

Trabajo Fin de Grado

Optimización de la línea de vida de un vehículo
semirremolque cisterna

Optimization of the lifeline of a semi-trailer vehicle
tanker

Autor/es

Laura García Fernández

Director/es

Luis Castejón Herrer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Año 2019-202

RESUMEN

En este proyecto se va a llevar a cabo un estudio de optimización de una serie de parámetros geométricos de la línea de vida de un vehículo semirremolque cisterna a partir de un modelo inicial con el objetivo de obtener la configuración adecuada a las necesidades funcionales que se le requieren.

Para ello, se estudiarán las tensiones y deformaciones presentes en cada uno de los diferentes casos, aceptando los modelos en los que las tensiones y deformaciones se encuentren dentro de los valores de las propiedades mecánicas del material de fabricación, tratándose de aluminio extruido 6005A-T6.

Tanto el perfil como la pieza que desliza en él, denominada corredera, estarán ambas construidas en dicho material y fabricadas a través del proceso de extrusión.

Se utilizarán programas basados en el Método de Elementos Finitos con integración explícita. Para realizar las modificaciones en el diseño se utilizará el software Patran, y para efectuar los cálculos y mostrar los resultados obtenidos el programa Abaqus Explicit.

Habrán dos casos de carga para cada modelo, el primero será una posible caída hacia el lateral opuesto del vehículo a la línea de vida y el segundo caso, hacia el mismo lateral del vehículo.

PALABRAS CLAVE

Semirremolque, optimización, aluminio extruido, seguridad.

ABSTRACT

In this project, a study of optimization of a series of geometric parameters of the lifeline of a tanker semi-trailer vehicle initial model will be carried out with the objective of obtaining a configuration adapted to the functional needs require.

For this, the stresses and deformations present in each of the different cases will be studied, accepting the models in which the stresses and deformations are within the values of the mechanical properties of the manufacturing material, in the case of extruded aluminum 6005A-T6.

Both the profile and the piece that slides in it, called a slide, will be constructed in said material and manufactured through the extrusion process.

Programs based on the Finite Element Method with explicit integration will be used. The Patran software will be used, to make the design changes, and the Abaqus Explicit program to perform the calculations and show the results obtained.

There will be two load cases for each model, the first one will be a possible fall towards the side opposite the vehicle to the lifeline and the second case, towards the same side of the vehicle.

KEYWORDS

Semitrailer, optimization, extruded aluminum, safety.

ÍNDICE

1. Introducción	6
1.1 Objetivo	6
1.2 Análisis del proyecto	6
2. Material.....	8
2.1 Extrusión del aluminio.....	8
2.2 Tipos de extrusión	9
2.3 Equipos de extrusión	11
2.4 Proceso de extrusión en caliente	12
3. Descripción del modelo.....	13
4. Mallado por elementos finitos	15
4.1 Tipos de elementos	15
4.2 Condiciones de contorno.....	18
4.3 Cargas aplicadas.....	21
5. Programas utilizados	22
6. Casos de carga con distinta geometría.....	23
6.1 Variaciones en el modelo inicial	23
6.2 Cálculos y análisis de los resultados	25
6.3 Gráficas	30
6.4 Fallos en el modelo.....	30
7. Conclusión	32
8. Bibliografía	33
Anexo 1: Tensión de Von Mises	34
Anexo 2: Deformación plástica	52
Anexo 3: Aplicación límite elástico.....	57
Anexo 4: Desplazamiento resultante	74
Anexo 5: Gráficas	91
Anexo 5.1 Energía plástica (J).....	91
Anexo 5.2 Gráficas presión de contacto (GPa)	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Vehículo semirremolque cisterna.....	6
Ilustración 2. Perfiles de aluminio extruido.....	9
Ilustración 3. Método extrusión directa.....	9
Ilustración 4. Método extrusión hidrostática.....	10
Ilustración 5. Método extrusión indirecta.....	10
Ilustración 6. Prensa de extrusión hidráulica horizontal.....	11
Ilustración 7. Prensa de extrusión hidráulica vertical.....	12
Ilustración 8. Línea de vida modelo final vista perfil.....	13
Ilustración 9. Línea de vida modelo final vista alzado.....	13
Ilustración 10. Corredera modelo final vista desde diferentes perspectivas.....	13
Ilustración 11. Perfil modelo final visto desde diferentes perspectivas.....	14
Ilustración 12. Ejemplo línea de vida rígida horizontal con carro.....	14
Ilustración 13. Corredera con elementos C3D8R distorsionados.....	15
Ilustración 14. Corredera con su correspondiente mallado.....	16
Ilustración 14. Perfil con su correspondiente mallado.....	16
Ilustración 16. Encaje de la corredera en el perfil con su correspondiente mallado.....	16
Ilustración 17. Elemento tipo C3D8R.....	17
Ilustración 18. Elemento tipo C3D6.....	17
Ilustración 19. Elemento tipo S4R.....	18
Ilustración 20. Elemento tipo STRI3.....	18
Ilustración 21. Condición de contorno. Soldadura.....	19
Ilustración 22. Condición de contorno. Simetría perfil.....	19
Ilustración 23. Condición de contorno. Simetría corredera.....	20
Ilustración 24. Condición de contorno. Desplazamiento perfil.....	20
Ilustración 25. Carga aplicada caída lateral opuesto.....	21
Ilustración 26. Carga aplicada mismo lateral.....	21
Ilustración 27. Corredera inicial (izquierda). Corredera inicial en corte bisel (derecha).....	23
Ilustración 28. Corredera inicial (izquierda). Corredera sección alargada (derecha).....	24
Ilustración 29. Perfil original.....	24
Ilustración 30. Perfil de espesor modificado.....	24
Ilustración 31. Resultados modelo inicial y modelo final.....	29
Ilustración 32. Modo de fallo rotura de la corredera.....	30
Ilustración 33. Modo de fallo rasgado zona del agujero.....	31
Ilustración 34. Modo de fallo apertura del perfil.....	31
Ilustración A1. Tensión Von Mises en el modelo 1.....	36
Ilustración A2. Tensión Von Mises en el modelo 2.....	38
Ilustración A3. Tensión Von Mises en el modelo 3.....	40
Ilustración A4. Tensión Von Mises en el modelo 4.....	42
Ilustración A5. Tensión Von Mises en el modelo 5.....	44
Ilustración A6. Tensión Von Mises en el modelo 6.....	46
Ilustración A7. Tensión Von Mises en el modelo 7.....	48
Ilustración A8. Tensión Von Mises en el modelo 8.....	50
Ilustración A9. Deformación plástica modelos 1 y 2.....	53
Ilustración A10. Deformación plástica modelos 3 y 4.....	54
Ilustración A11. Deformación plástica modelos 5 y 6.....	55
Ilustración A12. Deformación plástica modelos 7 y 8.....	56
Ilustración A13. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 1.....	58

Ilustración A14. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 2.....	60
Ilustración A15. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 3.....	62
Ilustración A16. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 4.....	64
Ilustración A17. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 5.....	66
Ilustración A18. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 6.....	68
Ilustración A19. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 7.....	70
Ilustración A20. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 8.....	72
Ilustración A21. Desplazamiento resultante modelo 1.....	75
Ilustración A22. Desplazamiento resultante modelo 2.....	77
Ilustración A23. Desplazamiento resultante modelo 3.....	79
Ilustración A24. Desplazamiento resultante modelo 4.....	81
Ilustración A25. Desplazamiento resultante modelo 5.....	83
Ilustración A26. Desplazamiento resultante modelo 6.....	85
Ilustración A27. Desplazamiento resultante modelo 7.....	87
Ilustración A28. Desplazamiento resultante modelo 8.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas Aluminio 6005A-T6 [3].....	8
Tabla 2. Número de nodos y elementos en cada modelo.....	15
Tabla 3. Modelos a analizar.....	25
Tabla 4. Tensión de Von Mises para cada modelo.....	25
Tabla 5. Deformación plástica para cada modelo.....	25
Tabla 6. Desplazamiento para cada modelo.....	26
Tabla 7. Presión de contacto modelo inicial y final.....	30
Tabla 8. Resumen valores modelo inicial y modelo.....	32

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva esfuerzo-deformación.....	8
Gráfica 2. Comparación de los métodos de extrusión.....	11
Gráfica A1. Energía plástica modelo inicial. Caída lateral opuesto.....	91
Gráfica A2. Energía plástica modelo inicial. Caída mismo lateral.....	91
Gráfica A3. Energía plástica modelo final. Caída lateral opuesto.....	92
Gráfica A4. Energía plástica modelo final. Caída mismo lateral.....	92
Gráfica A5. Presión de contacto modelo inicial. Caída lateral opuesto.....	93
Gráfica A6. Presión de contacto modelo inicial. Caída mismo lateral.....	93
Gráfica A7. Presión de contacto modelo final. Caída lateral opuesto.....	94
Gráfica A8. Presión de contacto modelo inicial. Caída mismo lateral.....	94

1. Introducción

1.1 Objetivo

El objetivo de este proyecto es el de optimizar el diseño de la línea de vida de un camión semirremolque cisterna como el que se muestra en la *Ilustración 1*. Se calcularán las tensiones y deformaciones de cada modelo, al que se le han ido modificando distintos parámetros de diseño, obteniendo como resolución final la estructura con los valores más bajos. Los resultados válidos tienen que estar dentro de los valores aceptables de las propiedades mecánicas del material a emplear en la construcción de la línea de vida.



Ilustración 1. Vehículo semirremolque cisterna

Los vehículos semirremolque tipo cisterna son una de las muchas variedades de camión que sirve tanto para el transporte de líquidos como para su mantenimiento por tiempo prolongado según sus características.

En este caso a estudiar, se tratará de un semirremolque para transportar combustible. Uno de los objetivos del perfil que se va a analizar es que los gases que produce ese combustible se queden acumulados en el interior de la línea de vida. El perfil de nuestro diseño es hueco y queda conectado a través de un agujero en la superficie del camión por donde pasarán los gases.

Dichos gases no pueden salir a la atmósfera, por tanto, se tiene que asegurar que la línea de vida no se fracturará en ningún caso, y que el material del que se vaya a construir aguante estar expuesto al ambiente y por tanto, las condiciones meteorológicas a las que será sometida y soporte, fundamentalmente, al operario en caso de caída.

1.2 Análisis del proyecto

El análisis de cada diseño se hará empleando el Método de Elementos Finitos. Consiste en un método de aproximación a través de ecuaciones diferenciales parciales aplicadas sobre un problema continuo de geometría compleja, en donde será necesario:

- El medio continuo, entendiendo éste como el modelo a analizar. Será necesario llevar a cabo su división o discretización en partes más pequeñas, los elementos.



- El comportamiento de dichos elementos vendrá determinado por un número finito de puntos, denominados nodos, y que son los puntos de unión entre dichos elementos.

El problema, por tanto, pasará a solucionarse de manera discreta mediante el ensamblaje de los elementos.

Las incógnitas del problema dejarán de ser funciones matemáticas, para tomar el valor de estas funciones en los nodos.

El comportamiento de las zonas intermedias existentes entre los nodos quedará definido por funciones de interpolación.

Se evaluarán dos sucesos:

- Caída hacia el lateral opuesto del vehículo a la línea de vida.
- Caída hacia el mismo lateral del vehículo que la línea de vida.

Ambos casos se calcularán suponiendo que deben soportar una carga máxima de 10 KN.

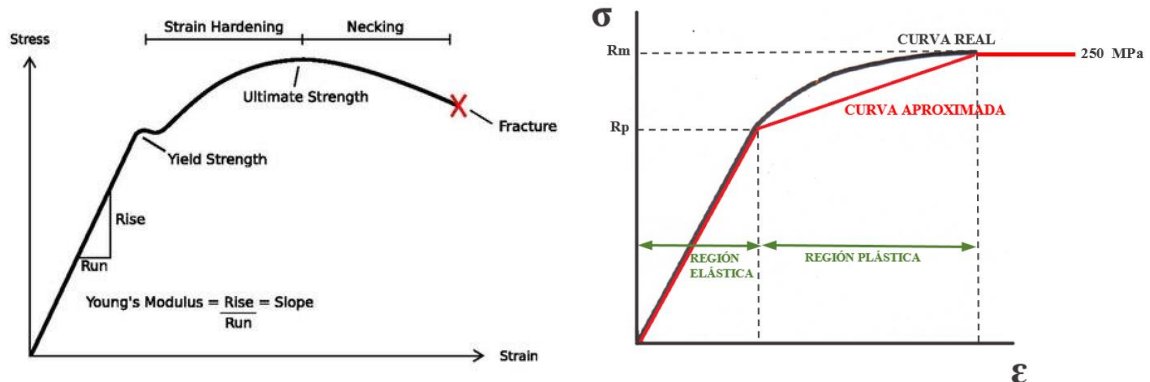
2. Material

El modelo está construido con el material aluminio 6005A-T6, a través del proceso de extrusión. Este aluminio es del tipo 6005A y sometido al tratamiento térmico T6 [1], temple, en solución y envejecido artificialmente. Las propiedades mecánicas del material vienen en la *Tabla 7*. En la *Gráfica 1 (derecha)* se observa la curva tensión-deformación que se ha tomado de referencia para el material empleado. Al ser el límite de rotura 250 MPa, se ha impuesto como condición que en los cálculos la tensión de Von Mises no supere dicho valor. Si llega hasta 250 MPa, permanecerá en esa cifra.

El perfil va a ir soldado al vehículo, y este aluminio tiene una buena capacidad de soldadura. También dicho material tiene una gran resistencia a la corrosión. La corrosión es la interacción de un metal con un medio que lo rodea, produciendo el deterioro en sus propiedades físicas y químicas. Por tanto, esta característica es muy importante, ya que el vehículo va a estar al aire libre, en continuo contacto con distintos agentes meteorológicos.[2]

Aleación	Estado de Tratamiento	Medidas e (mm)	Rm (MPa)		Rp 0,2 (MPa)		A%	A% 50 mm
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín	Mín
6005A	T4	≤10	180	-	90	-	15	13
	T6	≤5	255	-	215	-	8	6
		5	250	-	200	-	8	6

Tabla 1. Propiedades mecánicas Aluminio 6005A-T6 [3]



Gráfica 1 Curva tensión-deformación genérica (izquierda) y del material (derecha)

2.1 Extrusión del aluminio

El modelo será fabricado por medio del proceso de extrusión del aluminio. Los productos obtenidos mediante la extrusión del aluminio representan más del 50% del mercado europeo de productos de aluminio. El aluminio extruido se usa fundamentalmente en arquitectura; ventanas y puertas, estructuras, etc. Sin embargo, también tiene aplicaciones en una gran variedad de industrias; disipadores de calor, fuselajes de aviones, vehículos y ferrocarriles, como es en este caso.



