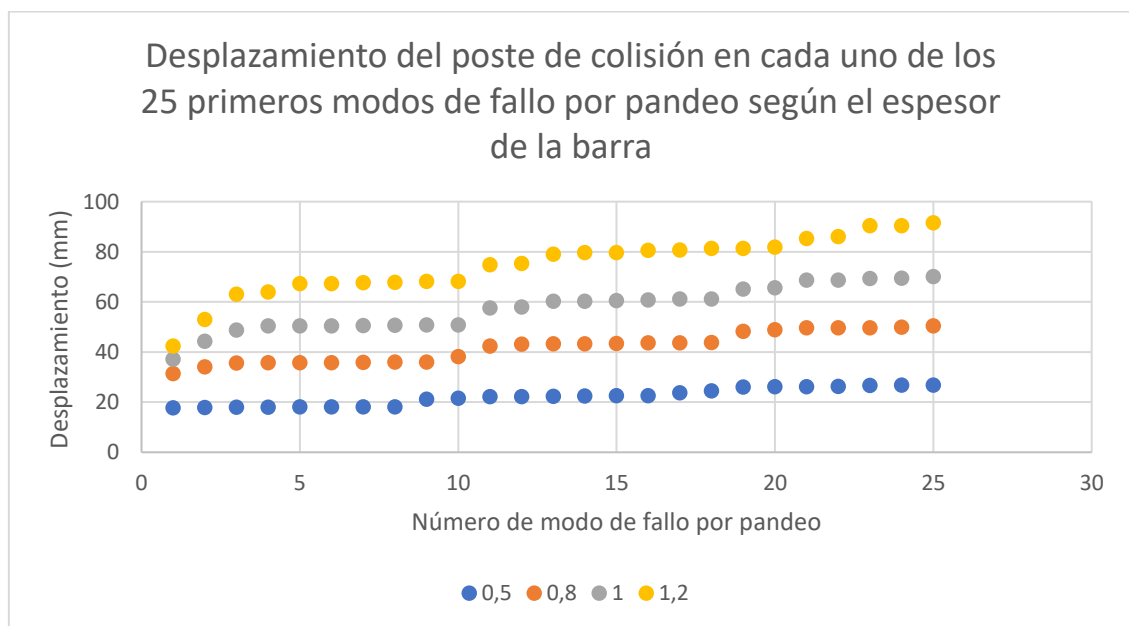


Gráfica 17. Fuerza mínima del poste de colisión para provocar el primer modo de fallo de pandeo.



Gráfica 18. Energía de deformación plástica absorbida hasta la aparición del primer modo de fallo de pandeo.

Los modos de fallo de pandeo que pueden aparecer en la barra son múltiples y se van propagando a medida que se aumenta la carga. Los fallos de pandeo en los primeros modos de fallo según el espesor de la barra son los siguientes:



Gráfica 19. Desplazamiento impuesto del poste de colisión que provoca los primeros 25 modos de fallo de pandeo.

De este gráfico mostrado se puede ver la influencia del espesor en el fallo por pandeo. Al aumentar el espesor de la barra, los primeros colapsos por pandeo se suceden frente a cargas y deflexiones de la barra mayores. Los 3 primeros fallos de modo de pandeo van asociados a la parte central del perfil, comenzando por el colapso de la zona en contacto con el poste, después el ala del perfil y seguidamente los hombros de la sección del perfil. A partir de este punto, continúan sucesivamente los fallos de pandeo en los tabiques de la sección del perfil. Después, los siguientes modos de fallo van propagándose hacia los extremos, dando nuevos colapsos en la sección del perfil sobre los tabiques.

7.5. Evaluación y selección del material y espesor más favorable para el diseño final de la barra

A partir de los resultados obtenidos del estudio de material y espesor, se han recopilado las siguientes conclusiones:

- El modelo de comportamiento mecánico del material tiene en cuenta la posibilidad de extender el nivel de la curva por encima del límite antes de que comience el fallo. Una vez se alcanza el valor de tensión hasta donde se ha definido la curva, el comportamiento satura y se torna plano en la curva de comportamiento. Extender la curva permite identificar si se excedieron los límites de lo que aguanta el material, por lo que se puede identificar en qué momento comienza a fallar el material.
- La interpretación de fallo es de suma importancia para la selección de material. Que la simulación haya sido de converger y calcular por encima de los límites del material es un resultado meramente matemático, sujeto a la interpretación de sentido físico. También es de interés identificar que el momento en el que se produce el fallo del material es anterior a los datos que se están mostrando del final de la simulación.
- Los resultados del acero martensítico Docol CR1150Y 1400T-MS $t=1.2\text{mm}$ en términos absolutos de fuerza y energía absorbida han dado los mejores resultados, con unos ratios altos de absorción de energía. El SEA de esta combinación ha sido también el más alto, lo cual indica que cada unidad de masa invertida de material tiene mejor rendimiento de absorción de energía frente a otras alternativas.
- El espesor de la barra tiene una gran influencia en la aparición del pandeo al ser sometida a carga. Un menor espesor provocará que frente a una carga y desplazamiento de poste menor aparezca antes el fallo por pandeo.
- La influencia del material en el pandeo tiene gran impacto en la energía absorbida antes del colapso del material. Para una misma flecha de desplazamiento, la influencia de material supone una fuerza mayor y más energía de deformación absorbida antes del colapso. El Docol CR1150Y 1400T-MS $t=1.2\text{mm}$ ha resultado la opción más resistente y con mejor capacidad de absorción de energía.

Después de realizar la simulación y la comparativa, se ha optado por escoger el acero martensítico en espesor de 1.2mm Docol CR1150Y 1400T-MS. Esta combinación ha demostrado unas características favorables a frenar la intrusión, coincidiendo con las recomendaciones proporcionadas por el fabricante, el cual recomienda este tipo de acero para estas aplicaciones.

7.6. Estudio de simulación sobre la geometría, material y espesor escogido.

A partir de la geometría y material escogido, se ha realizado un diseño de los anclajes de la barra en el vehículo. Las consideraciones de las características del material de cara a la fabricación y a la integración física en la estructura de la puerta han sido contempladas en el diseño. Las claves de diseño más importantes que se han tenido en cuenta son:

- Integrar un soporte que permita una transición geométrica de la sección para que sea fabricable por los procesos de conformado de chapa.
- Diseñar un apoyo genérico de tal forma que su sistema de unión a la estructura de la puerta del vehículo sea por proceso de soldadura. Debido a la condición actual de no disponibilidad de una puerta sobre la que integrar la barra, se adopta permitir una zona de superficie plana sobre la que acoplar a la estructura.
- Diseñar una geometría de transición y anclaje con suficiente resistencia frente a la carga a soportar, de tal manera que no se produzca un fallo de esta zona funcional antes de agotar el material en la sección central efectiva de la barra.

Los detalles de la geometría de la barra se muestran a continuación (anexos 3.1.6. *Geometría de barra diseñada con apoyos*):

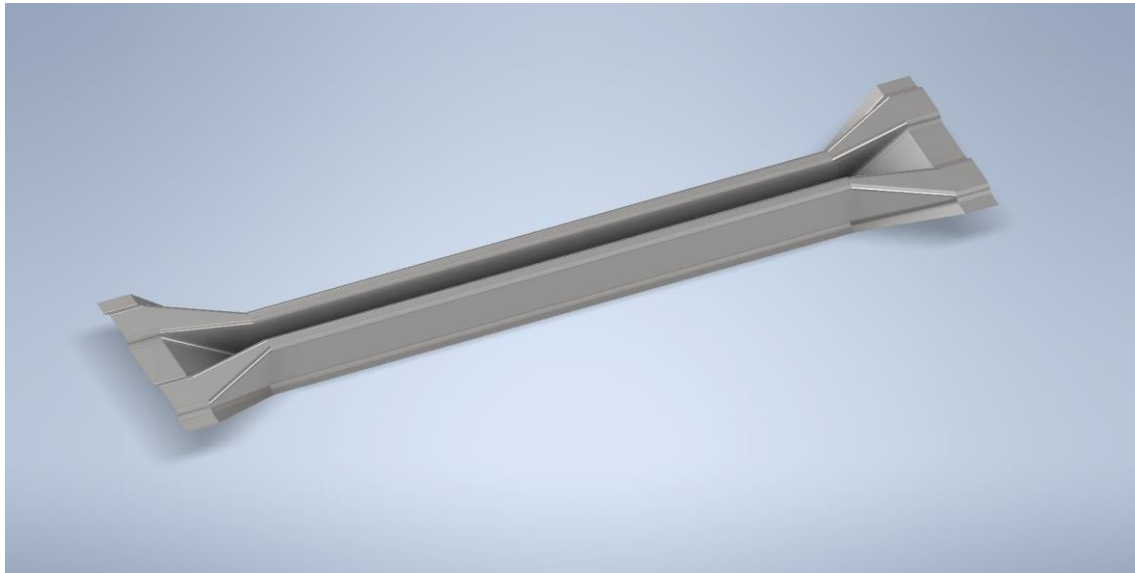


Ilustración 34. Barra de sección 2 "tipo M" diseñada con apoyos de 1.2mm de espesor en acero martensítico Docol CR1150Y 1400T-MS.

Las cotas y detalles específicos de la geometría se pueden consultar en los anexos.

Como detalles de diseño realizados, se ha tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- A nivel resistivo de diseño, el apoyo es mucho más voluminoso en altura de barra, compensando el cambio de inercia geométrica al hacer la transición de la sección de la barra hacia el apoyo. De esta manera, el ancho de la barra se reduce significativamente y permite una mejor integración sobre los elementos de soporte en la puerta del vehículo. Esto se traduce en un diseño de puerta más esbelto y delgado. Se debe tener en cuenta este aspecto, ya que las cotas del vehículo y espacio disponible son restricciones que condicionan el diseño de todos los elementos del vehículo.
- La transición geométrica desde la sección central hacia los apoyos busca suavidad en el cambio de forma, y proporcionar unas geometrías que permitan el conformado en prensado. La forma, ángulos y desalajo de cada tramo de la sección es importante de

cara a que sea un componente fabricable, tratando de incorporar matrices con diseños alcanzables para su integración industrial y fabricabilidad.

Debido a limitaciones del software ABAQUS en su versión de estudiante, se ha cambiado de software para abordar el salto de complejidad de malla y resolución del problema. La licencia de estudiante permite 1000 nodos como máximo, siendo insuficiente para mallar con un mínimo de resolución las zonas de la geometría de la barra contando los apoyos. Los fallos de convergencia y recomendaciones de ABAQUS demandaban una malla mucho más refinada, la cual no era posible conseguir. Es por esto que se ha recurrido a ANSYS para realizar esta parte del proyecto. ANSYS dispone de un límite mucho más alto en número de elementos para la versión de estudiantes, el cual permite un mallado más fino y con más probabilidades de éxito en la convergencia del problema.

Al realizar las primeras simulaciones sobre ANSYS, se ha observado que el comportamiento de la barra era distinto, afrontando dificultades de convergencia y comportamiento estructural que antes no se observaron. El problema a resolver de por sí es no lineal, lo que dificulta la convergencia de la solución.

Para una mejor convergencia de la solución, se cambió el enfoque del problema aplicando un desplazamiento impuesto sobre el poste en vez de a una fuerza aplicada sobre el poste. La convergencia mejoró notablemente cambiando esta condición de contorno. En este caso, es posible cambiar el enfoque hacia un desplazamiento impuesto frente a una fuerza. Anteriormente, la referencia para comenzar el estudio se basaba en los datos de una barra ensayada, por lo que se comparaba respecto a la fuerza registrada por dicha barra. En este caso, el objetivo de la barra es dar el mejor resultado de energía absorbida y fuerza registrada hasta los límites de lo que sea capaz de dar la barra. Los valores de intrusión que marca la normativa se pueden imponer como desplazamientos impuestos del poste de colisión sobre la barra. De esta manera, en cada punto de control de la normativa se puede analizar la fuerza realizada, energía absorbida y estado de agotamiento de la barra.