Ilustración 2. Perfiles de aluminio extruido

La extrusión consiste en dar forma a un lingote cilíndrico de aluminio, conocido como “tocho”, haciéndolo pasar por una abertura denominada “matriz”. Esta abertura se corresponde con la sección transversal del perfil que se desea obtener.

El perfil resultante puede usarse en tramos largos, o se puede cortar para usarlo en estructuras, vehículos o componentes. También existe la extrusión en frío, que se suele utilizar para producir piezas metálicas, frecuentemente en forma terminada o casi terminada, sobre todo en forma de herramientas, piezas de vehículos, máquinas textiles, electrodomésticos y perfiles extrusionados para la construcción arquitectónica e ingenieril.

La versatilidad del proceso en cuanto al número de aleaciones y las formas posibles permiten al fabricante de perfiles de aluminio ofrecer a los clientes soluciones para sus necesidades de diseño.

2.2 Tipos de extrusión

- El método más común es la extrusión directa. Un tocho de metal se carga a un recipiente y un pistón comprime el material forzándolo a fluir a través de una o más aberturas que hay en una matriz situada al extremo opuesto del recipiente. A través de la matriz, saldrá el perfil extruido que se quiere obtener. Se pueden hacer secciones huecas o una gran variedad de formas en la sección transversal.[4]

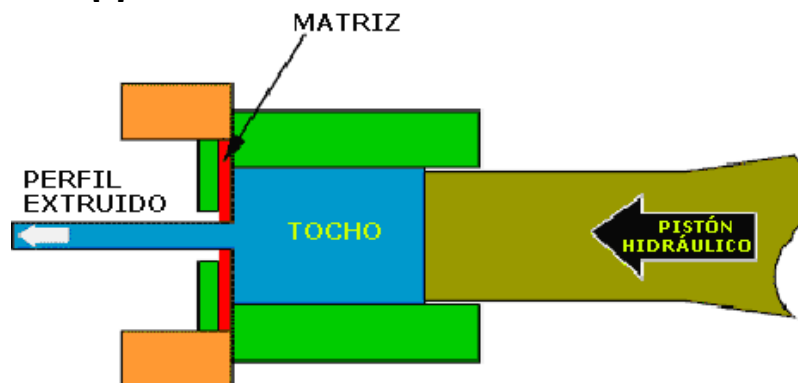


Ilustración 3. Método extrusión directa

→Una adaptación de la extrusión directa es la extrusión hidrostática, donde la barra es completamente rodeada por un líquido a presión, excepto donde la barra hace contacto con la matriz. Este proceso puede ser hecho caliente, tibio o frío. De cualquier modo, la temperatura es limitada por la estabilidad del fluido usado. [5]

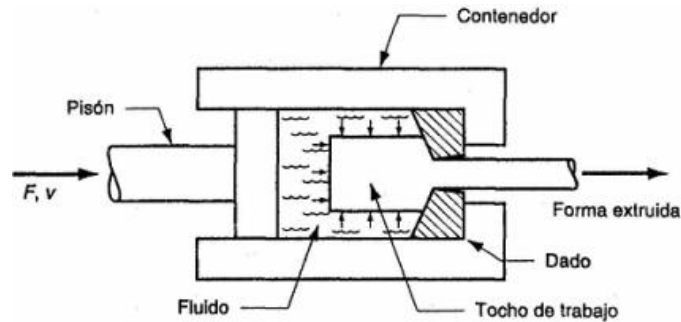


Ilustración 4. Método extrusión hidrostática

Existen otras prensas que están diseñadas para desplazar la matriz a lo largo del tocho, que está estacionario. Este método se denomina extrusión indirecta o inversa. El tocho es sostenido en el lugar por un soporte el cual debe ser tan largo como el recipiente. Como el tocho se mueve con respecto al recipiente, no hay fricción en las paredes del recipiente.

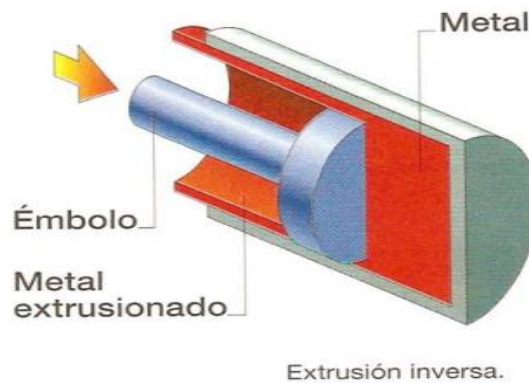
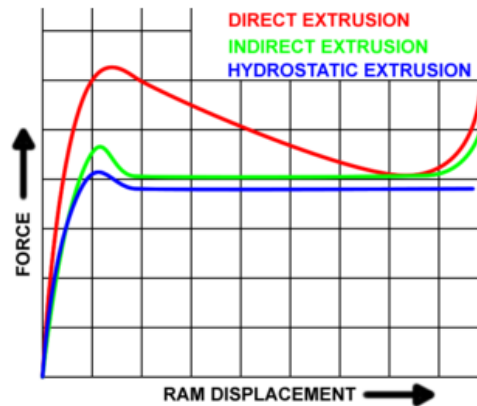


Ilustración 5. Método extrusión indirecta

La mayor desventaja de la extrusión directa es que la fuerza requerida en la extrusión de la barra, es mayor que la necesitada en la extrusión indirecta debido a la fricción de las paredes del recipiente. Por eso la mayor fuerza requerida es al comienzo del proceso y decrece según se llega al final de la barra. Es justo en el final de la barra donde la fuerza aumenta considerablemente porque la barra es delgada y el material debe fluir no radialmente para salir de la matriz (Gráfica 2). El final de la barra no es usado por esta razón. [6]



Gráfica 2. Comparación de los métodos de extrusión

2.3 Equipos de extrusión

Las prensas de extrusión pueden ser horizontales o verticales, dependiendo de la orientación de los ejes de trabajo. Los tipos horizontales son los más comunes (*Ilustración 6*). Las prensas de extrusión son accionadas normalmente por fuerza hidráulica, la cual es especialmente apropiada para producción semi-continua de secciones largas, como en la extrusión directa. Frecuentemente se usa la pulsión mecánica para extrusión en frío de partes individuales.



Ilustración 6. Prensa de extrusión hidráulica horizontal



Ilustración 7. Prensa de extrusión hidráulica vertical

2.4 Proceso de extrusión en caliente

Una vez calentado el tocho, se corta una porción y se introduce el material a 500°C en la prensa, temperatura en que el aluminio alcanza un estado plástico. A su vez, se precalienta la matriz para que no exista diferencia de temperatura con el material.

Una vez el aluminio comienza a fluir por la matriz, se retira la punta y se acompaña el perfil mediante un carro sobre la bancada hasta que alcanza una longitud de aproximadamente 50 m. Mientras tanto, se enfría rápidamente, mediante aire o agua, a una velocidad de 50°C por minuto.

Normalmente los perfiles presentan ligeras curvaturas y tensiones que son corregidas mediante el estirado. Posteriormente, se cortan los perfiles a las longitudes deseadas.

El proceso de extrusión continuaría con otros tratamientos térmicos como el temple. Estos procesos consisten en el calentamiento y enfriamiento (en hornos especiales) a una temperatura y durante un período de tiempo determinados.[7]

3. Descripción del modelo

El modelo, consta de dos partes diferenciadas, la corredera y el perfil. Éstas forman la línea de vida del semirremolque cisterna, es decir, donde se sujeta una persona cuando se sube a la zona superior de dicho semirremolque por su seguridad. Del modelo, el perfil es lo que está sujeto al semirremolque cisterna. La función principal del perfil es hacer que la corredera puede deslizarse por él sin que éste se deforme o se rompa, es decir, que aguante las tensiones a las que estaría sometido en el caso de una caída. La corredera es la parte que más se va a estudiar. Es el lugar donde permanecerá enganchada la cuerda que irá sujeta al arnés de la persona que se suba encima del vehículo. Esta pieza se deslizará a lo largo de todo el perfil. El cálculo de la sección de la corredera es fundamental, ya que tiene que conseguir que soporte todo el peso de la caída sin que llegue a romperse, porque si se rompe, esta línea de vida no estaría cumpliendo su función, que es la de detener una posible caída, y pondría en riesgo la seguridad de la persona que está encima del semirremolque.

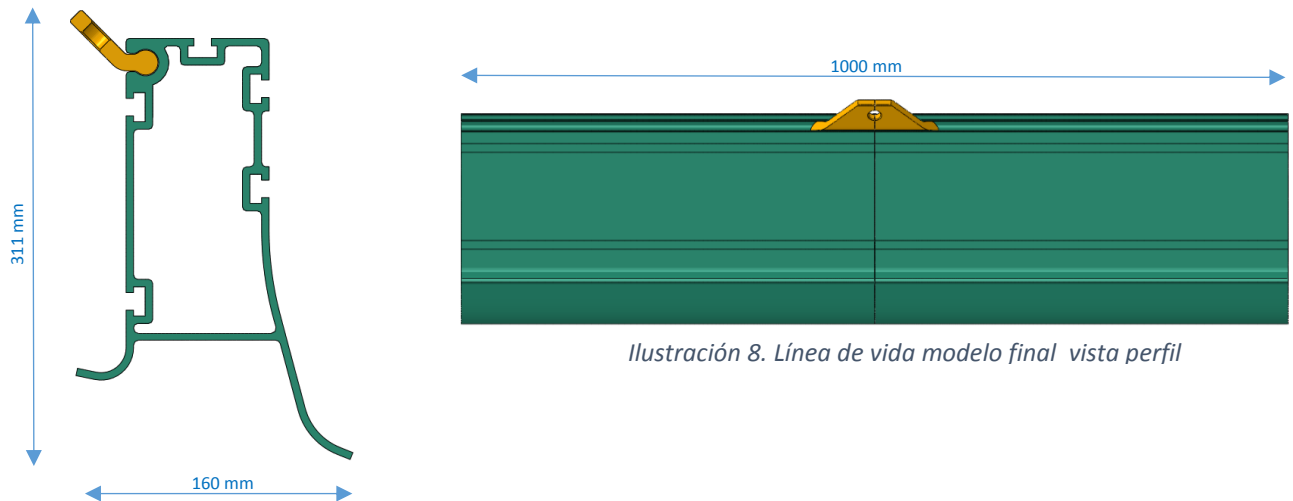


Ilustración 8. Línea de vida modelo final vista perfil

Ilustración 9. Línea de vida modelo final vista alzado

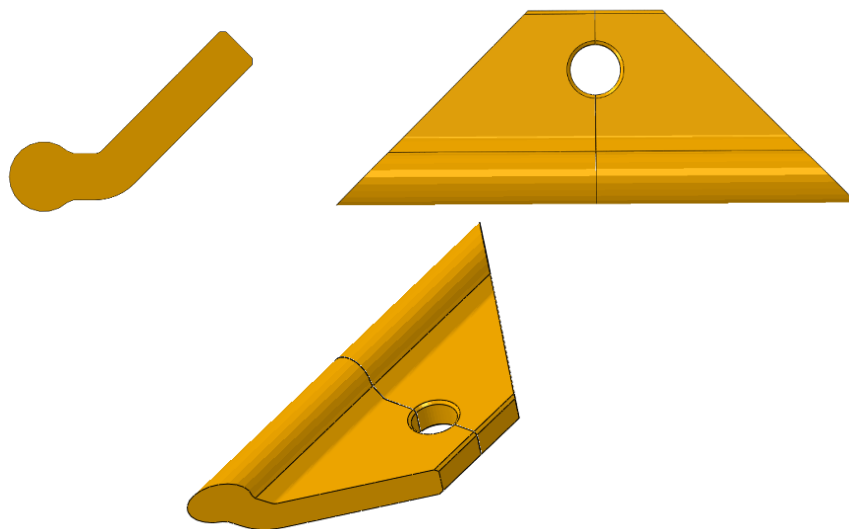


Ilustración 10. Corredera modelo final vista desde diferentes perspectivas

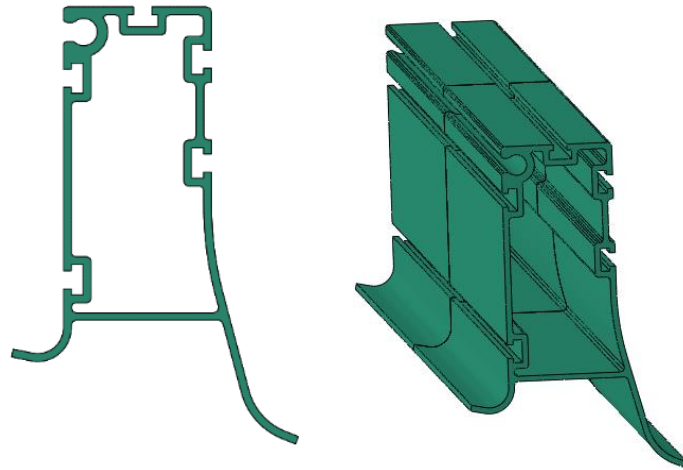


Ilustración 11. Perfil modelo final visto desde diferentes perspectivas

Para el diseño de la corredera se han tenido en cuenta dos casos. El primer caso sería la caída hacia el lateral opuesto del vehículo a la línea de vida y el segundo caso la caída hacia el mismo lateral del vehículo que la línea de vida. El valor de la carga permanente que se aplicará a cada caso será de 10 kN. Esta fuerza viene dada por la normativa UNE-EN 795:1997. Hay 6 modelos de dispositivos de anclaje, en nuestro caso es la Clase D como se puede ver en la imagen. Es una línea rígida por donde desliza el carro, a lo que se ha denominado como corredera. Entre sus múltiples aplicaciones se encuentra la de descarga de cisternas, a lo que está destinado este modelo.

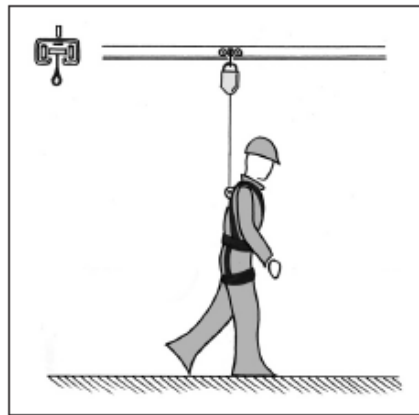


Ilustración 12. Ejemplo línea de vida rígida horizontal con carro

Para efectuar el cálculo del modelo se ha realizado haciendo un corte por la mitad de la corredera y del perfil. La línea de vida es simétrica por el plano XY, por tanto haciendo la mitad de la geometría se podía realizar el cálculo completo teniendo en cuenta que la carga a aplicar se tendrá que dividir entre dos.

4. Mallado por elementos finitos

4.1 Tipos de elementos

Antes de obtener el modelo listo para realizar los cálculos con el software Abaqus Explicit, la generación del modelo de elementos finitos se llevará a cabo con el programa Patran.

Se estudiará la estrategia más adecuada de mallado, donde partiendo de elementos planos, se extruirán para obtener los elementos volumétricos deseados.

La malla inicial será tipo Shell. El modelo Shell es el más sencillo y el menos costoso computacionalmente. Las mallas Shell están formadas por elementos en 2D. Forman superficies, tanto rectas como curvas, que pueden ser extruidas posteriormente para llegar a formar el modelo deseado en 3D.

En este proyecto, solo se va a emplear la malla Shell para dibujar los elementos planos. Una vez se haya extruido y los elementos sean volumétricos, la malla Shell se eliminará.

El modelo de la línea de vida con el que se va a trabajar en Patran será la mitad de la pieza, ya que es un diseño simétrico por el plano XY. Esto ayudará a la hora de realizar los cálculos de manera más simplificada. Aunque habrá que tener en cuenta esto a la hora de especificar las condiciones de contorno y de las cargas permanentes a aplicar.

Al ir modificando distintos parámetros geométricos del modelo inicial, tendrán distintos números de nodos y elementos (*Tabla 2*).

MODELO	1 y 2	3 y 4	5 y 6	7 y 8
NODOS	152809	160896	154006	162093
ELEMENTOS	104214	111340	105402	112528

Tabla 2. Número de nodos y elementos en cada modelo

La malla está formada por elementos volumétricos. Estos son los elementos C3D8R y los elementos C3D6. Prácticamente todo el diseño está constituido por elementos tipo C3D8R, excepto en la corredera que para hacer el agujero por donde pasará la cuerda, se han empleado elementos C3D6, ya que se ajustaban más al diseño y si se utilizan los elementos C3D8R en su lugar, se llegan a distorsionar en exceso (*Ilustración 13*).

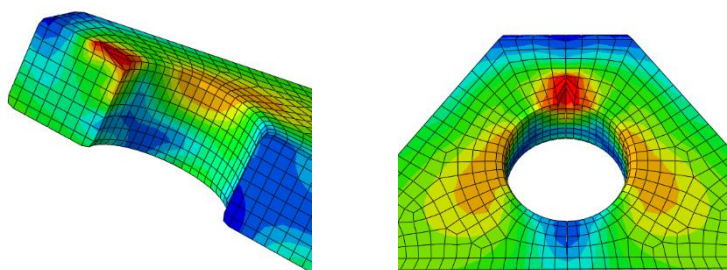


Ilustración 13. Corredera con elementos C3D8R distorsionados.

En el mallado del modelo, se observa que en el lugar donde hay mayor concentración de elementos, son las zonas donde se encuentran los mayores valores de tensiones.

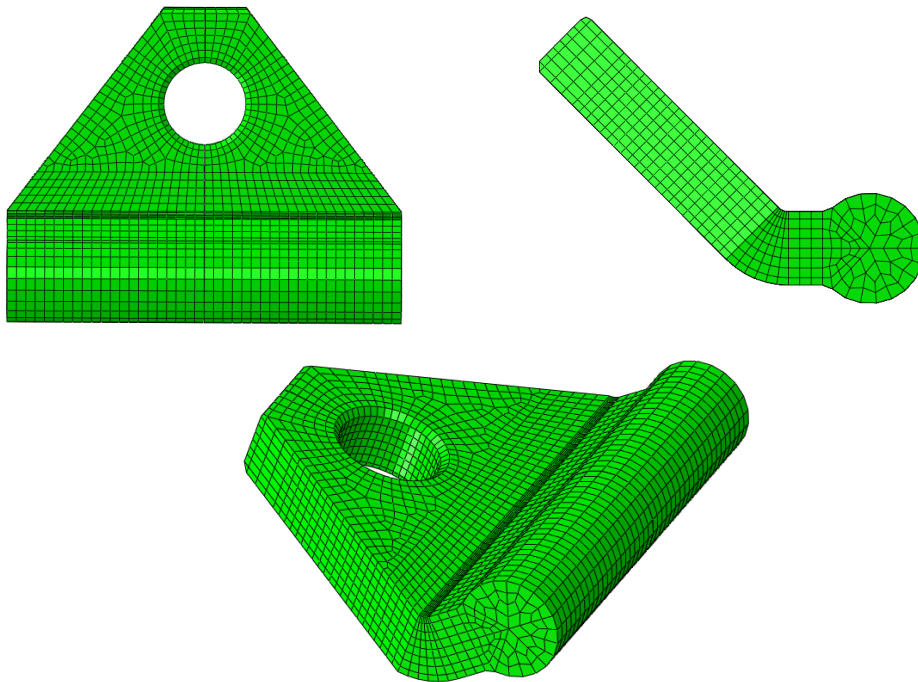


Ilustración 14. Corredera con su correspondiente mallado

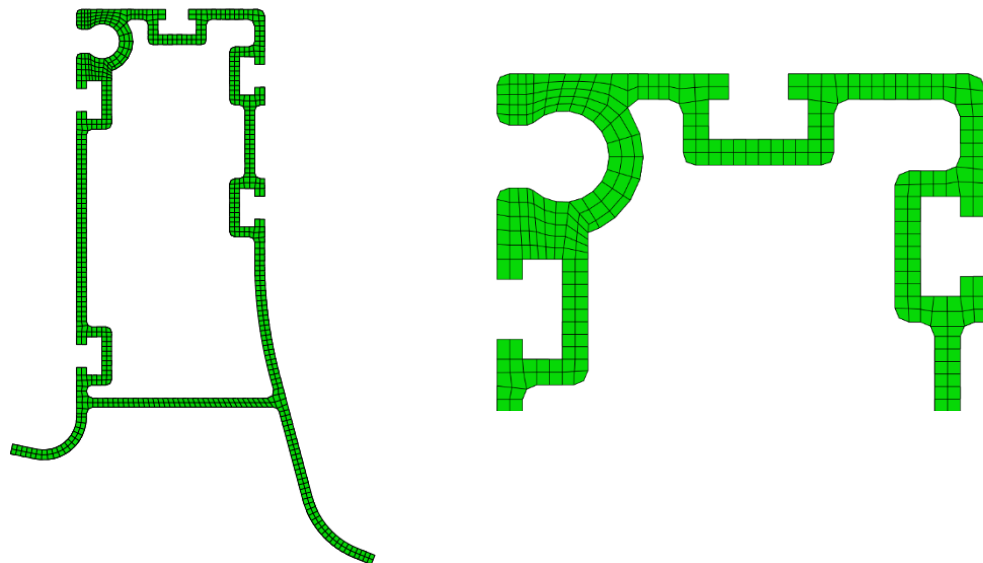


Ilustración 15. Perfil con su correspondiente mallado

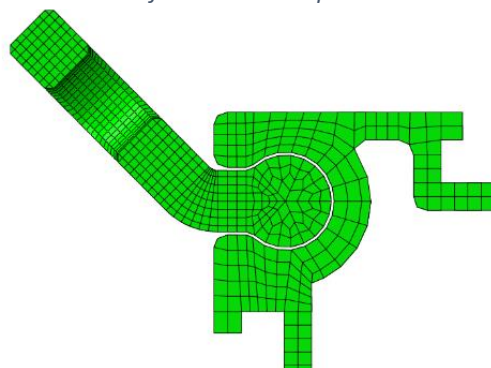


Ilustración 16. Encaje de la corredera en el perfil con su correspondiente mallado

En la *Ilustración 16* se puede apreciar la pequeña holgura que existe en la unión del perfil y la corredera. Es el mínimo espacio para que la corredera se pueda deslizar a través del perfil.

Se van a explicar los 4 tipos de elementos que se han utilizado hasta llegar a obtener el diseño deseado: 2 elementos volumétricos y 2 planos.

- C3D8R: es un hexaedro lineal de ocho nodos con integración reducida. El uso de integración reducida permite aminorar el tiempo de cálculo, para ello se reduce el número de puntos de integración en cada elemento.

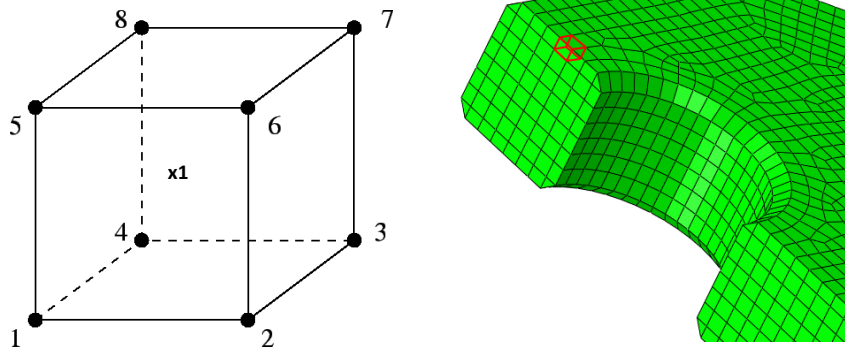


Ilustración 17. Elemento tipo C3D8R

- C3D6: son elementos tipo cuña, lineales de seis nodos. En el modelo hay muy pocos elementos de este tipo. La integración será completa y no reducida. Se emplean para zonas del diseño muy específicas, en concreto bordes, o geometrías difíciles donde los elementos hexaédricos se pueden llegar a deformar demasiado.

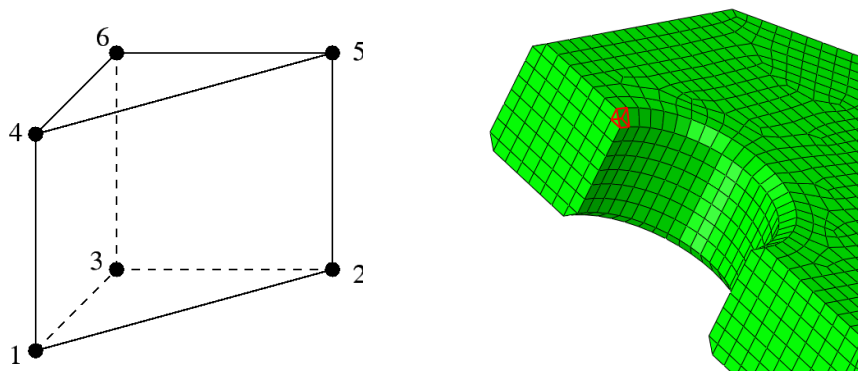


Ilustración 18. Elemento tipo C3D6

Los elementos que forman la malla Shell son los elementos planos S4R y STRI3. Estos elementos serán utilizados en la formación de la malla, para realizar el diseño y las modificaciones necesarias y extruirlo posteriormente.

- Los elementos S4R son cuadriláteros de cuatro nodos con integración reducida.

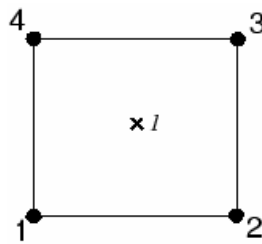


Ilustración 19. Elemento tipo S4R

- El elemento STRI3 de tres nodos. Es un elemento Shell que tiene 3 puntos de integración de acuerdo con el manual Abaqus.

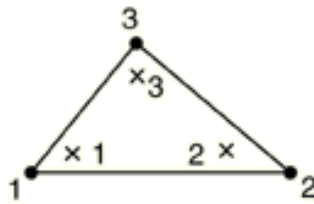


Ilustración 20. Elemento tipo STRI3

4.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno permiten reproducir las situaciones de funcionamiento que van a tener lugar en este elemento.

En el modelo a estudiar se aplicarán 4 condiciones de contorno:

- Soldadura: la línea de vida va soldada a la parte superior del camión tipo cisterna. Permanece inmóvil. Esto quiere decir que impedirá el desplazamiento en los 3 ejes.