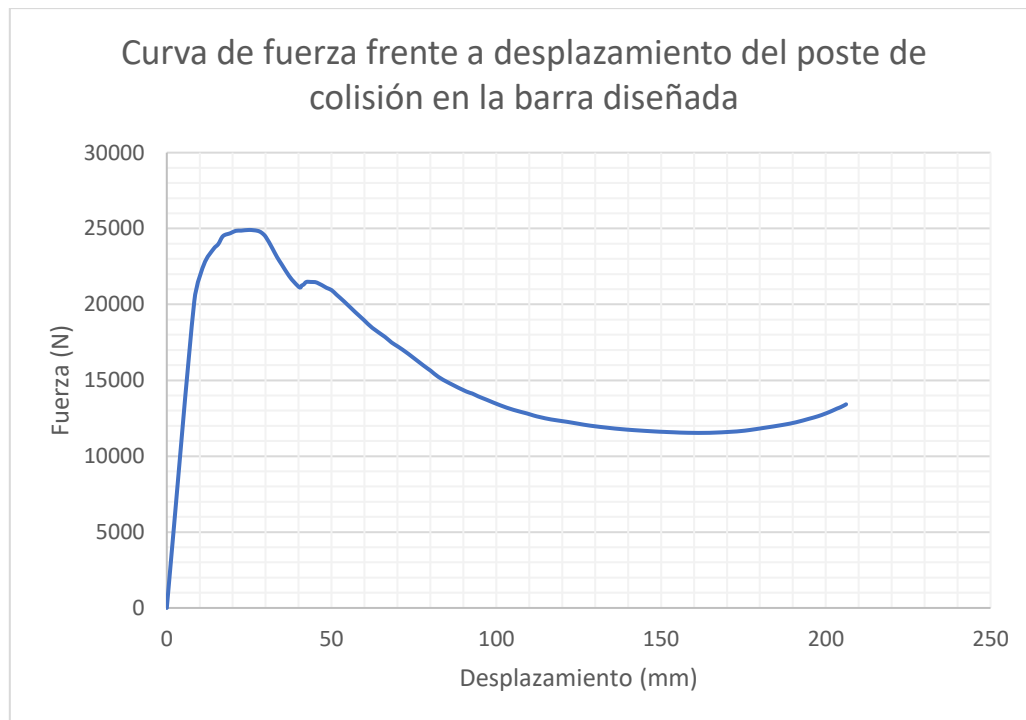
La forma en la que se comporta la sección de la barra se observó distinta frente al estudio de geometría y material en ABAQUS, con la presencia de fenómenos de pandeos locales que inestabilizaban la solución. Debido a estos fenómenos de pandeo, se consideró la inclusión de un análisis de modos de pandeo sobre la barra, de tal manera que se pueda comprender mejor la deformación, el comportamiento de colapso y anticiparse a los desplazamientos y fuerzas en los que puede aparecer.

La simulación indica que es un fenómeno que para este tipo de problema no es despreciable y tiene gran influencia en el comportamiento y resultados obtenidos. En este caso, se suceden varios modos de fallo no lejanos entre sí y afectan a la integridad estructural de la barra.

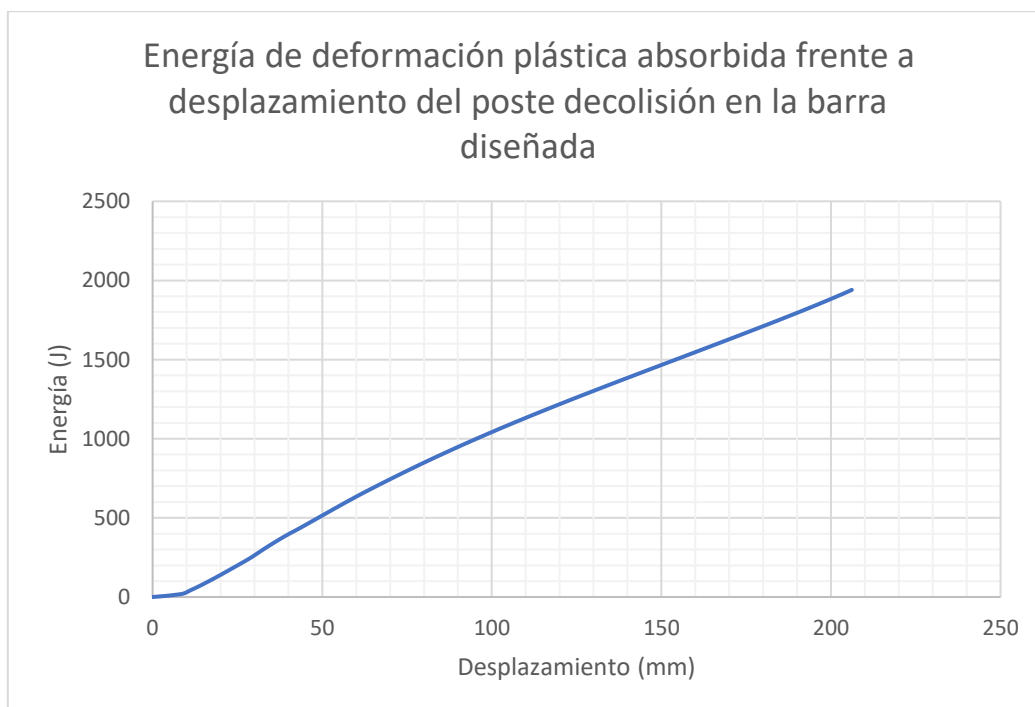
A pesar de la presencia de estos comportamientos locales, se ha simulado la barra buscando agotar la geometría y el material lo máximo posible. En niveles muy grandes de desplazamientos del poste, el fallo mecánico de la barra acabará produciéndose, y el objetivo deseado es que el elemento barra aporte su papel como elemento de protección y disipación de la energía en la mayor medida de lo posible.

Sobre el comportamiento previamente extraído del caso real de comportamiento de barra, se desconoce el estado de deformación, tensión y nivel de rotura alcanzado en esa prueba. A pesar de ello, se ha una contrastación del resultado obtenido con el diseño de barra propio. Se debe de tener en cuenta que el comportamiento de la barra y energía absorbida también está ligado a más elementos que conectan la barra en su ensamblaje mecánico. La comparación no es inmediatamente directa por no estar en las mismas condiciones, pero permite una cierta comparación cualitativa y cuantitativa a partir de los resultados obtenidos.

Los resultados de la simulación obtenidos de la barra se muestran a continuación, pudiendo consultar más detalles en los anexos (4.3. *Resultados de la simulación del estudio sobre la barra diseñada*). La convergencia de la resolución del problema en simulación se ha alcanzado hasta unos 206mm de hundimiento del poste en la barra.



Gráfica 20. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de la barra diseñada



Gráfica 21. Curva de energía absorbida por deformación plástica frente a desplazamiento del poste de colisión de la barra diseñada.

A continuación, se puede observar el campo de tensiones alcanzado en las zonas de la barra:

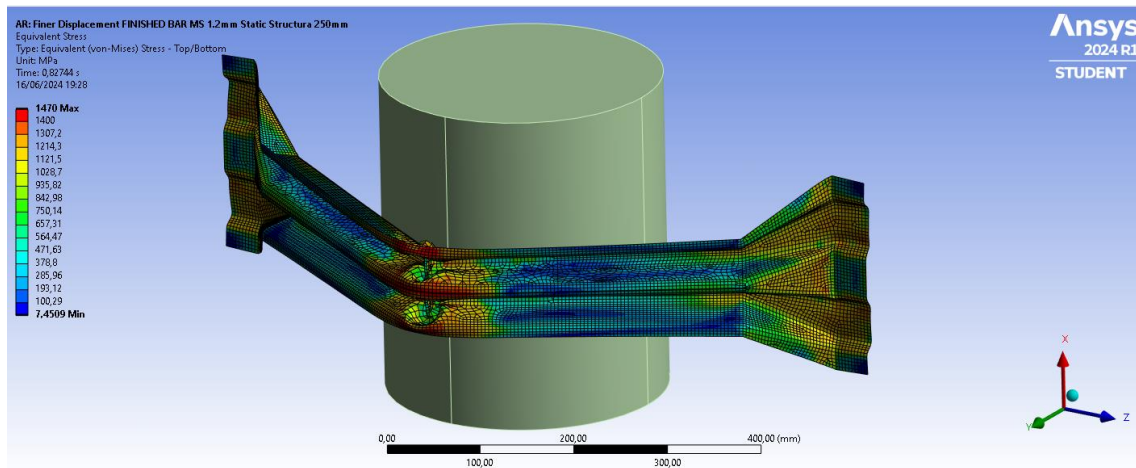


Ilustración 35. Detalle del campo de tensiones sobre la barra diseñada al hundir el poste de colisión.

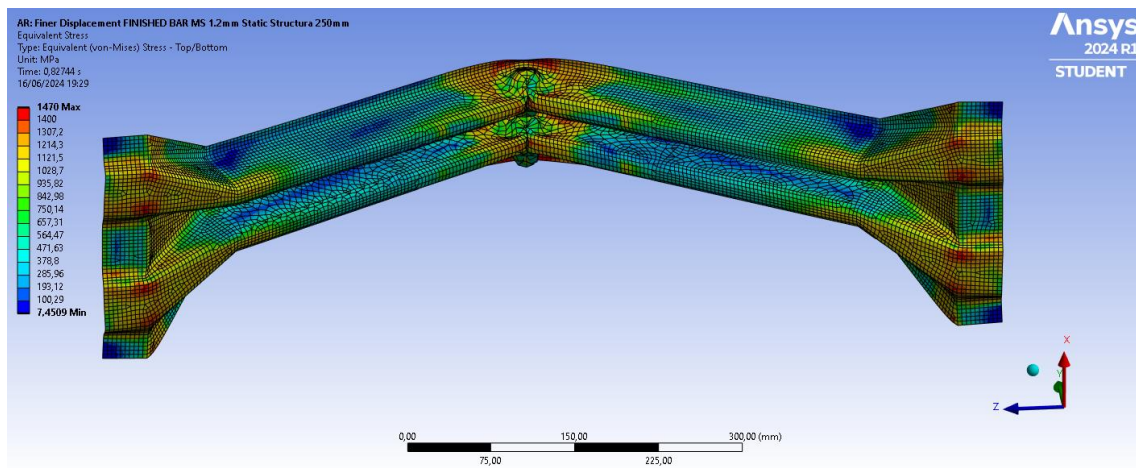


Ilustración 36. Detalle del campo de tensiones sobre la barra diseñada por la parte frontal ocultando el poste de colisión

Como se puede apreciar, la zona más solicitada en el centro de la barra y los apoyos en los extremos de la barra. El hundimiento del poste se puede apreciar en la siguiente imagen:

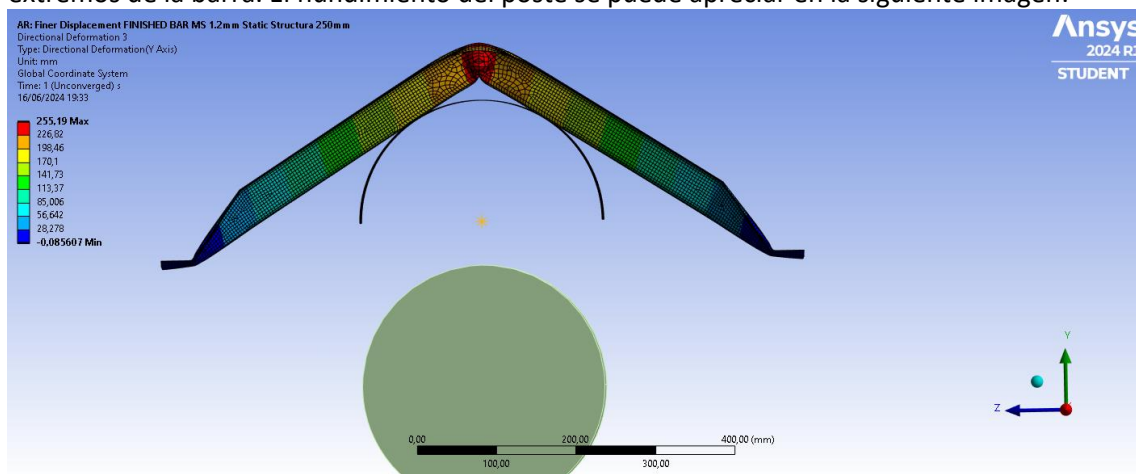


Ilustración 37. Vista superior del desplazamiento de la barra diseñada y el poste de colisión.