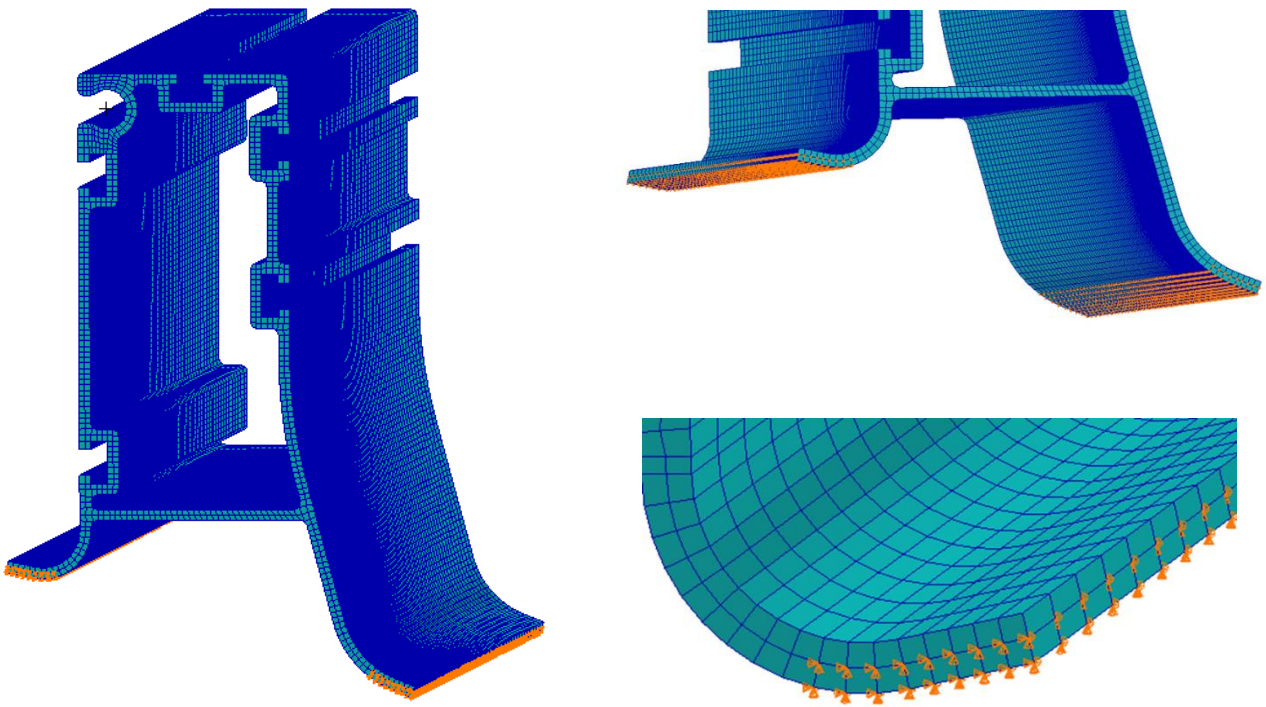


Ilustración 21. Condición de contorno. Soldadura

- Simetría perfil: como se indica anteriormente, la línea de vida es simétrica por el plano XY. Debido a las condiciones de simetría, el eje Z tendrá restringido el movimiento.

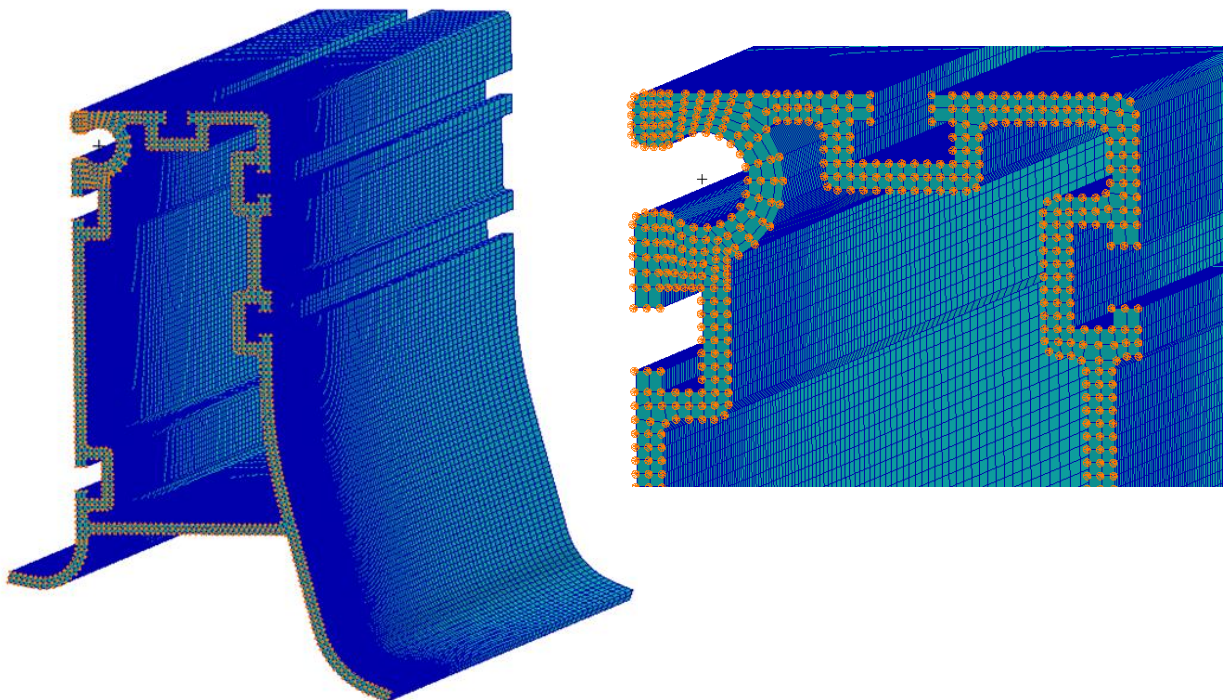


Ilustración 22. Condición de contorno. Simetría perfil

- Simetría corredera: la simetría en la corredera es igual que en el perfil, en el plano XY. No existirá desplazamiento en el eje Z.

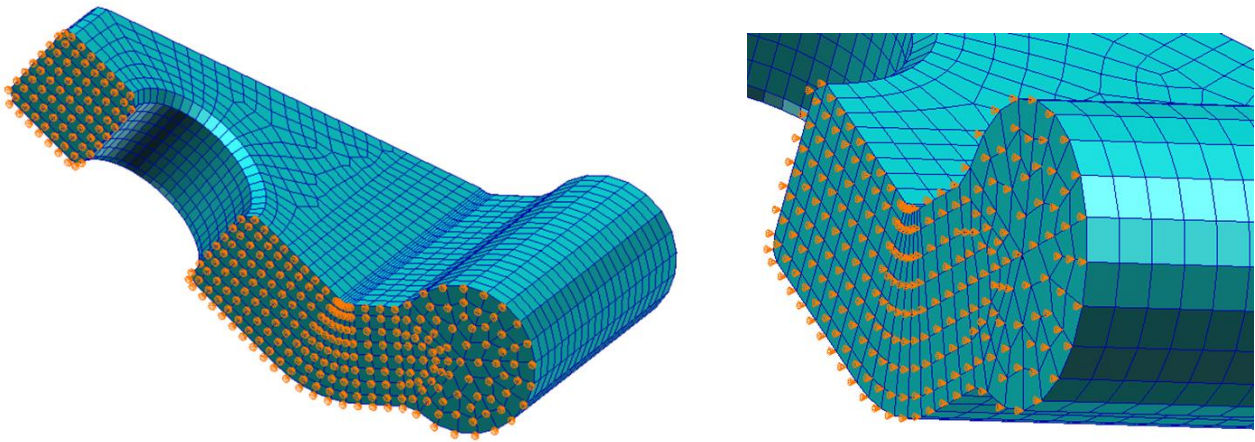


Ilustración 23. Condición de contorno. Simetría corredera

- Desplazamiento perfil: la parte final de la línea de vida va sujeta al camión. Por tanto, al igual que en la primera condición de contorno, no habrá desplazamiento en los 3 ejes.

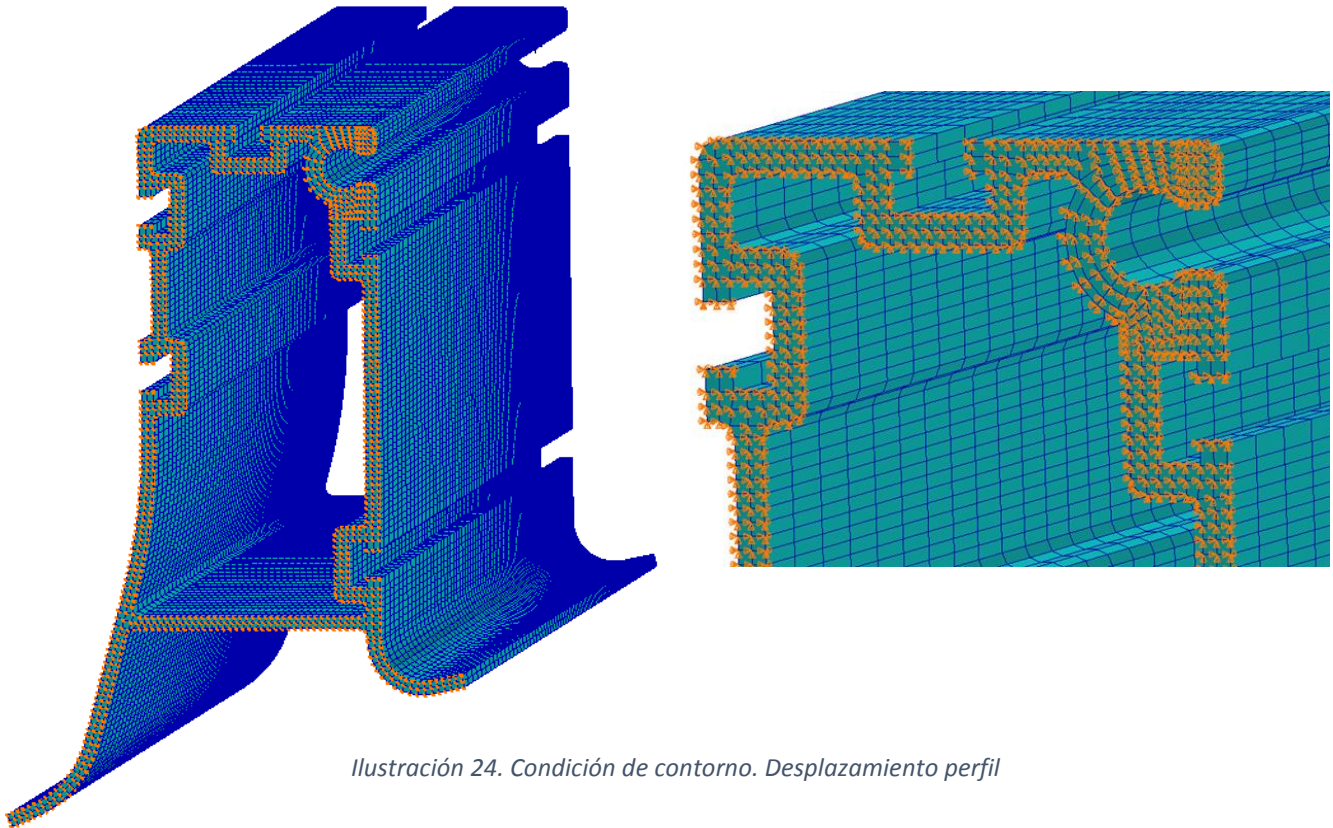


Ilustración 24. Condición de contorno. Desplazamiento perfil

4.3 Cargas aplicadas

Existe una carga permanente en los modelos a calcular: la carga de 10 KN. Esta carga se divide en dos, ya que como se ha mencionado anteriormente, al ser la pieza simétrica por la mitad, se asignará la mitad de la fuerza, que se aplica en la corredera. La carga de 5 KN será aplicada en la zona del agujero de la corredera, donde tirará la cuerda. Se fijará en 30 nodos, por lo que cada nodo soportará una carga de 166,66 N (*Ilustración 25*). Eso será en el caso de la caída hacia el lateral opuesto del vehículo a la línea de vida.

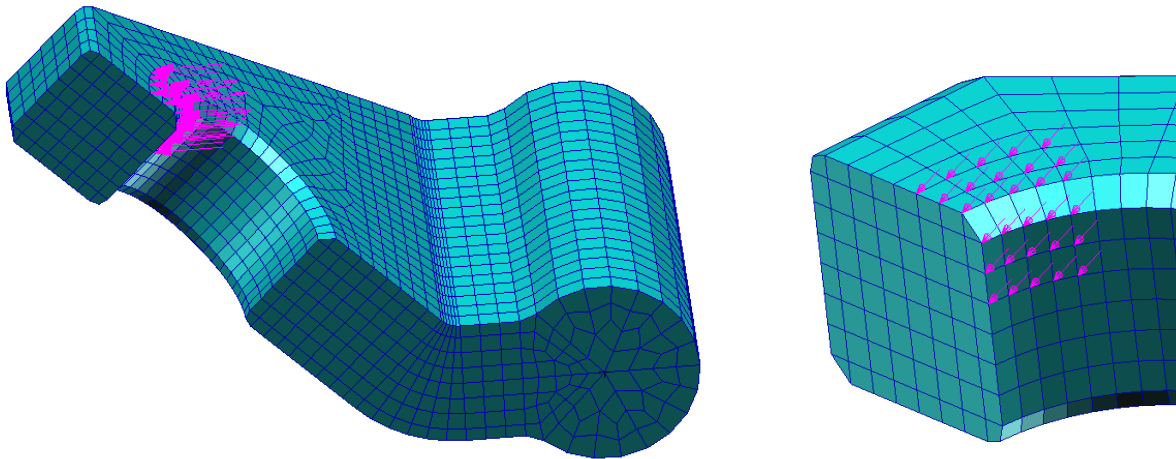


Ilustración 25. Carga aplicada caída lateral opuesto

Se aplicará la misma carga de 5 KN para el caso contrario, cuando la caída sea hacia el mismo lateral del vehículo que la línea de vida. Entonces la carga será fijada entre la parte inferior de la corredera y la sección perpendicular a esta. Y al igual que en la carga en sentido opuesto, será aplicada en 30 nodos (*Ilustración 26*).

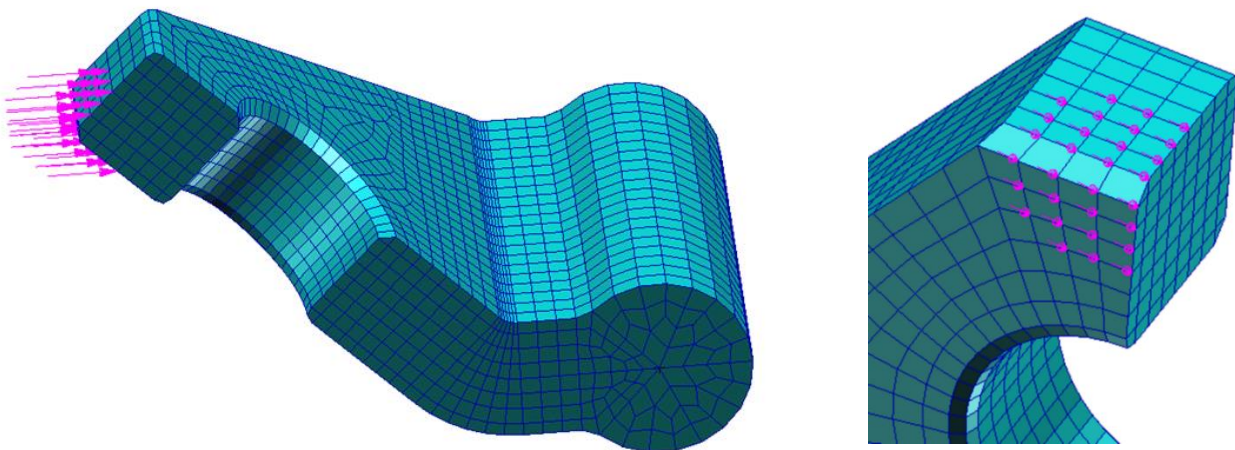


Ilustración 26. Carga aplicada mismo lateral

5. Programas utilizados

Para el diseño con las modificaciones correspondientes de la línea de vida y su posterior cálculo, se han utilizado dos programas: Patran y Abaqus Explicit

- Patran: Es un software que permite llevar a cabo el modelado de sólidos, mallado, configuración de análisis y visualización a través de múltiples programas. En nuestro caso será a través de Abaqus.