Como se puede observar, los apoyos permiten el desplazamiento de la barra en la intrusión, respetando la zona de apoyo que emula a la soldadura a la estructura de la puerta del

vehículo. La zona central se encuentra más desplazada por el colapso central provocado por el pandeo de la sección.

A continuación, se muestran imágenes del factor de seguridad de la barra frente a la sollicitación. Como se puede apreciar, la barra está en una situación de fallo mecánico, con pandeos en la zona central, tal y como se esperaba que sucediera.

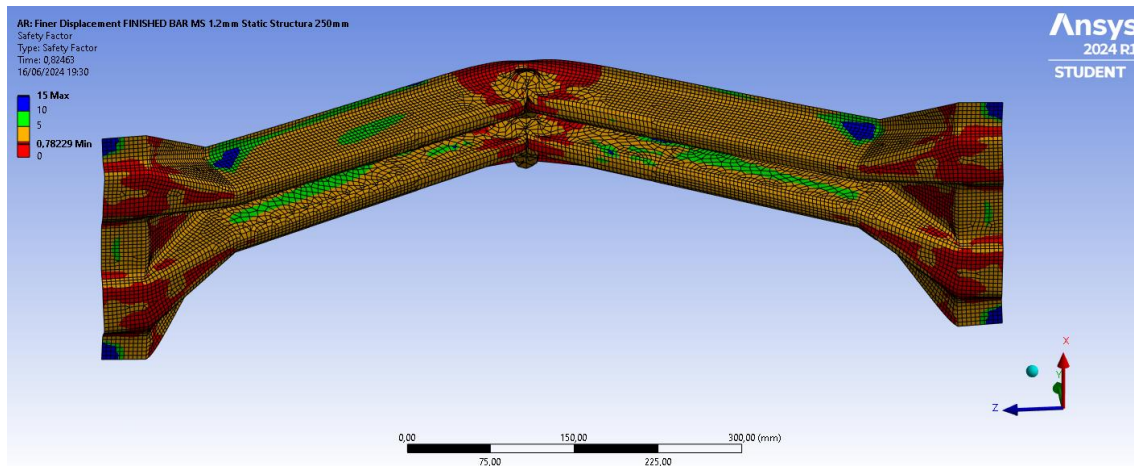


Ilustración 38. Vista frontal del estado de agotamiento por coeficiente de seguridad de la barra diseñada.

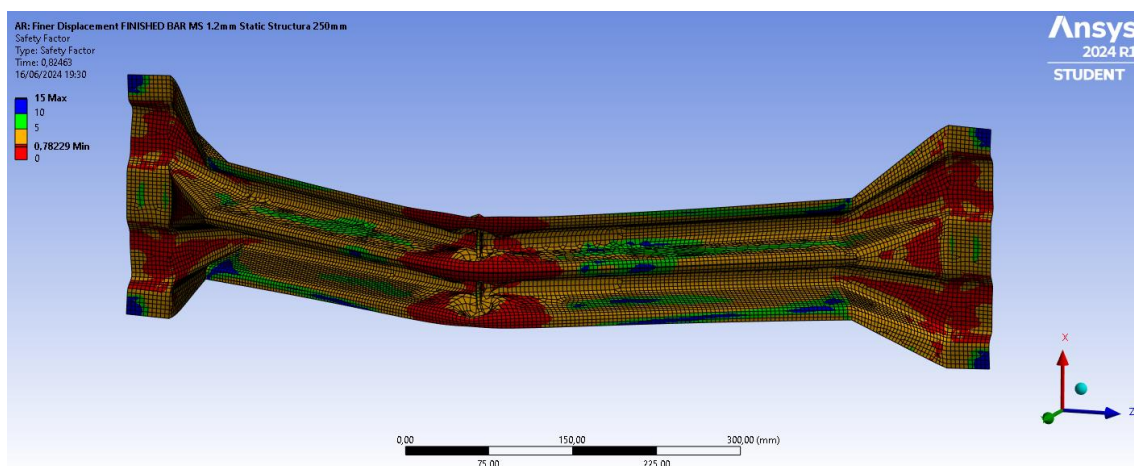


Ilustración 39. Vista posterior del estado de agotamiento por coeficiente de seguridad de la barra diseñada.

La aparición del fallo es múltiple, tanto por agotamiento de material como por pandeo de la sección de la barra. El ala exterior de la sección de la barra está sometido a una tensión fuerte, lo cual junto al estado tensional de la parte central de la barra se deduce que pueda aparecer un fallo y rotura por dicha zona.

La previsión de comienzo de fallo en el ala del perfil se produce a 34,9mm de intrusión del poste de colisión, presentando el siguiente estado tensional en la barra:

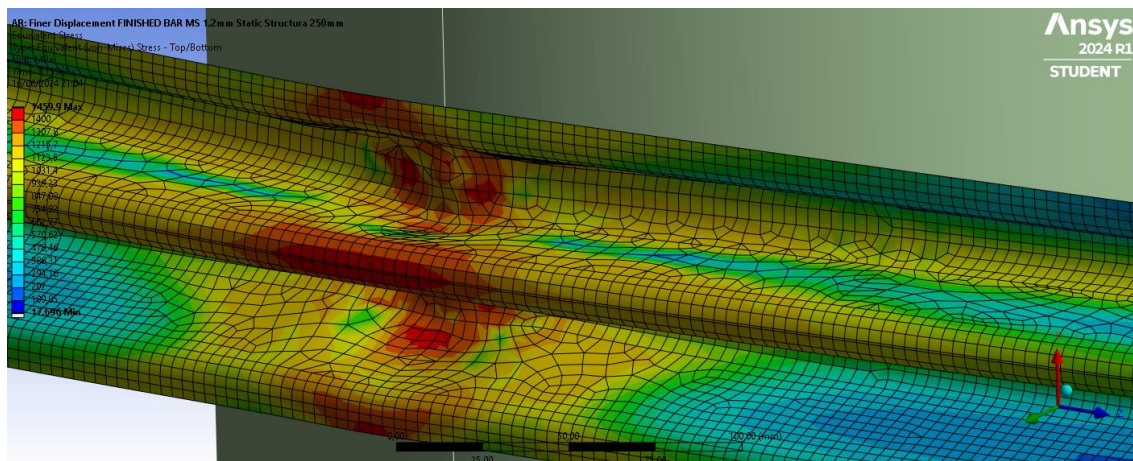


Ilustración 40. Detalle del campo de tensiones en el comienzo del pandeo sobre la barra diseñada.

En este punto de fallo, la fuerza ejercida por el poste es de 22.600N, por lo que está todavía en la zona de mayor fuerza aplicada sobre la barra. La energía absorbida por deformación plástica es de 331,6 J. El colapso por fallo de pandeo de la zona en contacto con el poste comienza poco antes de este punto. La identificación de este nivel es importante de cara a identificar el cumplimiento de los criterios aplicados por la normativa. La fuerza registrada en este punto se toma como valor comparativo porque hasta este momento el comportamiento de la barra está bajo control. A partir de este punto, la barra todavía podrá tener margen de seguir oponiéndose al poste, pero comienza a propagarse el fallo de la barra. La barra continuará absorbiendo energía de deformación plástica, hasta que comiencen a aparecer los agrietamientos en la barra. Dicho punto de evaluación del fallo no se contempla en el alcance de este proyecto, requiriendo de un estudio más complejo, extenso y exhaustivo.

A partir de los resultados obtenidos, se ha elaborado la siguiente tabla resumen con los datos de los indicadores y ratios obtenidos hasta el punto de convergencia que se ha conseguido.

Material	Docol CR1150Y 1400T-MS t=1.2mm
Fuerza máxima registrada en simulación (N)	24908
Promedio fuerza (N)	16806,25
Desplazamiento máximo (mm)	206,16
Tensión Máxima Von Mises de simulación (MPa)	1470
Energía por deformación calculada en deflexión(J)	3078,50835
Energía absorbida por deformación plástica ALLPD (J)	1940,5
Ratio teórico energía / deformación (J/mm)	14,9326171
Ratio simulación energía plástica /deformación (J/mm)	9,41259216
Ratio teórico (J/mm)/alto (mm)	0,14932617
Ratio teórico (J/mm)/ancho (mm)	0,29865234
Ratio teórico (J/mm)/superficie externa (mm^2)	0,00298652
Ratio simulación (J/mm)/alto (mm)	0,09412592
Ratio simulación (J/mm)/ancho (mm)	0,18825184
Ratio simulación (J/mm)/superficie externa (mm^2)	0,00188252
Espesor (mm)	1,2
Peso del perfil (kg)	2,298
SEA ALLPD/Peso perfil (J/kg)	844,4299

Tabla 21. Resumen de características, fuerzas, desplazamiento, energía absorbida y ratios de la barra diseñada.

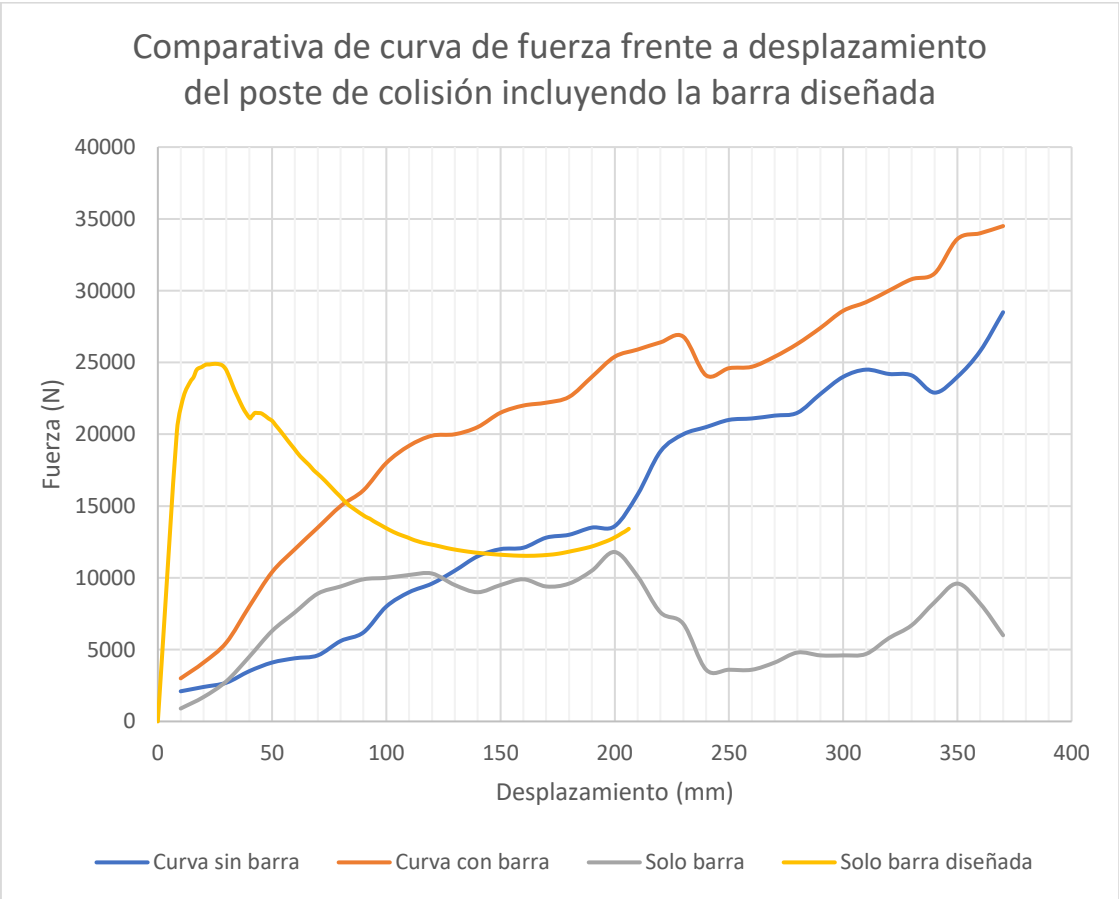
Analizando los resultados de la barra simulada por sí solos y contrastando la información frente a la normativa aplicable en el impacto lateral, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La comparación del valor de fuerza experimentado por la barra frente al poste de colisión con los límites de la normativa no es una correlación directa de cumplimiento. Como ya se ha mencionado anteriormente, hay más elementos que actúan en el choque lateral, por lo que estrictamente la barra no tiene que soportar las cifras de fuerza que dice la normativa. El cumplimiento tiene que ver con el comportamiento completo del vehículo.
- Los valores de fuerza que se han registrado en la simulación son más altos que el primer límite de fuerza impuestos por la normativa, lo cual da margen a un cumplimiento más holgado a falta del resto de elementos que intervienen en el choque lateral.
- Según los resultados registrados y sin tener la deflexión máxima y media, para el caso de la resistencia de impacto inicial se cumple con los requisitos de la normativa. Aunque no se ha alcanzado el valor de la deflexión media, la fuerza alcanzada registrada por la simulación es mayor que el valor impuesto por la normativa, por lo que previsiblemente cumpliría también.

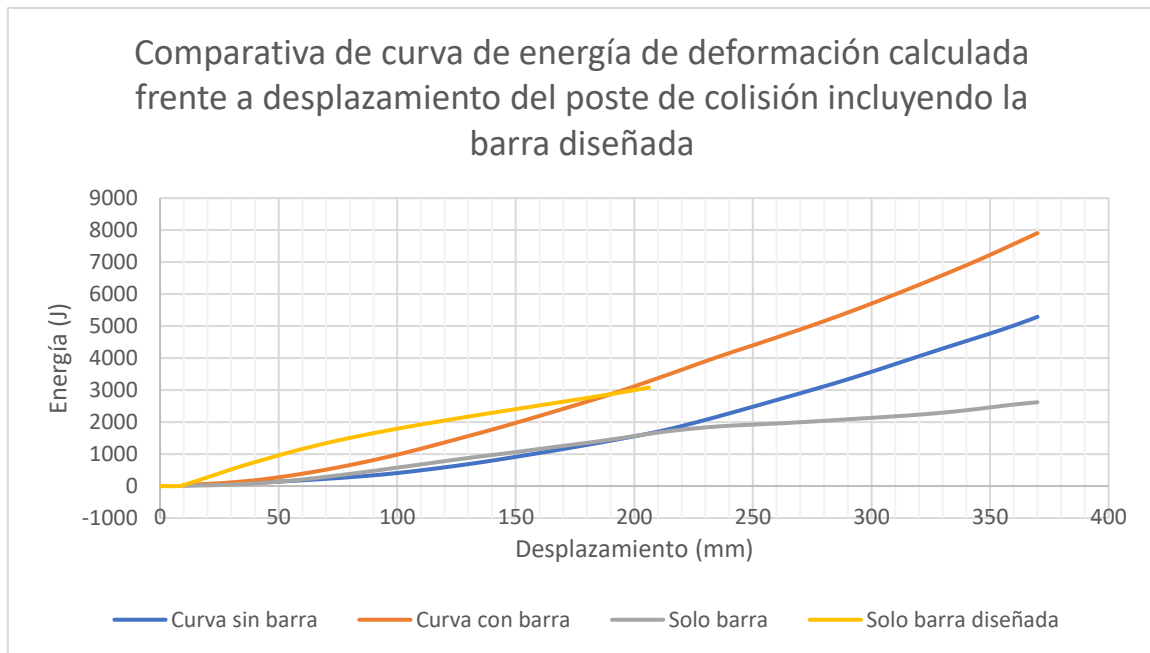
Valores de requisitos por normativa	Deflexión de control impuesta por normativa (in)	Deflexión de control impuesta por normativa (mm)	Fuerza mínima necesaria (lb)	Fuerza mínima necesaria (N)
Resistencia de impacto inicial (RI)	6	152,4	2250	10008,4986
Resistencia de impacto media (RM)	12	304,8	4375	19460,9696
Resistencia de impacto pico (RP)	18	457,2	12000	53378,6594

Tabla 22. Resumen de las fuerzas registradas en colisión lateral requeridas por normativa.

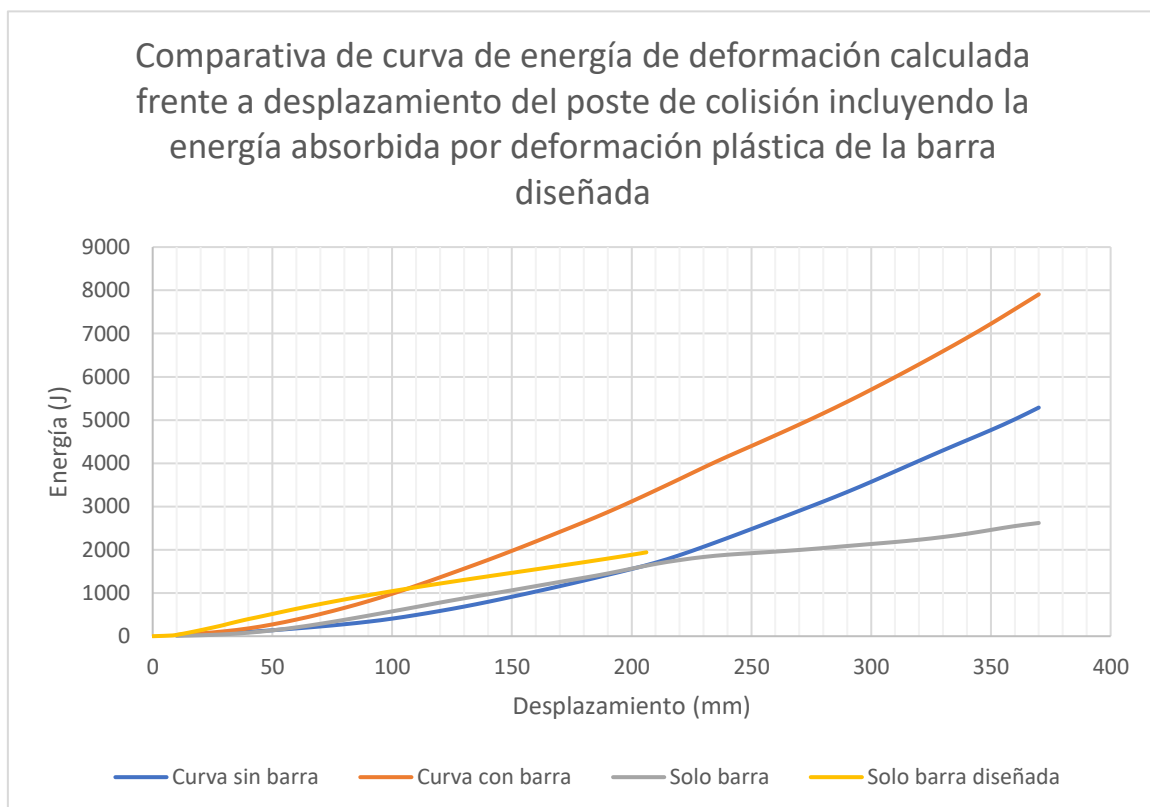
Para comparar el comportamiento entre los datos disponibles de la barra real y la barra diseñada, a continuación se presentan los gráficos comparativos del comportamiento de ambas situaciones:



Gráfica 22. Comparativa de la curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de los resultados experimentales disponibles del Ford Focus 1996 frente a la barra diseñada.



Gráfica 23. Comparativa de la curva de energía absorbida calculada frente a desplazamiento del poste de colisión de los resultados experimentales disponibles del Ford Focus 1996 frente a la barra diseñada.



Gráfica 24. Comparativa de curva de energía de deformación calculada frente a desplazamiento del poste de colisión incluyendo la energía absorbida por deformación plástica de la barra diseñada

Sobre las gráficas expuestas, se puede ver que el comportamiento de la barra diseñada tiene más capacidad de absorber energía y de retener frente al impacto. La gran ventaja no es solamente que soporte más fuerza y absorba más energía, sino la zona en la que ocurre. La barra diseñada entrega su mayor efecto protector en los primeros milímetros del hundimiento del poste, lo cual es un comportamiento deseado y favorable para la protección de los

ocupantes del vehículo. La razón es que si se consigue frenar la intrusión y absorber la mayor cantidad de energía sin que el ocupante del vehículo sea alcanzado, se garantiza una mejor protección frente a accidente.

Para mejorar el comportamiento de la barra, se ha recurrido a una iteración de mejora sobre la sección del perfil. Aplicando una pequeña modificación sobre las alas exteriores del perfil, se pretende mejorar la resistencia de esta zona y dar más margen de seguridad a dicha zona. Los detalles geométricos se pueden encontrar en los anexos (3.1.7. *Geometría de barra diseñada con apoyos y refuerzo*)

La mejora consiste en extender el ala hacia la dirección de colisión, aumentando muy ligeramente el alto del perfil y el peso.