El mallado de superficies y sólidos se puede generar fácilmente mediante las rutinas de mallado totalmente automatizadas y los métodos manuales que proporcionan un mayor control, o mediante una combinación de ambos métodos. En este caso se ha realizado un mallado de manera manual en su totalidad, lo que ha permitido tener un mayor control sobre todos los parámetros relativos al modelo de elementos finitos.

Posteriormente será necesario asignar tanto las propiedades a los diferentes elementos, definir las condiciones de contorno y las cargas externas aplicadas para cada caso de carga.

Por último, se define el tipo de análisis y se exporta un fichero de texto para el software elegido de análisis de elementos finitos, Abaqus Explicit, y poder ejecutarlo. [8]

- Abaqus: Se empleará este software para el cálculo de los modelos. Es un programa de simulación que aplica el Método de Elementos Finitos. En concreto se va a utilizar Abaqus Explicit, que es particularmente adecuado para simular eventos dinámicos transitorios breves.

A partir del fichero de texto generado por Patran, se modificará para añadir algunos parámetros que Patran no ha producido y ya se podrá ejecutar.

El archivo de texto que genera Patran y que a continuación lee y ejecuta Abaqus es .inp. Una vez ejecutado, Abaqus empieza a generar distintos archivos, como el .dat, que muestra si hay algún fallo de compilación o algún error. El .sta, que informa de las etapas y del tiempo en el que se están efectuando todos los cálculos, y finalmente de si la ejecución ha sido completada con éxito. Por último tenemos el archivo .odb. En este archivo es donde se puede ver el modelo y todos sus resultados. [9]

6. Casos de carga con distinta geometría

El objetivo de este proyecto es el de la optimización de la línea de vida de un vehículo semirremolque cisterna. Partiendo de una geometría inicial, se van a ir modificando distintos parámetros del patrón original hasta conseguir el modelo óptimo, es decir, el que aguante mejor las tensiones en caso de caída y que llegue a tener una deformación plástica menor.

6.1 Variaciones en el modelo inicial

Para llegar al diseño óptimo, se realizarán tres variaciones en el modelo:

- La parte de la corredera que toca con el perfil sufre una gran presión de contacto y tiene una tensión muy elevada, por eso será lo primero que se modificará. Para suavizar las tensiones en esa zona, donde toca con el perfil, se alargará la corredera para no tener que realizar ese corte plano donde se acumulan las tensiones, será un corte a bisel.

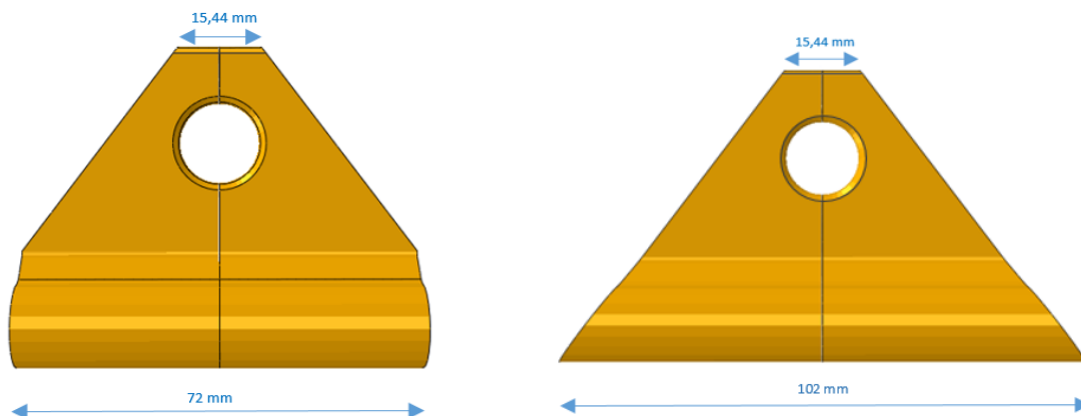


Ilustración 27. Corredera inicial (izquierda). Corredera inicial en corte bisel (derecha)

- Al comprobar que la corredera sigue sufriendo elevadas tensiones en la parte superior al agujero, donde se enganchará la cuerda que vaya sujeta al operario, se alargará la sección para que esa parte de la corredera soporte mejor la tensión en caso de caída.

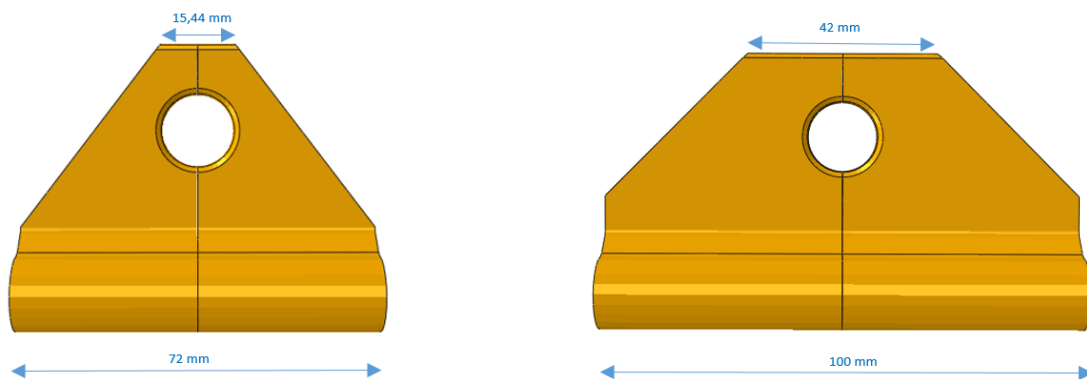


Ilustración 28. Corredera inicial (izquierda). Corredera sección alargada (derecha)

- La última modificación se realizará en el perfil. La parte en la que va encajada la corredera, al producirse la caída, sufre elevadas tensiones. Se añadirá 1,5 mm de espesor.

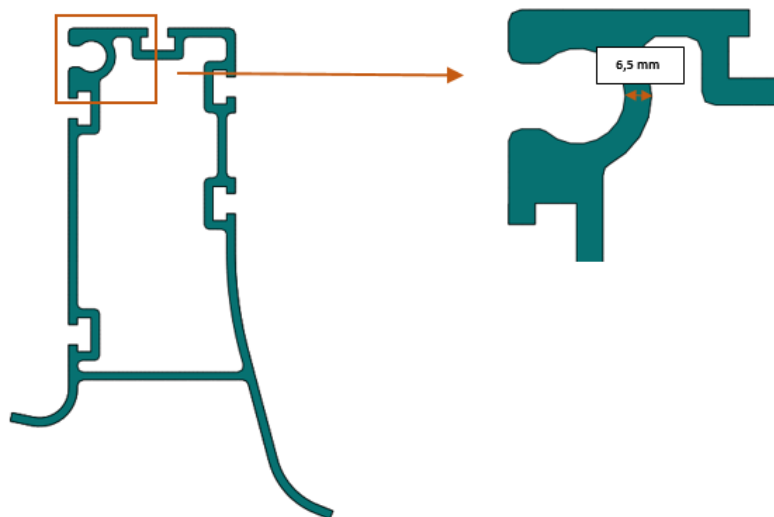


Ilustración 29. Perfil original

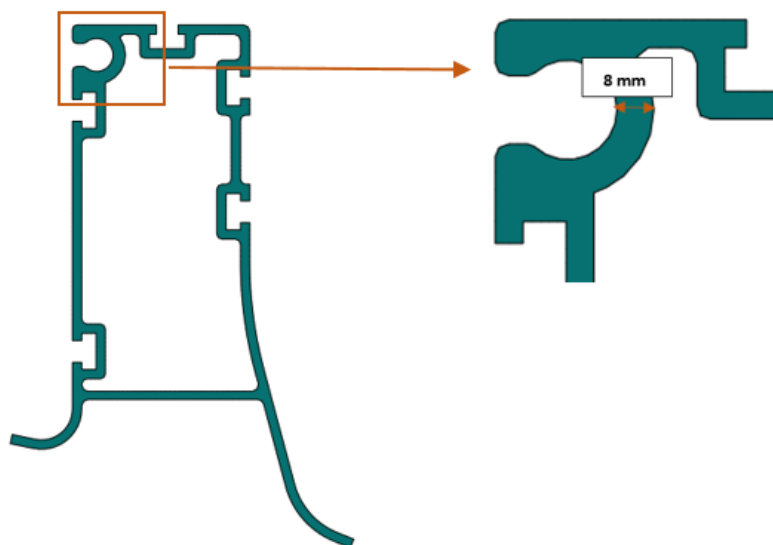


Ilustración 30. Perfil de espesor modificado

Finalmente, se ha realizado el cálculo de las tensiones que soporta el modelo y de las deformaciones que sufre combinando las tres modificaciones de diseño mencionadas anteriormente.

Los modelos que se van a analizar son los siguientes:

MODELO 1	Perfil original con corredera original
MODELO 2	Perfil original con corredera original con corte a bisel
MODELO 3	Perfil original con corredera de sección alargada
MODELO 4	Perfil original con corredera de sección alargada con corte a bisel
MODELO 5	Perfil de espesor modificado con corredera original
MODELO 6	Perfil de espesor modificado con corredera original con corte a bisel
MODELO 7	Perfil de espesor modificado con corredera de sección alargada
MODELO 8	Perfil de espesor modificado con corredera de sección alargada con corte a bisel

Tabla 3. Modelos a analizar

6.2 Cálculos y análisis de los resultados

En primer lugar se realizarán los cálculos de todo el proyecto con el programa Abaqus Explicit. Para cada uno de los modelos estarán los dos casos de caída, hacia el mismo lado del vehículo y hacia el lado contrario, o sea, en total se realizarán 16 cálculos.

El resumen de los cálculos obtenidos se puede observar en las *tablas 4, 5 y 6*.

	Tensión de Von Mises(Mpa)			
	Caída lateral opuesto		Caída mismo lateral	
	Corredera	Perfil	Corredera	Perfil
Modelo 1	218,5	217,4	250	184,9
Modelo 2	216,3	214,4	250	192,9
Modelo 3	215,9	209,8	250	211,9
Modelo 4	218,3	207,8	232,5	209,9
Modelo 5	208,8	209,5	250	214,4
Modelo 6	205	203	250	214,4
Modelo 7	206,7	203,4	225,4	208,2
Modelo 8	204,6	200,4	208,3	205,8

Tabla 4. Tensión de Von Mises para cada modelo

	Deformación plástica (%)			
	Caída lateral opuesto		Caída mismo lateral	
	Corredera	Perfil	Corredera	Perfil
Modelo 1	4	5,1	102,7	3,55
Modelo 2	3,1	5	111,2	3,6
Modelo 3	4,8	4,5	9,9	2,2
Modelo 4	3,2	4,6	5,4	2,8
Modelo 5	2,6	3,1	68,1	3
Modelo 6	1,6	2,9	17,9	3,8
Modelo 7	1,2	0,6	5,4	2,3
Modelo 8	0,9	0,1	2,4	2,8

Tabla 5. Deformación plástica para cada modelo

	Desplazamiento resultante (mm)			
	Caída lateral opuesto		Caída mismo lateral	
	Corredera	Perfil	Corredera	Perfil
Modelo 1	13,4	2,4	40,1	2,8
Modelo 2	12,8	2,2	40,1	2,7
Modelo 3	12,4	2,2	14,2	2,2
Modelo 4	11,7	1,9	12,8	1,9
Modelo 5	10,3	1,5	33,2	2,4
Modelo 6	9,8	1,5	20,4	2,3
Modelo 7	8,7	1,3	11,3	1,7
Modelo 8	8,1	1,2	10,7	1,6

Tabla 6. Desplazamiento para cada modelo

Una vez hechos los cálculos, para realizar el análisis a los modelos y quedarse con el diseño óptimo, se tiene que tener en cuenta que para el material del que está hecha la línea de vida, aluminio 6005A-T6, tiene un límite de rotura de 250 MPa y una elongación del 8 %. Esto quiere decir que si sobrepasan uno de estos dos valores, el diseño no será válido. En caso de que supere el límite de rotura, la línea de vida se rompería y el operario se caería desde arriba del camión al suelo, no sirviendo la existencia de la línea de vida como método de seguridad.

Lo mismo pasaría si supera el porcentaje de elongación del material. La pieza se deforma pudiendo llegar a romperse poniendo en riesgo al operario.

La fuerza que se ha supuesto que ha de soportar el modelo para ambos lados de la caída es de 10 KN. Todos los cálculos se han obtenido con dicho valor, como fuerza máxima que tiene que aguantar la línea de vida.

Se puede observar en el *Anexo 1: Tensión de Von Mises*, que en los diseños calculados hay varios casos en los que la tensión de Von Mises alcanza un valor de 250 MPa (modelos 1, 2, 3, 5 y 6). Este valor siempre se alcanza cuando la caída es hacia el mismo lateral del vehículo que la línea de vida. Como se ha explicado antes, al llegar al límite de rotura, la pieza se rompería, por lo que esos modelos no pueden utilizarse.

No se ha incorporado un modelo de rotura para el material ya que eso es lo que se quiere evitar en este proyecto, que se fraccione el modelo. A través de las modificaciones se busca estar dentro del rango elástico y en el de la deformación plástica admisible.