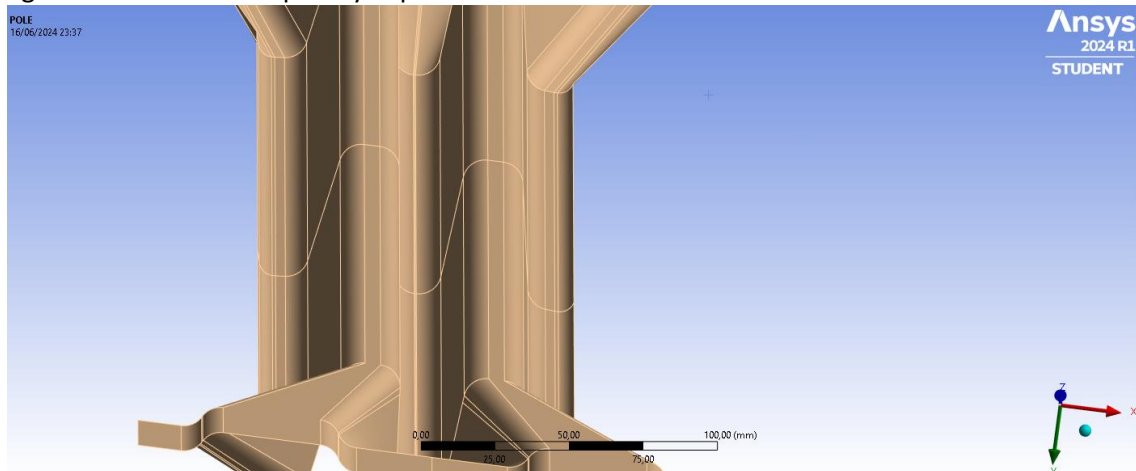
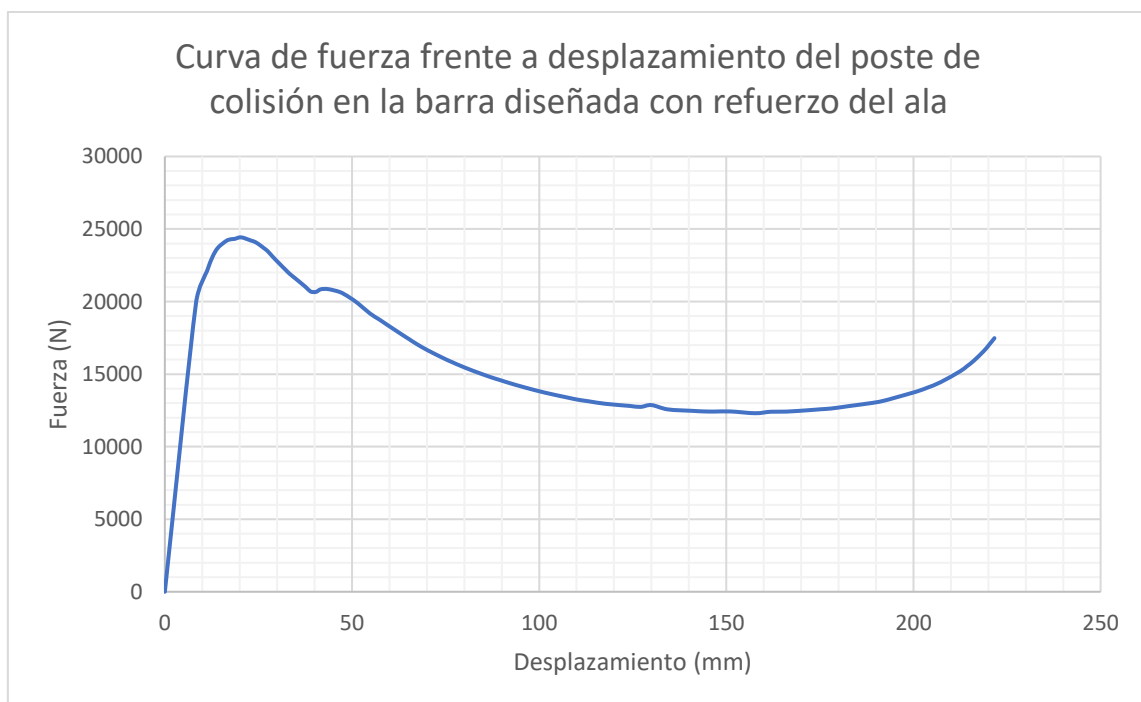
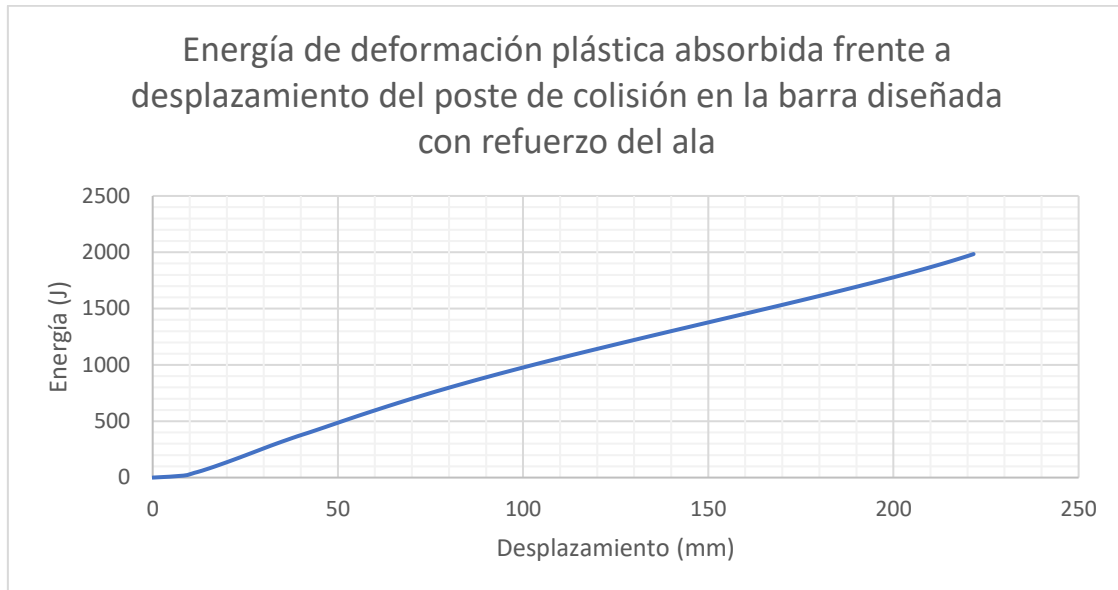


Ilustración 41. Detalle de la modificación de geometría de la sección del perfil, extendiendo el ala verticalmente mediante un pliegue.

Para la modificación de la barra con el refuerzo sobre el ala, se ha repetido el mismo escenario de simulación y los resultados obtenidos son los siguientes (anexos 4.4. *Resultados de la simulación del estudio con la barra diseñada y reforzada*):

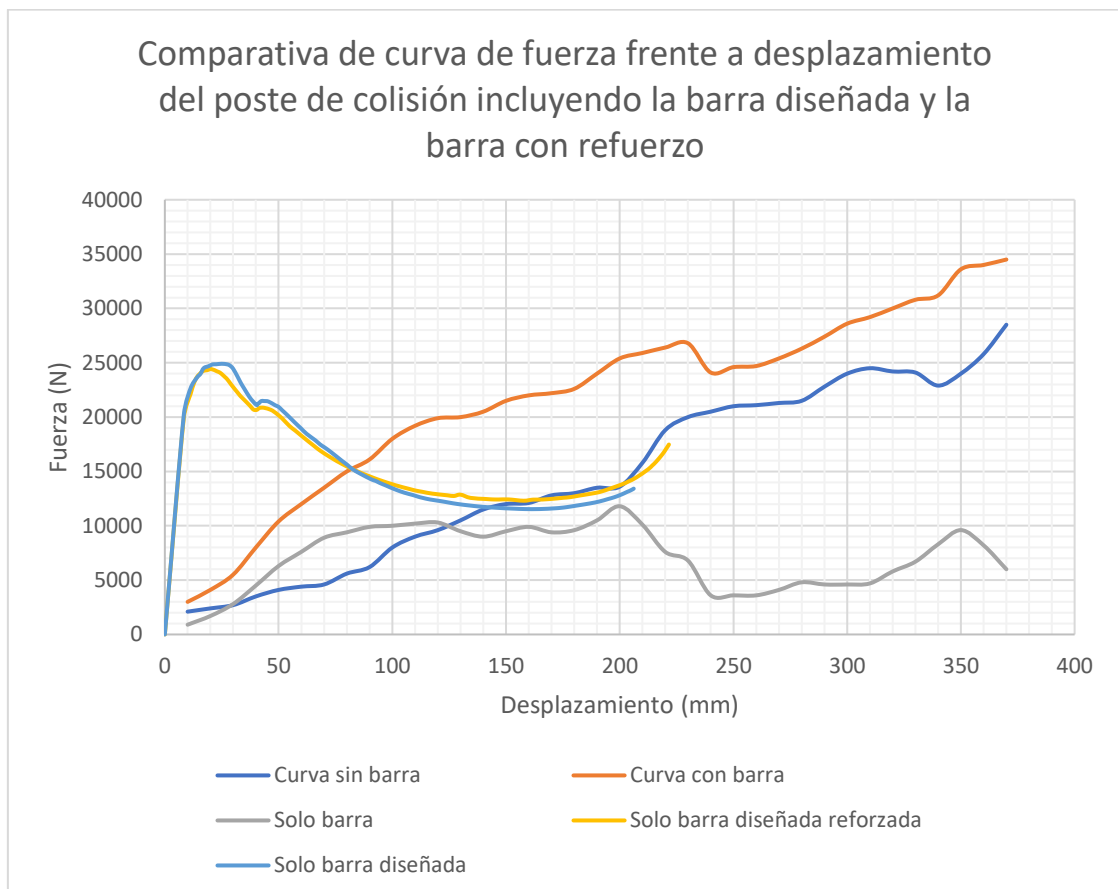


Gráfica 25. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión en la barra diseñada con refuerzo del ala

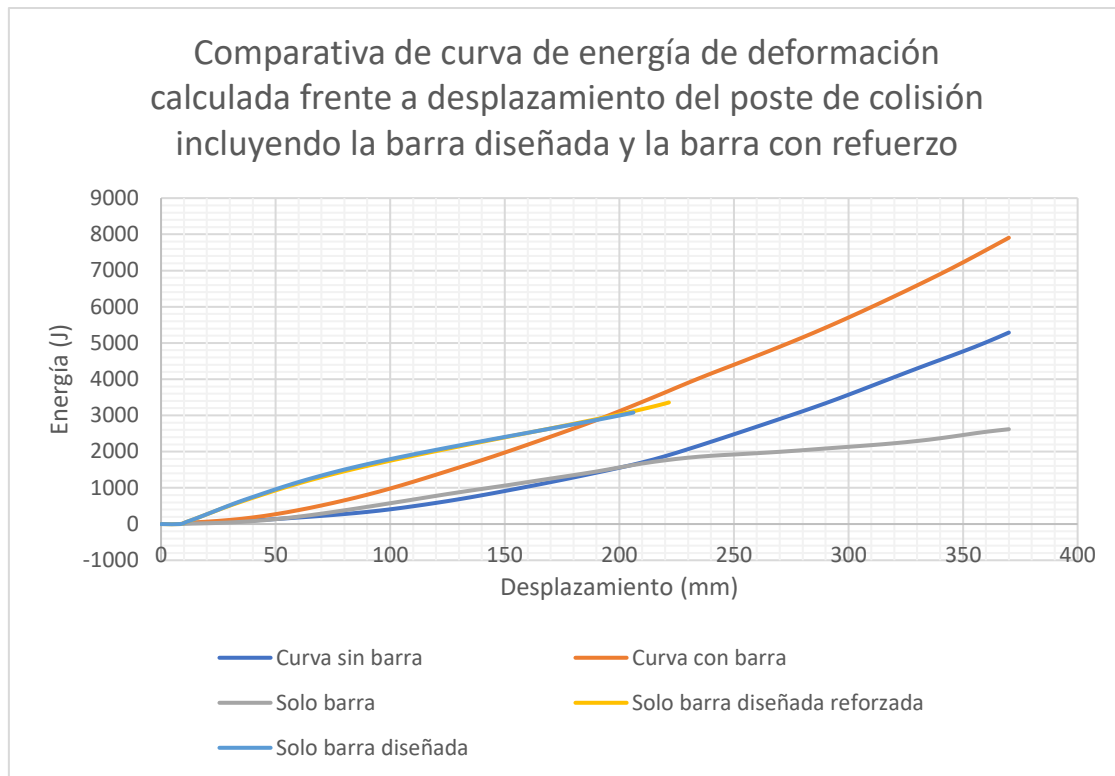


Gráfica 26. Energía de deformación plástica absorbida frente a desplazamiento del poste de colisión en la barra diseñada con refuerzo del ala.

Si se contrastan ambas curvas frente al escenario anterior sin añadir el refuerzo, se puede observar un cambio muy leve en el comportamiento, tal y como se puede apreciar en las gráficas:



Gráfica 27. Comparativa de la curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de los resultados experimentales disponibles del Ford Focus 1996 frente a la barra diseñada, incluyendo la barra con refuerzo.



Gráfica 28. Comparativa de curva de energía de deformación calculada frente a desplazamiento del poste de colisión incluyendo la barra diseñada y la barra con refuerzo

Aparentemente los resultados no sugieren que aporte un cambio significativo sobre el comportamiento de la barra. Sin embargo, si se analiza el punto en el que sucede el fallo del ala, se produce una ganancia de margen en el fallo de la barra. A continuación, se muestra el comienzo de fallo para la barra con el refuerzo en el ala.

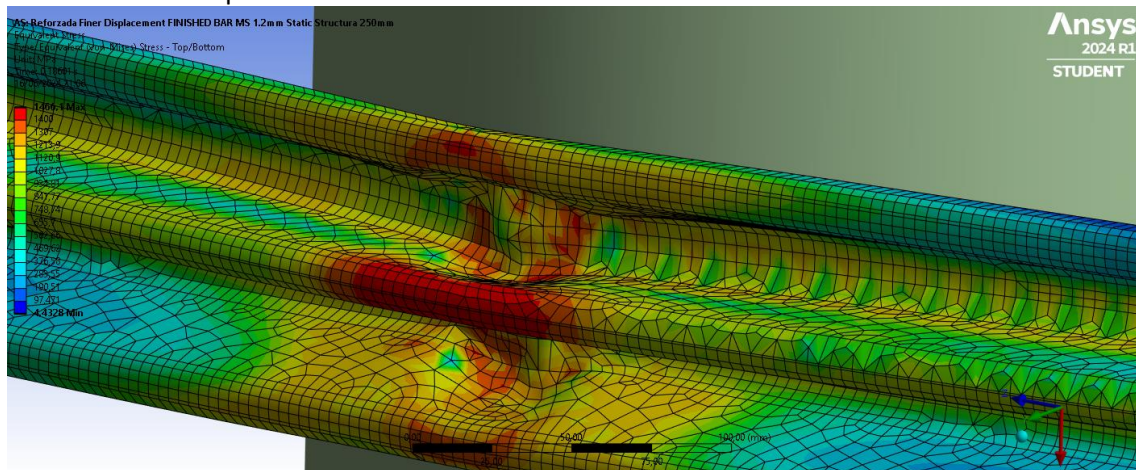


Ilustración 42. Detalle del campo de tensiones en el comienzo del pandeo sobre la barra diseñada con refuerzo.

La diferencia principal es el desplazamiento en el que ha ocurrido este instante, que pasa a ser 46,5mm, con una energía absorbida por deformación plástica de 447,75J. Comparado con el caso anterior, es una mejora del 33% del desplazamiento admisible hasta el comienzo del fallo y un 35% de energía absorbida por deformación plástica garantizados bajo control antes del comienzo del fallo de la barra.

8. Conclusiones

La seguridad en los vehículos es un tema de gran trascendencia que ha ido evolucionando a lo largo de los años. La adopción de nuevos y más avanzados materiales ha permitido mejorar enormemente la seguridad, rendimiento y la tecnología de los vehículos. Las nuevas generaciones de aceros desarrollados han permitido conseguir elementos estructurales más resistentes a la vez que con mejores capacidades de absorción de energía. La implementación de estos materiales en los vehículos comerciales ha permitido una notable evolución en los resultados de seguridad estructural, así como una gran reducción de las muertes por accidentes en carretera.

En este trabajo se ha podido apreciar las tendencias de las tecnologías de materiales actualmente disponibles en lo que se refiere a aceros avanzados. Aunque las normativas no han sufrido grandes cambios en lo que respecta a colisión lateral, los fabricantes apuestan por emplear materiales más avanzados, livianos y seguros para construir sus vehículos. La implementación de estas tecnologías de materiales requiere de conocimiento y estudio de los mismos para sacar el mayor partido en términos de rendimiento y efectividad de costes a la hora de construir los elementos estructurales. En cualquier caso, el esfuerzo de desarrollo e inclusión de estas tecnologías de materiales reporta beneficios directos y amplía las posibilidades de los retos técnicos alcanzables.

Por parte del aprendizaje en este proyecto, se ha realizado una evaluación de diseño y materiales de un problema estructural fuertemente no lineal, entrando en la zona en la que sucede una plastificación, el fallo mecánico por agotamiento y pandeo. Los retos afrontados por estas no linealidades permiten adquirir una base sobre cómo abordar problemas estructurales de este tipo de características.

La continuidad de la evaluación de este tipo de problema se enfoca a entender mejor el comportamiento estructural en el fallo, cuando se comienza a propagar el agrietamiento. Esto supone un siguiente paso a realizar sobre el trabajo realizado. Además de esto, otro siguiente paso es la integración y estudio de la barra como elemento estructural integrado y soportado por la puerta mediante unión por soldadura. Ante la ampliación de alcance y de tiempo requerido para el estudio del comportamiento estructural, se queda como unos pasos futuros a realizar.

Para finalizar, quiero destacar la riqueza de los conocimientos adquiridos por su valor y aplicabilidad a nivel ingenieril. La metodología y conocimientos de materiales y estructural adquirida supone un enriquecimiento de las habilidades para abordar la resolución de un problema de diseño estructural.

9. Referencias

- (202) *Ansys Learning* - YouTube. (n.d.). Retrieved June 25, 2024, from <https://www.youtube.com/@AnsysLearning>
- 571.214 Standard No. 214; Side Impact Protection., Pub. L. No. 49 CFR 571.214.
- Aceropedia. (n.d.). *Acero endurecido al horno BH | Aceropedia Enciclopedia de Acero*. Retrieved February 14, 2024, from <https://aceropedia.com/tipos-de-acero/acero-endurecido-al-horno-bh/>
- Ansys Learning Forum*. (n.d.). Retrieved June 25, 2024, from <https://forum.ansys.com/>
- Arcelor Mittal. (n.d.). *Bake hardening steels*. Retrieved February 14, 2024, from <https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/HYTSS/BH>
- Arcelor Mittal. (n.d.). *IF steels*. Retrieved February 14, 2024, from <https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/HYTSS/IF>
- B. Ramirez. (2012). *Media Launch: 2013 Veloster Turbo*. Hyundai Motor North America Newsroom.
- B. Yan. (2003). *High Strain Rate Behavior of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications* (Great Designs in Steel).
- Billur, E., & WorldAutoSteel. (n.d.-a). *PHS Automotive Applications and Usage - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-hardened-steels/phs-automotive-applications-and-usage/>
- Billur, E., & WorldAutoSteel. (n.d.-b). *PHS Automotive Applications and Usage - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-hardened-steels/phs-automotive-applications-and-usage/>
- Billur, E., & WorldAutoSteel. (n.d.-c). *PHS Production Methods - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-hardened-steels/phs-production-methods/>
- Billur, E., & WorldAutoSteel. (n.d.-d). *PHS Tailored Products - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-hardened-steels/phs-tailored-products/>
- Billur, E., & WorldAutoSteel. (n.d.-e). *PHS Tailored Products - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-hardened-steels/phs-tailored-products/>
- Billur, E., & WorldAutoSteel. (n.d.-f). *PHS Tailored Products - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-hardened-steels/phs-tailored-products/>
- Billur, E., & WorldAutoSteel. (n.d.-g). *Press Hardened Steels - AHSS Guidelines*. Retrieved February 27, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/phs-grades/>
- Billur, E., & WorldAutoSteel. (n.d.-h). *Press Hardened Steels Primer - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-hardened-steels/phs-and-pqs-overview/>
- BUSH GEORGE F. (1975). *Side door intrusion protection* (Patent 3868796).
- Castejón Herrero, L. (n.d.). *COMPORTAMIENTO DE VEHÍCULOS FRENTE A CHOQUE*.
- Centro INOX. (n.d.). *Links | CENTRO INOX*. Retrieved February 14, 2024, from <https://www.centroinox.it/it/links>
- D. Kim. (2015). *Roll Stamping Device* (Patent KR101786260B1). Don-Gun Kim.
- D. Ludlow. (2012, February 23). Ford B-Max preview. *Expert Reviews*.
- EuroNCAP. (n.d.). *VW ID4 en Euro NCAP - EuroNCAP dummy*. Retrieved February 22, 2024, from <https://www.euroncapdummy.com/vw-id4-en-euro-ncap/>
- FMVSS NO. 214 AMENDING SIDE IMPACT DYNAMIC TEST ADDING OBLIQUE POLE TEST, Pub. L. No. FMVSS NO.214 (2007).
- Habibi, N., Beier, T., Richter, H., Könemann, M., & Münstermann, S. (2019). The effects of shear affected zone on edge crack sensitivity in dual-phase steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 651(1), 012073. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/651/1/012073>

- Hance, B., & WorldAutoSteel. (n.d.). *True Fracture Strain - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/formability/true-fracture-strain/>
- Home - Great Designs in Steel. (n.d.). Retrieved February 25, 2024, from <https://greatdesignsinsteel.com/>
- Humanetics. (n.d.-a). *WorldSID-5F | Humanetics*. Retrieved February 22, 2024, from <https://www.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/side-impact/worldsid-5f>
- Humanetics. (n.d.-b). *WorldSID-50M | Humanetics*. Retrieved February 22, 2024, from <https://www.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/side-impact/worldsid-50m>
- I. Han. (2014). 2014 Chevrolet Spark & Spark EV. In *Great Design in Steel*. Great Design in Steel.
- J. Tessmer, T. Domlovil, & C. Hartley. (2016). 2016 Nissan Titan XD. In *Great Designs in Steel, Sponsored by American Iron and Steel Institute*.
- K. Hertell. (2015). Hydroforming Advanced High-Strength Steel And Global Implementation. In *Great Designs in Steel, sponsored by American Iron and Steel Institute*.
- Kim, H., & WorldAutoSteel. (n.d.). *Industry 4.0 and AHSS Applications - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/industry-4-0-and-ahss-applications/industry-4-0-and-ahss-applications/>
- Kloekner Metals. (n.d.). *Acero avanzado y de ultra alta resistencia (AHSS)*. Retrieved February 14, 2024, from <https://www.kloeknermetals.com/es/products/ahss-uhss/>
- LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS 214S (STATIC) Side Impact Protection, Pub. L. No. FMVSS 214S.
- LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS 214S (STATIC) Side Impact Protection, Pub. L. No. TP-214S-05 (1992).
- LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION - Rigid Pole Side Impact Test Requirements, Pub. L. No. FMVSS 214-P (2012).
- LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION - Moving Deformable Barrier Impact Test Requirements APPENDIX B CHECK SHEETS, Pub. L. No. TP-214-D-09 (2012).
- LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION - Moving Deformable Barrier Test Requirements Using Advanced Test Dummies- , Pub. L. No. TP-214D-09 (2012).
- LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION -Rigid Pole Side Impact Test Requirements, Pub. L. No. TP-214P-01 (2021).
- LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION -Rigid Pole Side Impact Test Requirements APPENDIX A DATA SHEETS, Pub. L. No. TP-214P-01 (2012).
- LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION -Rigid Pole Side Impact Test Requirements APPENDIX A DATA SHEETS, Pub. L. No. TP-214P-01 (2012).
- Lagneborg, R. (1991). New steels and steel applications for vehicles. *Materials & Design*, 12(1), 3–14. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(91\)90086-J](https://doi.org/10.1016/0261-3069(91)90086-J)
- Larour, Patrick. (2010). *Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain*. Shaker.
- Louden, A., & Vrtc, N. /. (2009). *Government Industry Meeting Government Industry Background Background*.
- McClure, T., & WorldAutoSteel. (n.d.). *Lubrication - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/tooling/lubrication/>
- Nassiopoulos, E., & Njuguna, J. A. K. (2011). Finite element dynamic simulation of whole rallying car structure: Towards better understanding of structural dynamics during side impact. *8th European LS-DYNA® Users Conference, Strasbourg*.
- NHTSA. (n.d.-a). *NHTSA | National Highway Traffic Safety Administration*. Retrieved February 14, 2024, from <https://www.nhtsa.gov/>