El límite elástico del aluminio 6005A-T6 es de 200MPa. En el *Anexo 3: Aplicación límite elástico*, se puede observar en color gris las zonas que entran en deformación plástica ya que están por encima de dicho valor.

Como comprobación, al lado de los modelos con el límite elástico aplicado, se pueden ver los modelos con el cálculo de la deformación plástica. Las regiones en gris corresponden a las zonas marcadas en la deformación plástica.

Además de superar el valor límite de rotura, los modelos mencionados anteriormente sobrepasan el porcentaje de alargamiento, como se muestra en el *Anexo 2: Deformación plástica*. Tanto en el modelo 1, 2, 5 y 6, se ve a simple vista en las imágenes la gran deformación que sufre la corredera. Esos 4 casos son los de la corredera de sección original, por lo que queda descartado cualquier tipo de diseño con la longitud de esa corredera, incluido la del corte a bisel.

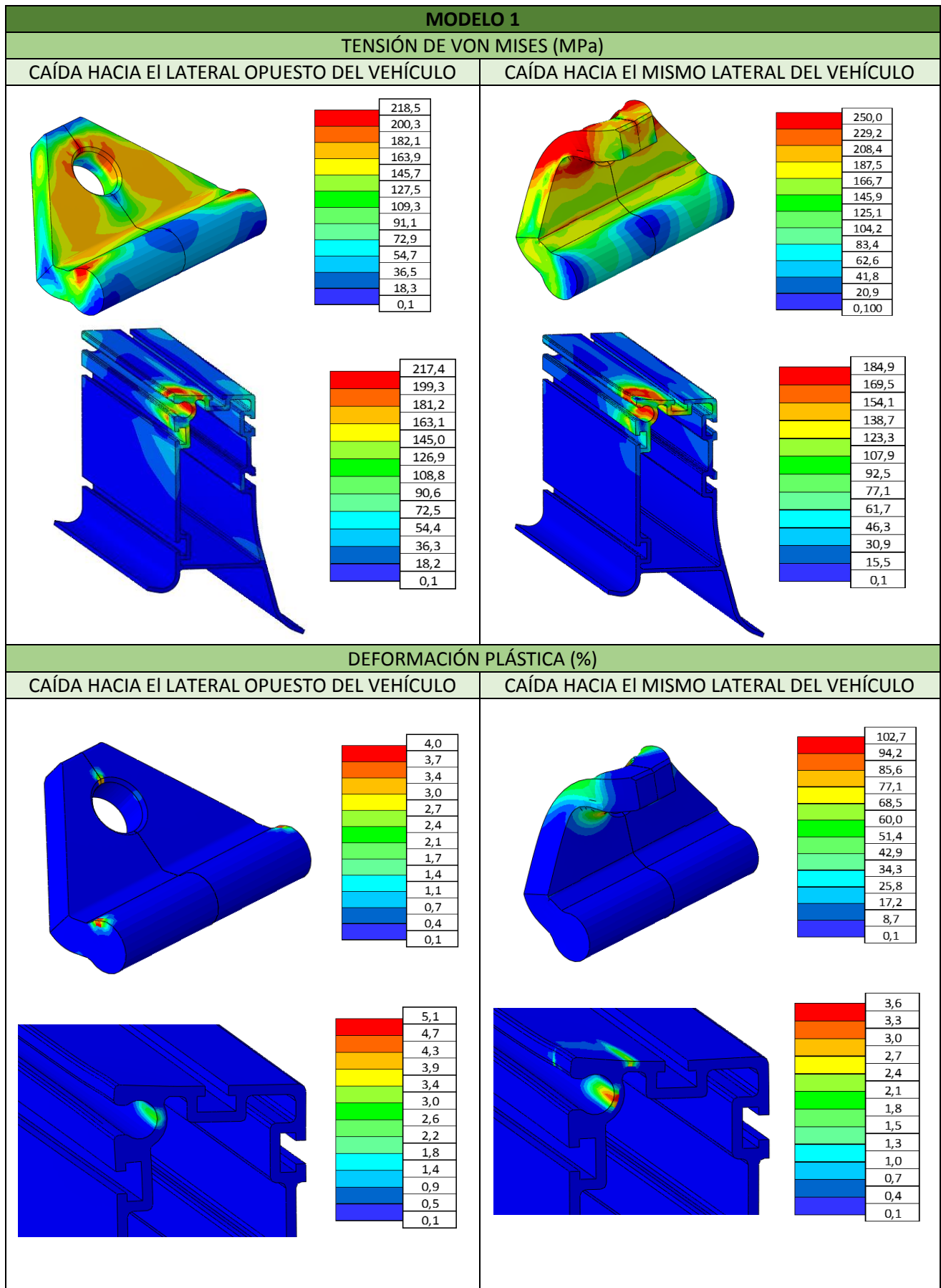
El modelo 3 sobrepasa en un 2% el porcentaje de alargamiento. Este modelo es de sección alargada, y la deformación se produce en los extremos de la corredera, cuando hay contacto entre perfil y corredera al ocasionarse la caída. Por eso se implanta el corte en bisel.

También se tendrá en cuenta el desplazamiento que sufre el conjunto en caso de producirse la caída. En el *Anexo 4: Desplazamiento resultante*, se puede ver la diferencia clara entre los modelos con corredera corta (modelos 1, 2, 5 y 6) y el resto de modelos. El desplazamiento que sufren es bastante elevado, en el caso inicial se llega a desplazar la corredera cuando la caída se produce en el mismo lado del vehículo hasta 40 mm de su estado inicial.

De los modelos no descartados (modelos 4, 7 y 8), se elegirá el que tenga menor deformación plástica y tenga el límite de rotura más bajo. Los 4 están dentro de los límites de las propiedades metálicas del material de la línea de vida, pero el modelo 8 es el que tiene más bajos dichos valores. Este modelo es el del perfil modificado con la corredera de sección alargada y con corte a bisel. Tanto la deformación como la tensión de Von Mises, son los valores menores de todos los modelos calculados.

Por tanto, como conclusión, el diseño óptimo de la de la línea de vida de un semirremolque vehículo cisterna es el modelo 8.

En la *Ilustración 31* se puede observar el resultado de los cálculos del modelo inicial y el modelo escogido y comparar que tanto la tensión de Von Mises como la deformación plástica, vista a simple vista, es mucho menor en el modelo 8 que en el primer diseño.



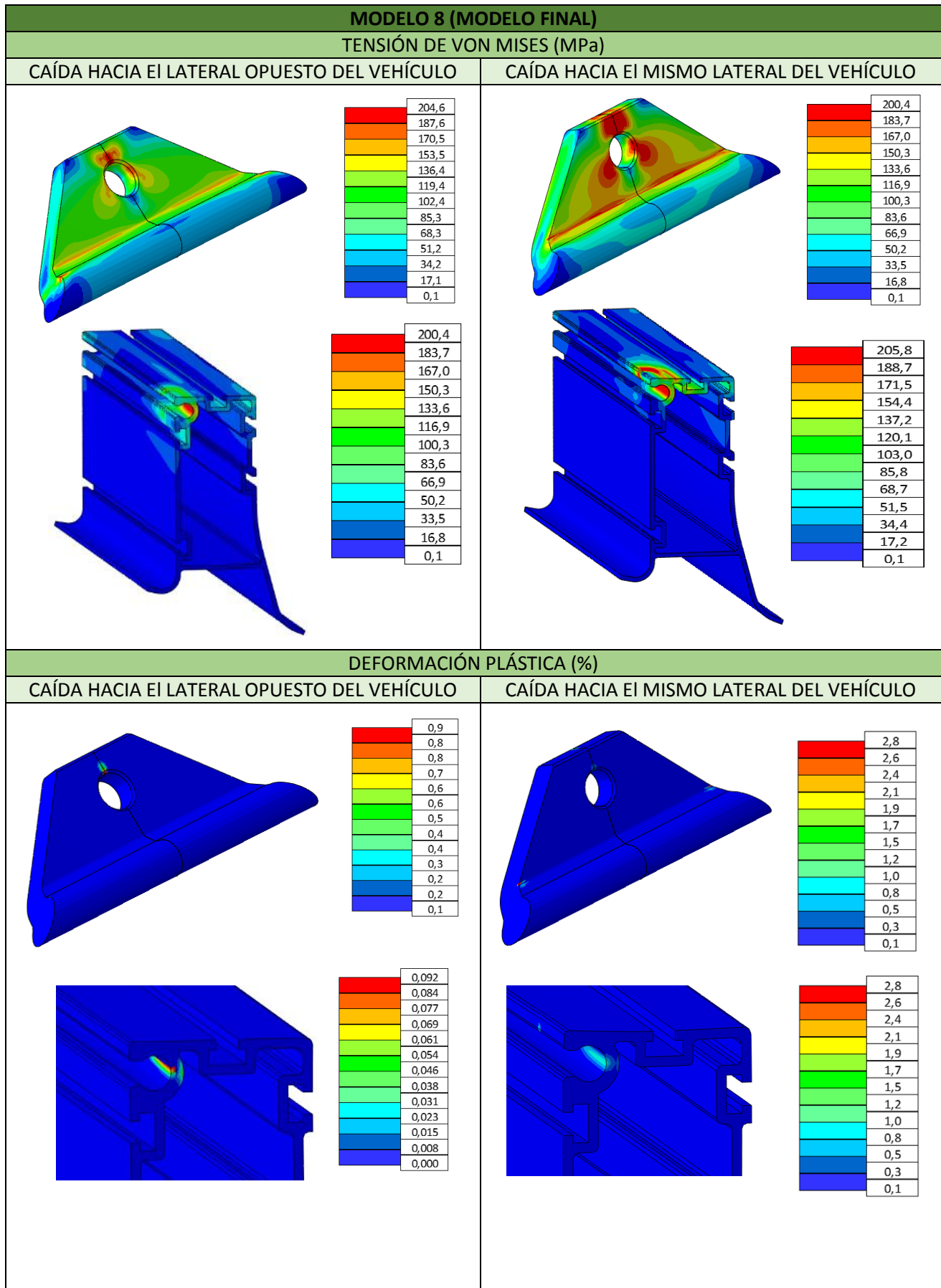


Ilustración 31. Resultados modelo inicial y modelo final

6.3 Gráficas

Presión de contacto

Los valores de las gráficas de la presión de contacto, que se pueden ver en el *Anexo 5: Gráficas, punto 5.2: Gráficas presión de contacto (GPa)*, se encuentran en la *tabla 8*. La presión de contacto que aparece entre la corredera y el perfil en la caída hacia el mismo lado del vehículo es superior que la caída hacia el lado contrario. La presión de contacto en ese caso no supone una variación muy distinta. El contacto entre corredera y perfil al producirse ese tipo de caída es similar en todos los modelos.

Estas gráficas se han obtenido seleccionando únicamente los nodos en los que existía el contacto entre la corredera y el perfil.

	PRESIÓN DE CONTACTO FINAL (GPa)	
	Lado opuesto	Mismo lado
MODELO INICIAL	18	42
MODELO FINAL	17	23,5

Tabla 7. Presión de contacto modelo inicial y final

Con este tipo de gráficas, se comprueba de otra manera distinta, la adecuada elección del modelo 8 como el diseño óptimo.

6.4 Fallos en el modelo

Existen 3 modos de fallo en el modelo:

- El primer modo de fallo es la rotura de la corredera. La fracción se produce entre la parte de la corredera que desliza por el perfil y la parte de la corredera que queda fuera. En el modelo 3, cuando la caída es hacia el lateral opuesto, se puede apreciar el fallo de rotura. En los extremos por donde pasa la línea roja que se muestra a continuación, se alcanza el límite elástico del material.

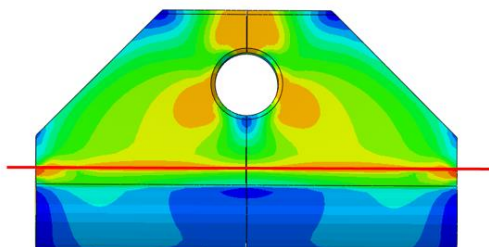


Ilustración 32. Modo de fallo rotura de la corredera

- El segundo fallo se produce por encima de la zona del agujero donde va enganchada la cuerda que sujeta al operario. Este fallo se puede apreciar en cualquiera de los modelos calculados anteriormente. Por ejemplo, cogiendo el mismo modelo que en el fallo de rotura, se observa que en dicha zona se acumulan tensiones elevadas. No se llega a alcanzar en esa parte la tensión de

rotura, la pieza quedaría rasgada. No se llegaría a romper, pero la pieza quedaría inutilizable.

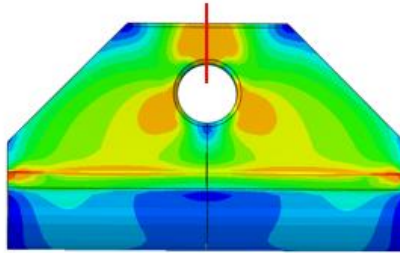


Ilustración 33. Modo de fallo rasgado zona del agujero

- El último caso de fallo se produce en el perfil. Cuando se produce la caída, para ambos lados sucede lo mismo, la parte en la que desliza la corredera sufre una apertura. Poniendo como ejemplo el mismo modelo que en los fallos anteriores, vemos en la imagen de la izquierda como es el perfil sin haberse producido la caída, y en la imagen de la derecha el perfil tras la caída. Se aprecia como el hueco en el que se encuentra la corredera se abre modificando el diseño inicial del perfil.

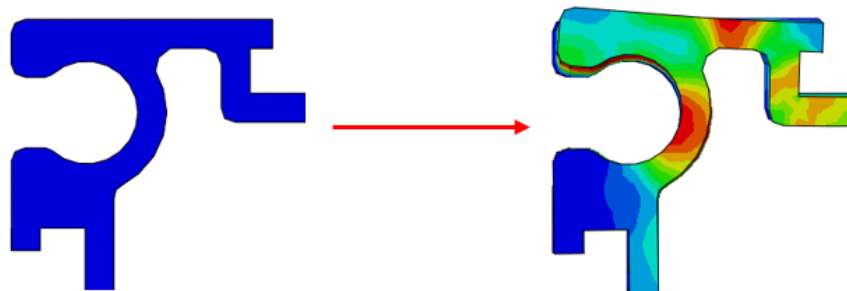


Ilustración 34. Modo de fallo apertura del perfil

7. Conclusión

El objetivo principal de este proyecto ha consistido en optimizar los parámetros geométricos de la línea de vida de un vehículo semirremolque cisterna. Para ello, se han estudiado parámetros como la longitud de la corredera, su forma de corte, ya sea plana o en bisel y el espesor del perfil por donde se desliza la corredera.