- NHTSA. (n.d.-b). *NHTSA | National Highway Traffic Safety Administration*. Retrieved February 15, 2024, from <https://www.nhtsa.gov/>
- NHTSA. (2016). *VEHICLE INFORMATION / TEST SPECIFICATIONS FMVSS No. 214 MDB & Pole Tests*.
- P. Larour. (2010). *Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain*. IEHK RWTH Aachen University.
- REGLAMENTO (CE) No 661/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de Julio de 2009 Relativo a Los Requisitos de Homologación de Tipo Referentes a La Seguridad General de Los Vehículos de Motor, Sus Remolques y Sistemas, Componentes y Unidades Técnicas Independientes a Ellos Destinados (2009).
- Reglamento n. 29 de La Comisión Económica de Las Naciones Unidas Para Europa (CEPE) — Prescripciones Uniformes Sobre La Homologación de Vehículos En Lo Relativo a La Protección de Los Ocupantes de La Cabina de Un Vehículo Comercial [2019/1850] , Diario Oficial de la Unión Europea (2019).
- Reglamento n. 95 de Las Naciones Unidas — Prescripciones Uniformes Sobre La Homologación de Los Vehículos En Lo Relativo a La Protección de Sus Ocupantes En Caso de Colisión Frontal [2021/1860] (2021).
- Reglamento n 135 de Las Naciones Unidas — Prescripciones Uniformes Sobre La Homologación de Vehículos En Lo Relativo a Su Comportamiento En Caso de Colisión Lateral Contra Un Poste [2020/486] (2020).
- Reichert, R. (n.d.). *Crash Simulation of FMVSS No. 214 Safety Performance*.
- Saab. (n.d.). *Saab 9000 Cross Section*.
- Saraf, S. C., & Bajaj, P. S. (2017). Design & Experimentation of Side Impact Beam for Hyundai Verna. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Schuler, K. H. (n.d.). *HYDROFORMING ADVANCED HIGH-STRENGTH STEEL AND GLOBAL IMPLEMENTATION*.
- SSAB. (n.d.-a). *Aceros de ultra alta resistencia (UHSS) de Docol - SSAB*. Retrieved February 14, 2024, from <https://www.ssab.com/es-es/marcas-y-productos/docol/aceros-de-ultra-alta-resistencia>
- SSAB. (n.d.-b). *AHSS: Advanced High Strength Steel applied on automotion*.
- SSAB. (n.d.-c). *Docol ® press hardening steel*. www.docol.com
- SSAB. (n.d.-d). *Soluciones de mecanizado para aceros avanzados de alta resistencia*. www.docol.com
- Steel grades used in automotive industry - Docol - SSAB*. (n.d.). Retrieved June 25, 2024, from https://www.ssab.com/en/brands-and-products/docol/automotive-steel-grades?_gl=1*68s2vi*_up*MQ..*_ga*MjA4MjA3ODgyMi4xNzE5MjkyNTA0*_ga_P73DB0D2PK*MTcxOTI5MjUwMy4xLjAuMTcxOTI5MjUwMy4wLjAuMzU4NTI3Mzk5*_ga_1SF6K3BNKE*MTcxOTI5MjUwMy4xLjAuMTcxOTI5MjUwMy4wLjAuNDk4MTE4OTIx
- Steel Warehouse. (n.d.). *Hojas y Rollos de Acero de Ultra Alta Resistencia (UHSS) | Steel Warehouse*. Retrieved February 14, 2024, from <https://es.steelwarehouse.com/ultra-high-strength-steel/>
- Strano, M., Villa, A., & Mussi, V. (2013). Design and manufacturing of anti-intrusion bars made of aluminium foam filled tubes. *International Journal of Material Forming*, 6(1), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s12289-011-1063-6>
- T. Coppola, P. Picella, S. Segala, Centro Sviluppo Materiali, R. Migliorini, Acciai Speciali Terni, F. Capelli, & Centro Inox. (n.d.). NUMERICAL BENCHMARK ON MATERIAL PERFORMANCE IN ANTI-INTRUSION BEAMS. *Centro Inox*.
- Teng, T., Chang, K., & Nguyen, T. (2008). *Crashworthiness evaluation of side-door beam of vehicle*. 268–278.
- Uddeholm AB. (2018). *Tooling Solutions For Advanced High Strength Steels*.
- Valladares Hernando, D., Grasa Caldevilla, G., Castejon Herrero, L., & Alba Lopez, J. J. (2018). ASSESSING NEW DESIGNS OF SIDE PROTECTION BEAM IN PASSENGER CARS BY MEANS OF THE F.E.M. *22nd International Congress on Project Management and Engineering, Madrid*.
- WorldAutoSteel. (n.d.-a). *3rd Generation Steels - AHSS Guidelines*. Retrieved February 27, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rd-generation-steels/>

- WorldAutoSteel. (n.d.-b). *Bake Hardenable - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/bake-hardenable-steel/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-c). *Bend Testing - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/bend-testing/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-d). *Bulge and Dome Testing - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/bulge-and-dome-testing/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-e). *Carbon-Manganese (CMn) - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/carbon-manganese-cmn/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-f). *Coating Friction - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/coatings/coating-friction/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-g). *Coatings - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/coatings/coatings/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-h). *Coil Processing: Straightening and Leveling - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/coil-processing/coil-processing-straightening-and-leveling/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-i). *Complex Phase - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/complex-phase-steel/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-j). *Complex Phase - AHSS Guidelines*. Retrieved February 27, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/complex-phase-steel/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-k). *Correcting Springback - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/springback/correcting-springback/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-l). *Crash Management - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/structural-performance/crash-management/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-m). *Defining Steels - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/defining-steels/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-n). *Delayed Cracking (Hydrogen Embrittlement) - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/delayed-cracking/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-o). *Dual Phase - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/dual-phase/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-p). *Elastic Modulus - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/elastic-modulus/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-q). *Engineering Stress-Strain vs. True Stress-Strain - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/formability/engineering-stress-strain-true-stress-strain/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-r). *Fatigue - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/structural-performance/fatigue/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-s). *Ferrite-Bainite - AHSS Guidelines*. Retrieved February 27, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ferrite-bainite-steel/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-t). *Formability - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/formability/formability/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-u). *Forming Limit Curves (FLC) - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/formability/forming-limit-curves-flc/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-v). *Forming Modes - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/forming-modes/forming-modes/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-w). *Friction and Friction Testing - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/friction-and-friction-testing/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-x). *Global vs Local Formability - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/formability/global-vs-local-formability/>

- WorldAutoSteel. (n.d.-y). *High Strength Low Alloy Steel - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/high-strength-low-alloy-steel/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-z). *Hole Expansion Testing - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/hole-expansion-testing/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-aa). *Home - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ab). *Hydroforming - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/hydroforming/hydroforming/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ac). *IF-Rephos Archives - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/tag/if-rephos/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ad). *Interstitial-Free High Strength - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/interstitial-free-high-strength/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ae). *Laser Blanking - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/cutting-blanking-shearing-trimming/laser-blanking/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-af). *Martensite - AHSS Guidelines*. Retrieved February 27, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/1stgen-ahss/martensite/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ag). *Mechanical Properties - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/mechanical-properties/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ah). *Microstructural Components - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/microstructural-components/microstructural-components/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ai). *Mild Steels - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/lower-strength-steels/mild-steels/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-aj). *M-Value - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/strain-rate/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ak). *M-Value - AHSS Guidelines*. Retrieved February 27, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/strain-rate/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-al). *Necking - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/necking/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-am). *PHS Simulation - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-hardened-steels/phs-simulation/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-an). *Press Requirements - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-requirements/press-requirements-ph/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ao). *Press Tonnage Predictions - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/press-requirements/press-tonnage-predictions/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ap). *Roll Forming - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/roll-forming/roll-forming/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-aq). *R-Value - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/r-value/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ar). *R-Value - AHSS Guidelines*. Retrieved February 27, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/r-value/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-as). *Shear Affected Zone - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/cutting/shear-affected-zone/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-at). *Shear Fracture - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/formability/shear-fracture/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-au). *Simulation Inputs - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/simulation/simulation-inputs/>

- WorldAutoSteel. (n.d.-av). *Simulation Overview - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/simulation/simulation-overview/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-aw). *Springback - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/springback/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ax). *Structural Performance - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/structural-performance/structural-performance/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ay). *Tailored Products - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/tailored-products/tailored-products/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-az). *Tailored Products - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/tailored-products/tailored-products/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-ba). *Tensile Strength - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/tensile-strength/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bb). *Tensile Testing - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/tensile-testing/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bc). *Testing & Characterization - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/testing-and-characterization/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bd). *Tooling and Die Wear - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/tooling/tooling-and-die-wear/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-be). *Total Elongation - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/total-elongation-2/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bf). *Transformation Induced Plasticity (TRIP) - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rdgen-ahss/transformation-induced-plasticity-trip/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bg). *Tube Forming - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/tube-forming/tube-forming/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bh). *Twinning Induced Plasticity - AHSS Guidelines*. Retrieved February 27, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/twinning-induced-plasticity/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bi). *Ultra-Low Carbon (DDS – EDDS) - AHSS Guidelines*. Retrieved February 26, 2024, from <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/lower-strength-steels/ultra-low-carbon-dds-edds-2/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bj). *Uniform Elongation - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/uniform-elongation/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bk). *Uniform Elongation - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/uniform-elongation/>
- WorldAutoSteel. (n.d.-bl). *Yield Strength - AHSS Guidelines*. WorldAutoSteel. Retrieved February 12, 2024, from <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/yield-strength-3/>
- Yan, B. (2003). *Fatigue Behavior of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications*.
- Yazici, M., Karen, İ., Türkoğlu, İ. K., Özer, H., Güçlü, H., Somyak, C., & Torçuk, C. (2015, February). *Investigation of the Polymer Composite Side Door Anti-intrusion Bar for a Light Commercial Vehicle*.