El uso del Método de Elementos Finitos, a través de los softwares Patran y Abaqus, ha permitido la total resolución del problema y de este modo alcanzar el objetivo del proyecto.

En el análisis de los modelos calculados con los distintos parámetros geométricos modificados, hay que destacar que las tres variaciones que se han realizado han hecho que tanto la tensión de Von Mises como la deformación plástica disminuyan de forma clara, como se aprecia en la *Tabla 8*, respecto al modelo inicial.

Caída	Tensión Von Mises (MPa)		Deformación plástica (%)	
	Lado opuesto	Mismo lado	Lado opuesto	Mismo lado
MODELO INICIAL	218,5	250,0	5,1	102,7
MODELO FINAL	204,6	205,8	0,9	2,8

Tabla 8. Resumen valores modelo inicial y modelo

El cambio que más ha mejorado el diseño ha sido alargar la longitud de la corredera. En todos los casos en los que la corredera era corta se llegaba al límite de rotura del material, haciendo totalmente inutilizable dichos modelos.

El segundo cambio en el que se aprecia mejoría es en los que se ha aumentado el espesor de la zona del perfil por el que desliza la corredera. De los 4 casos con perfil estrecho, 3 quedan descartados.

La última mejoría ha sido hacer el corte en bisel a la corredera. En el punto donde se producía el corte plano se acumulaban más tensiones y la presión de contacto era mayor que si haces el corte en bisel.

Cabe destacar que para los dos casos de caída posible, para la caída hacía el mismo lateral del vehículo es donde se producen las mayores tensiones y deformaciones.

En resumen, el modelo elegido es el que tiene la corredera más larga con corte en bisel y el perfil con el espesor ampliado. Se encuentra dentro de las propiedades mecánicas del material con el que está fabricada la línea de vida, aluminio 6005A-T6, y de todos los diseños calculados, los valores de las deformaciones plásticas y de las tensiones de Von Mises a para ambas caídas serán los menores.

8. Bibliografía

- [1] Biltra, <Temple de aluminio> (s.f.) Disponible en:
<http://www.biltra.com/tratamientos-termicos/temple-de-aluminio/> (Accedido: 28 de diciembre de 2019)
- [2] Capalex, <Ficha técnica de la aleación 6005A> (s.f.) Disponible en:
http://www.capalex.co.uk/spanish/6005_A_alloy_sp.html (Accedido: 28 de diciembre de 2019)
- [3] Raesa, <Propiedades técnicas de aleaciones de aluminio> (s.f.) Disponible en:
<https://www.perfilesenaluminio.com/es/61471/Datos-tecnicos/Propiedades-mecanicas.htm> (Accedido: 29 de diciembre de 2019)
- [4] AEA, <Extrusión del aluminio> (s.f.) Disponible en: <https://www.asoc-aluminio.es/asociados/extruidores/extrusion-del-aluminio> (Accedido: 29 de diciembre de 2019)
- [5] ECCI, <Proceso de extrusión> (Octubre de 2013) Disponible en:
<https://johnguio.files.wordpress.com/2013/10/clase-magistral-extrusic3b3n.pdf>
(Accedido: 31 de diciembre de 2019)
- [6] Universidad Politécnica de Zacatecas, <Procesos de fabricación, extrusión> (s.f.) Disponible en: <https://sites.google.com/site/procesosdefabricacion33/extrusion>
(Accedido: 31 de diciembre de 2019)
- [7] Extrual, <La extrusión del aluminio> (s.f.) Disponible en:
<http://www.extrual.com/es/noticias/articulos-tecnicos/la-extrusion-del-aluminio>
(Accedido: 31 de diciembre de 2019)
- [8] Indielec, <MSC Software> (s.f.) Disponible en: <http://www.indielec.com/patran-cms-4-50-350/> (Accedido: 2 de enero de 2020)
- [9] Cadtech, <Abaqus Explicit, soluciones completas para una simulación realista> (s.f.) Disponible en: <https://cadtech.es/simulia/productos/abaqus-explicit/> (Accedido: 2 de enero de 2020)



ANEXOS

Anexo 1: Tensión de Von Mises

En este Anexo se van a ver las tensiones de Von Mises para el conjunto de la línea de vida, y por separado la corredera y el perfil para todos los modelos estudiados. En las imágenes se puede observar con claridad las zonas donde se acumula más tensión y donde menos.

Se puede apreciar que cuando la caída se produce hacia el mismo lateral del vehículo, las tensiones son más elevadas que cuando la caída es hacia el lateral opuesto.

En los modelos 1, 2, 3, 5 y 6, en la corredera se alcanza el valor de 250 MPa, el límite de rotura del material. La corredera se rompería, por tanto estos modelos quedarían descartados.

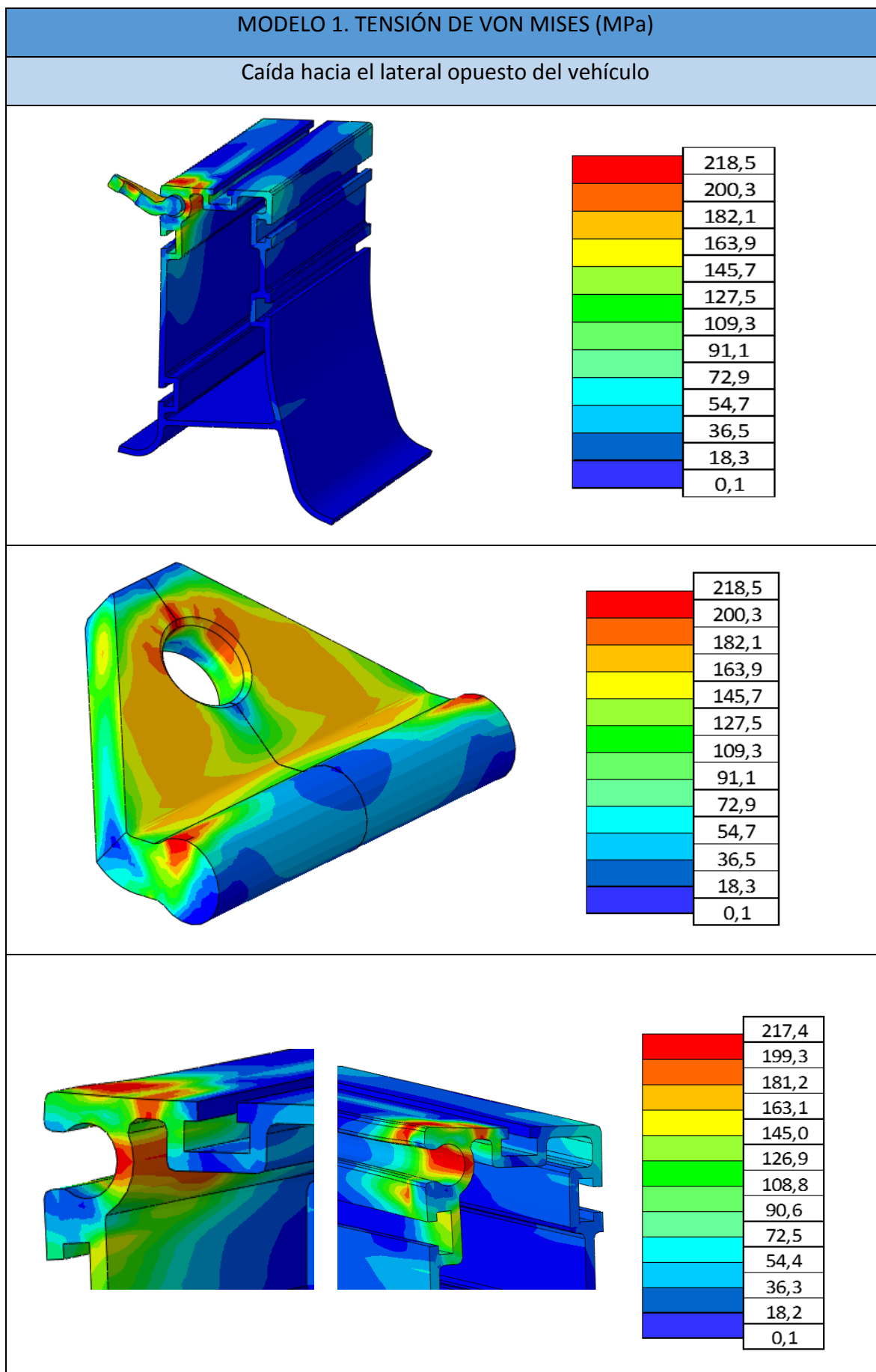
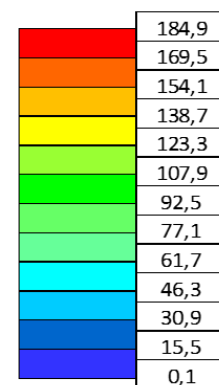
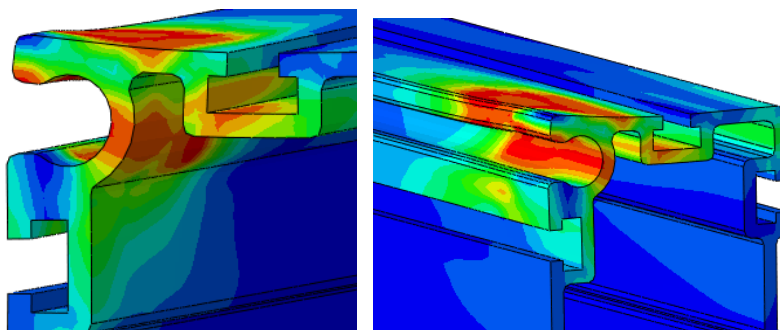
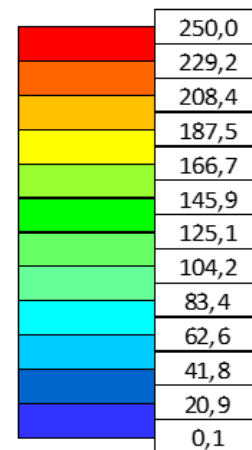
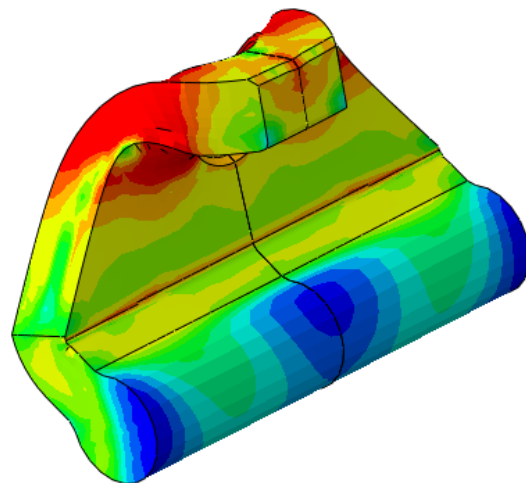
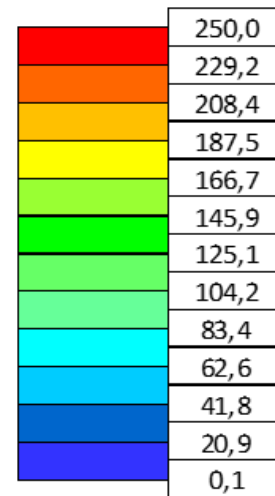
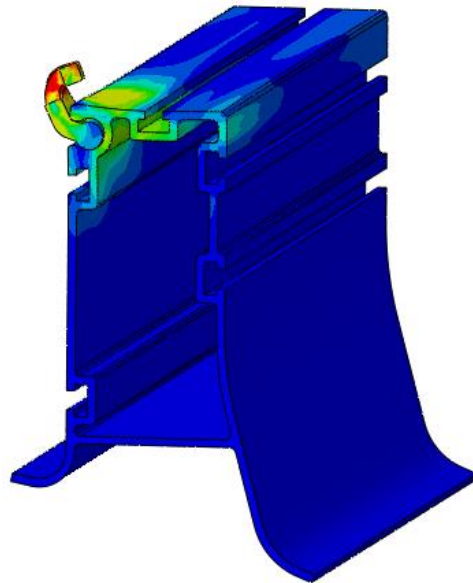


Ilustración A1. Tensión Von Mises en el modelo 1

MODELO 1. TENSIÓN DE VON MISES (MPa)