10. Índices

10.1. Figuras

Figura 1. Diagrama de las fases del proyecto..... 26

Figura 2. Esquema de comportamiento mecánico de la barra de protección lateral con
indicadores extraídos de la curva fuerza frente a desplazamiento. 34

Figura 3. Esquema de aplicación de desplazamiento impuesto 55

10.2. Gráficas

Gráfica 1. Curva modelo de carga-desplazamiento en colisión estática. (LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS 214S (STATIC) Side Impact Protection, n.d.)	10
Gráfica 2. Curva de ensayo de colisión lateral contrastando el efecto con y sin barra de protección lateral en un Ford Focus del año 1996.(Castejón Herrer, n.d.)	29
Gráfica 3. Desglose de curva de fuerza frente a desplazamiento en colisión lateral de Ford Focus 1996 desglosando el comportamiento aportado por la barra de protección lateral	29
Gráfica 4. Desglose de curva de energía total calculado absorbida frente a desplazamiento en colisión lateral de Ford Focus 1996 desglosando el comportamiento aportado por la barra de protección lateral	30
Gráfica 5. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión para las distintas geometrías de barras ensayadas en condición biempotrada.	31
Gráfica 6. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión para las distintas geometrías de barras ensayadas en condición biapoyada.	32
Gráfica 7. Curva de energía absorbida por deformación plástica frente al desplazamiento del poste de colisión en barras de protección según geometría de barra en caso biempotrado.	32
Gráfica 8. Curva de energía absorbida por deformación plástica frente al desplazamiento del poste de colisión en barras de protección según geometría de barra en caso biapoyado.	33
Gráfica 9. Curva de fuerza frente a desplazamiento el poste de colisión de barras de protección en 0,5mm espesor.....	47
Gráfica 10. Curva de fuerza frente al desplazamiento del poste de colisión de barras de protección en 0,8mm espesor.	48
Gráfica 11. Curva de fuerza frente al desplazamiento del poste de colisión de barras de protección en 1mm espesor.	48
Gráfica 12. Curva de fuerza frente al desplazamiento del poste de colisión de barras de protección en 1,2mm espesor.	49
Gráfica 13. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de barras de protección acero martensítico.	49
Gráfica 14. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de barras de protección acero de Fase Compleja	50
Gráfica 15. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de barras de protección acero de Fase Dual	50
Gráfica 16. Desplazamientos del poste de colisión para provocar el primer modo de fallo de pandeo.	58
Gráfica 17. Fuerza mínima del poste de colisión para provocar el primer modo de fallo de pandeo.	58
Gráfica 18. Energía de deformación plástica absorbida hasta la aparición del primer modo de fallo de pandeo.	59
Gráfica 19. Desplazamiento impuesto del poste de colisión que provoca los primeros 25 modos de fallo de pandeo.	59
Gráfica 20. Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de la barra diseñada	63
Gráfica 21. Curva de energía absorbida por deformación plástica frente a desplazamiento del poste de colisión de la barra diseñada.....	63
Gráfica 22. Comparativa de la curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de los resultados experimentales disponibles del Ford Focus 1996 frente a la barra diseñada.	68
Gráfica 23. Comparativa de la curva de energía absorbida calculada frente a desplazamiento del poste de colisión de los resultados experimentales disponibles del Ford Focus 1996 frente a la barra diseñada.....	69

Gráfica 24.Comparativa de curva de energía de deformación calculada frente a desplazamiento del poste de colisión incluyendo la energía absorbida por deformación plástica de la barra diseñada	69
Gráfica 25.Curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión en la barra diseñada con refuerzo del ala.....	70
Gráfica 26.Energía de deformación plástica absorbida frente a desplazamiento del poste de colisión en la barra diseñada con refuerzo del ala.....	71
Gráfica 27.Comparativa de la curva de fuerza frente a desplazamiento del poste de colisión de los resultados experimentales disponibles del Ford Focus 1996 frente a la barra diseñada, incluyendo la barra con refuerzo.	71
Gráfica 28.Comparativa de curva de energía de deformación calculada frente a desplazamiento del poste de colisión incluyendo la barra diseñada y la barra con refuerzo.....	72

10.3. Ilustraciones

Ilustración 1. Colisión lateral de un automóvil VW ID4. (EuroNCAP, n.d.)	4
Ilustración 2. Detalle descriptivo de un dummy para ensayos de colisión. (571.214 Standard No. 214; Side Impact Protection, n.d.)	6
Ilustración 3. Pintura sobre las superficies de dummies para detectar contacto. (LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION -Moving Deformable Barrier Impact Test Requirements APPENDIX B CHECK SHEETS, 2012)	7
Ilustración 4. Dummy para colisión lateral WorldSID-50M. (Humanetics, n.d.-b)	7
Ilustración 5. Dummy para colisión lateral WorldSID-5F. (Humanetics, n.d.-a)	8
Ilustración 6. Esquema de colisión lateral contra Barrera Móvil Deformable. (LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION -Moving Deformable Barrier Test Requirements Using Advanced Test Dummies- , 2012)	8
Ilustración 7. Esquema de colisión lateral contra Barra Rígida. (LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION - Rigid Pole Side Impact Test Requirements, 2012)	9
Ilustración 8. Esquema de colisión lateral estática contra puerta. (LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS 214S (STATIC) Side Impact Protection, n.d.)	9
Ilustración 9. Esquema de los tipos de ensayos de colisión lateral FMVSS 214 con vehículos reales. (Reichert, n.d.)	11
Ilustración 10. Área afectada en los ensayos de colisión lateral de FMVSS 214. (Reichert, n.d.)	11
Ilustración 11. Saab 9000 comercializado entre 1984 y 1988 con detalle de la barra de protección lateral instalada. (Billur & WorldAutoSteel, n.d.) (Saab, n.d.) (Lagneborg, 1991)	12
Ilustración 12. Esquema del modelo de comportamiento mecánico de una barra de protección lateral con los elementos alrededor de ella. (T. Coppola et al., n.d.)	12
Ilustración 13. Ensayo de carga de 3 puntos sobre barra. (Strano et al., 2013)	13
Ilustración 14. Integración de la barra de protección lateral en la estructura del vehículo Hyundai Azera. (WorldAutoSteel, n.d.-f) (Saraf & Bajaj, 2017)	14
Ilustración 15. Barra de protección lateral fabricada por laminado y estampado. (D. Kim, 2015)	16
Ilustración 16. Ejemplo de barra hidroconformada en un Nissan Titan XD. (WorldAutoSteel, n.d.-d) (J. Tessmer et al., 2016)	17
Ilustración 17. Evolución de la forma de un tubo hidroconformado desde su material de partida para vigas del techo en DP 800/1000. (WorldAutoSteel, n.d.-d) (K. Hertell, 2015)	17
Ilustración 18. Ejemplo de barra de protección de acero inoxidable rellena con una espuma de aluminio. (Strano et al., 2013)	17
Ilustración 19. Barra de protección lateral combinada con composite en forma de espuma patentada por Ford en 1975. (BUSH GEORGE F, 1975)	18
Ilustración 20. Ejemplo de uso de diferentes aceros dentro del mismo vehículo. Acero estampado PHS empleado en las barras de protección lateral del Hyundai Veloster (A) y Ford B-Max (B), así como en otros elementos estructurales del vehículo. (Billur & WorldAutoSteel, n.d.) (B. Ramirez, 2012) (D. Ludlow, 2012)	19
Ilustración 21. Ejemplo de uso de diferentes tipos de acero dentro de un vehículo. Comparación de porcentaje en peso de la arquitectura de un Chevrolet Spark. (Billur & WorldAutoSteel, n.d.) (I. Han, 2014)	20
Ilustración 22. Diagrama de conformabilidad global mediante curva de tensión-deformación de diferentes aceros disponibles en la actualidad y nuevos materiales emergentes. (WorldAutoSteel, n.d.-b)	20
Ilustración 23. Ejemplo de fallo de material con fractura por insuficiente conformabilidad local. (WorldAutoSteel, n.d.-c) (Habibi et al., 2019)	23

Ilustración 24. Fallos comunes en elementos de matricería y estampación de aceros.(WorldAutoSteel, n.d.-e)(Uddeholm AB, 2018).....	23
Ilustración 25. Esquema del fenómeno "springback" sobre el cambio de geometría en el conformado de acero.(WorldAutoSteel, n.d.-a)	24
Ilustración 26. Ejemplo de barra modelada en 3D para el estudio de geometría. Ejemplo tomado de la barra 5 "tipo C".	28
Ilustración 27. Ejemplo de resultados de simulación en el estudio de la geometría de barras de protección lateral. Ilustración de una representación del campo de desplazamientos en la dirección de avance del poste de colisión sobre la barra 4 de "tipo épsilon".	31
Ilustración 28. Geometría primitiva de la barra de protección lateral "tipo M" escogida como mejor geometría del estudio.....	38
Ilustración 29. Ejemplo de aparición de primeros fallos por pandeo en la barra sobre la zona en contacto con el poste y el ala del perfil.	56
Ilustración 30. Ejemplo de modo de fallo de pandeo sobre los hombros del perfil de la barra.	56
Ilustración 31. Ejemplo de aparición de pandeo sobre los tabiques de la sección de la barra.	56
Ilustración 32. Ejemplo de aparición de pandeo sobre los tabiques de la sección de la barra, con magnificación del desplazamiento de las alas exteriores.	57
Ilustración 33. Ejemplo de aparición de pandeo en los tabiques de la sección del perfil, propagando el fallo con múltiples focos de pandeo sucesivos que se extienden hacia los extremos.	57
Ilustración 34. Barra de sección 2 "tipo M" diseñada con apoyos de 1.2mm de espesor en acero martensítico Docol CR1150Y 1400T-MS.....	61
Ilustración 35. Detalle del campo de tensiones sobre la barra diseñada al hundir el poste de colisión.	64
Ilustración 36. Detalle del campo de tensiones sobre la barra diseñada por la parte frontal ocultando el poste de colisión	64
Ilustración 37. Vista superior del desplazamiento de la barra diseñada y el poste de colisión.	64
Ilustración 38. Vista frontal del estado de agotamiento por coeficiente de seguridad de la barra diseñada.	65
Ilustración 39. Vista posterior del estado de agotamiento por coeficiente de seguridad de la barra diseñada.....	65
Ilustración 40. Detalle del campo de tensiones en el comienzo del pandeo sobre la barra diseñada.	66
Ilustración 41. Detalle de la modificación de geometría de la sección del perfil, extendiendo el ala verticalmente mediante un pliegue.	70
Ilustración 42. Detalle del campo de tensiones en el comienzo del pandeo sobre la barra diseñada con refuerzo.....	72

10.4. Tablas

Tabla 1. Designación de aceros junto con sus abreviaturas.(WorldAutoSteel, n.d.-b).....	21
Tabla 2. Recopilación de varios grados de aceros comercialmente disponibles para su uso. De manera general y exceptuando a los aceros PHS y PQS, la nomenclatura indica el valor mínimo de límite elástico, el valor mínimo de resistencia a la tracción. “EL” indica la elongación mínima que se obtiene al someter a resistencia a la tracción. “TS” indica el valor de resistencia a la tracción que alcanza el acero.(WorldAutoSteel, n.d.-b)	22
Tabla 3. Selección de geometrías de barras de protección para el estudio	27
Tabla 4. Características físicas de los diseños de secciones de barras de protección lateral	28
Tabla 5.Indicadores de fuerza, desplazamiento y rigidez según tipología de barra en caso biempotrado	35
Tabla 6.Indicadores de fuerza, desplazamiento y rigidez según tipología de barra en caso biapoyado.....	35
Tabla 7. Indicadores de rendimiento de absorción energético según geometría en caso biapoyado.....	36
Tabla 8.Indicadores de rendimiento de absorción energético según geometría en caso biempotrado	36
Tabla 9. Resultados de SEA en el estudio de geometrías de barras de protección lateral	36
Tabla 10. Indicadores elaborados de ratios de energía absorbida en función de las características geométricas de las barras para caso biapoyado	37
Tabla 11. Listado de materiales considerados para preselección con sus características.....	41
Tabla 12. Ponderadores generados para evaluar los materiales a seleccionar.	41
Tabla 13. Puntuaciones de aceros martensíticos evaluados.....	43
Tabla 14. Puntuaciones de aceros de Fase Dual evaluados	44
Tabla 15. Puntuaciones de aceros de Fase Compleja evaluados	45
Tabla 16. Materiales y espesores elegidos para realizar el estudio de simulación.....	46
Tabla 17.Valores obtenidos de fuerzas, desplazamientos y pesos según el material y espesor en el estudio de simulación.....	51
Tabla 18. Energía absorbida y ratios de absorción en función del material y espesor obtenidos en la simulación.....	52
Tabla 19.Resultados de SEA en el estudio de geometrías de barras de protección según estudio de material y espesor	53
Tabla 20. Ratios de energía absorbida asociada a las dimensiones según espesor y material obtenidos a partir de la simulación.....	54
Tabla 21. Resumen de características, fuerzas, desplazamiento, energía absorbida y ratios de la barra diseñada.....	67
Tabla 22. Resumen de las fuerzas registradas en colisión lateral requeridas por normativa.....	68