Caída hacia el mismo opuesto del vehículo



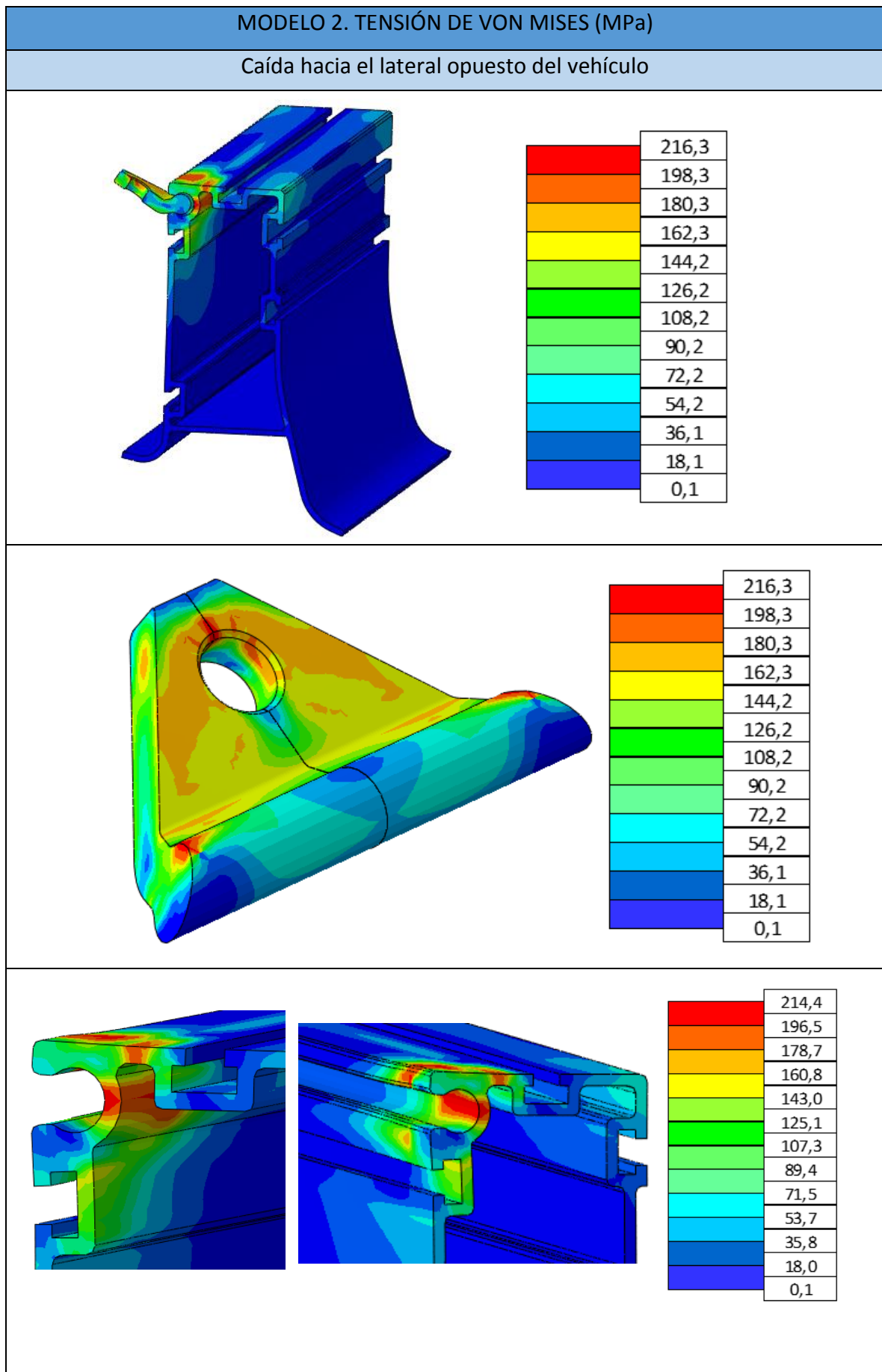
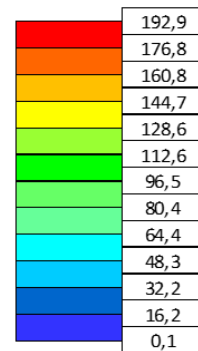
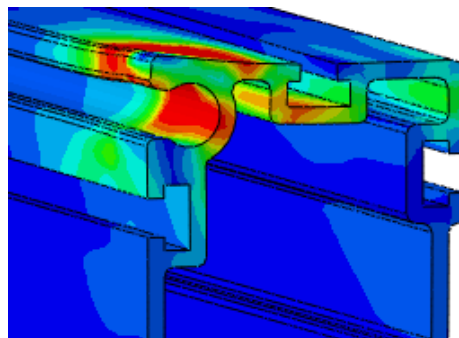
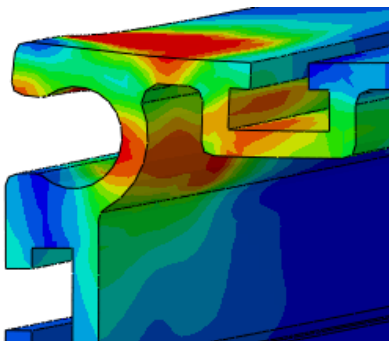
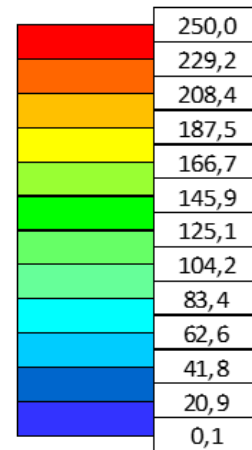
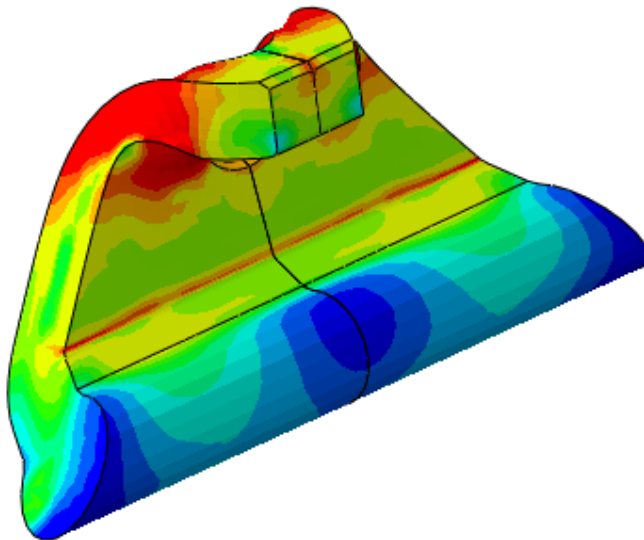
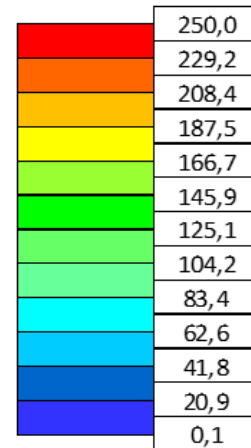
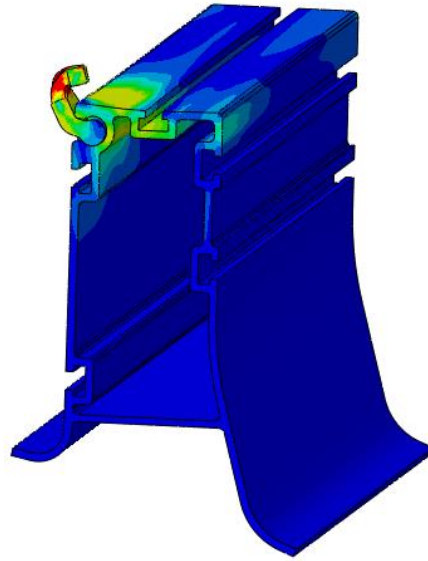


Ilustración A2. Tensión Von Mises en el modelo 2

MODELO 2. Tensión de VON MISES (MPa)

Caída hacia el mismo opuesto del vehículo



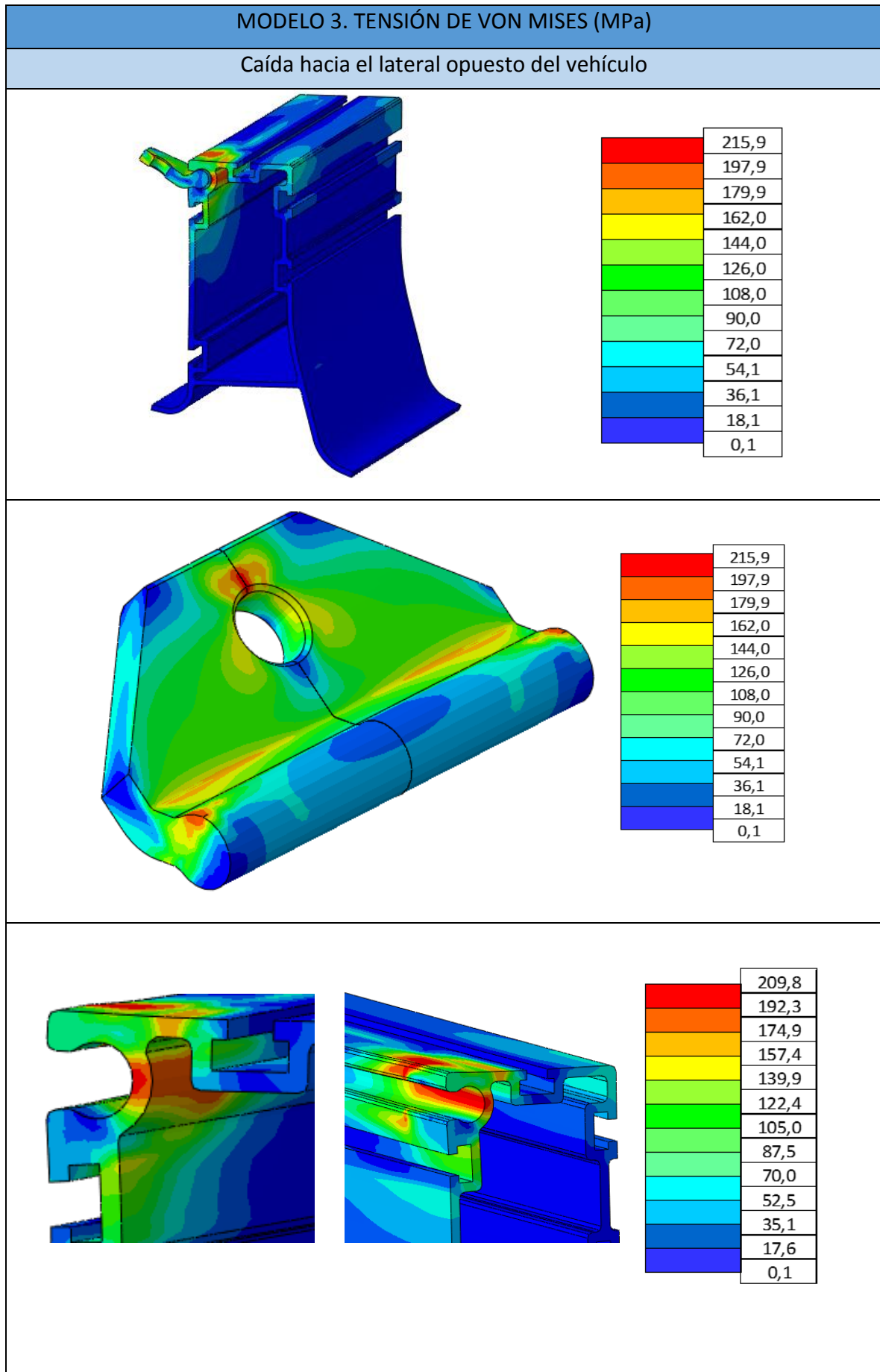
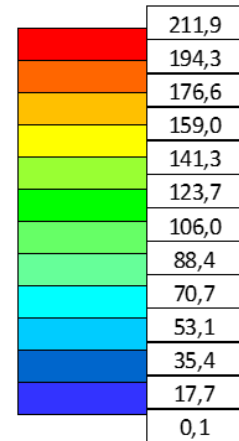
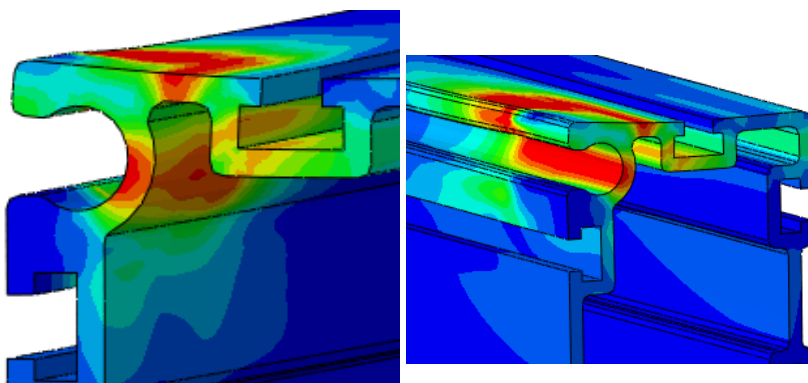
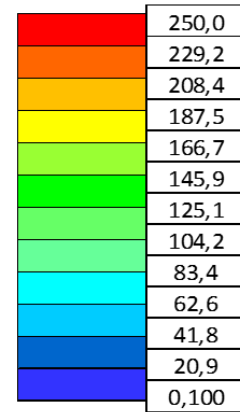
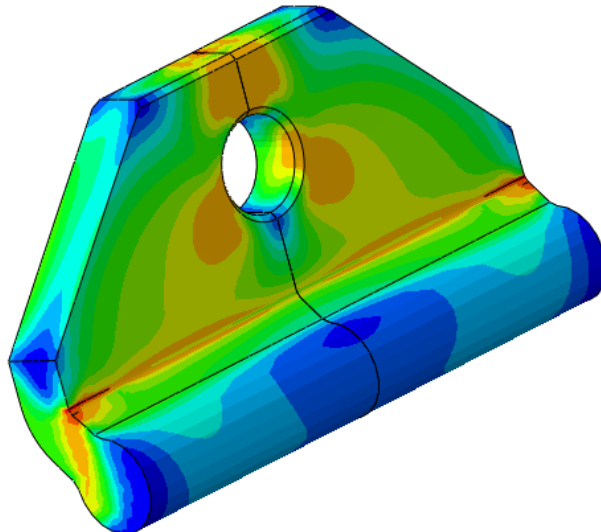
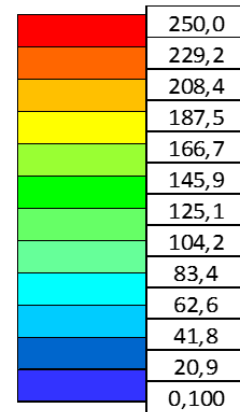
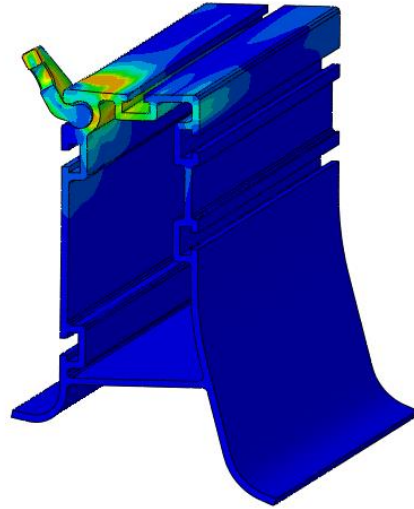


Ilustración A3. Tensión Von Mises en el modelo 3

MODELO 3. Tensión de VON MISES (MPa)

Caída hacia el mismo opuesto del vehículo



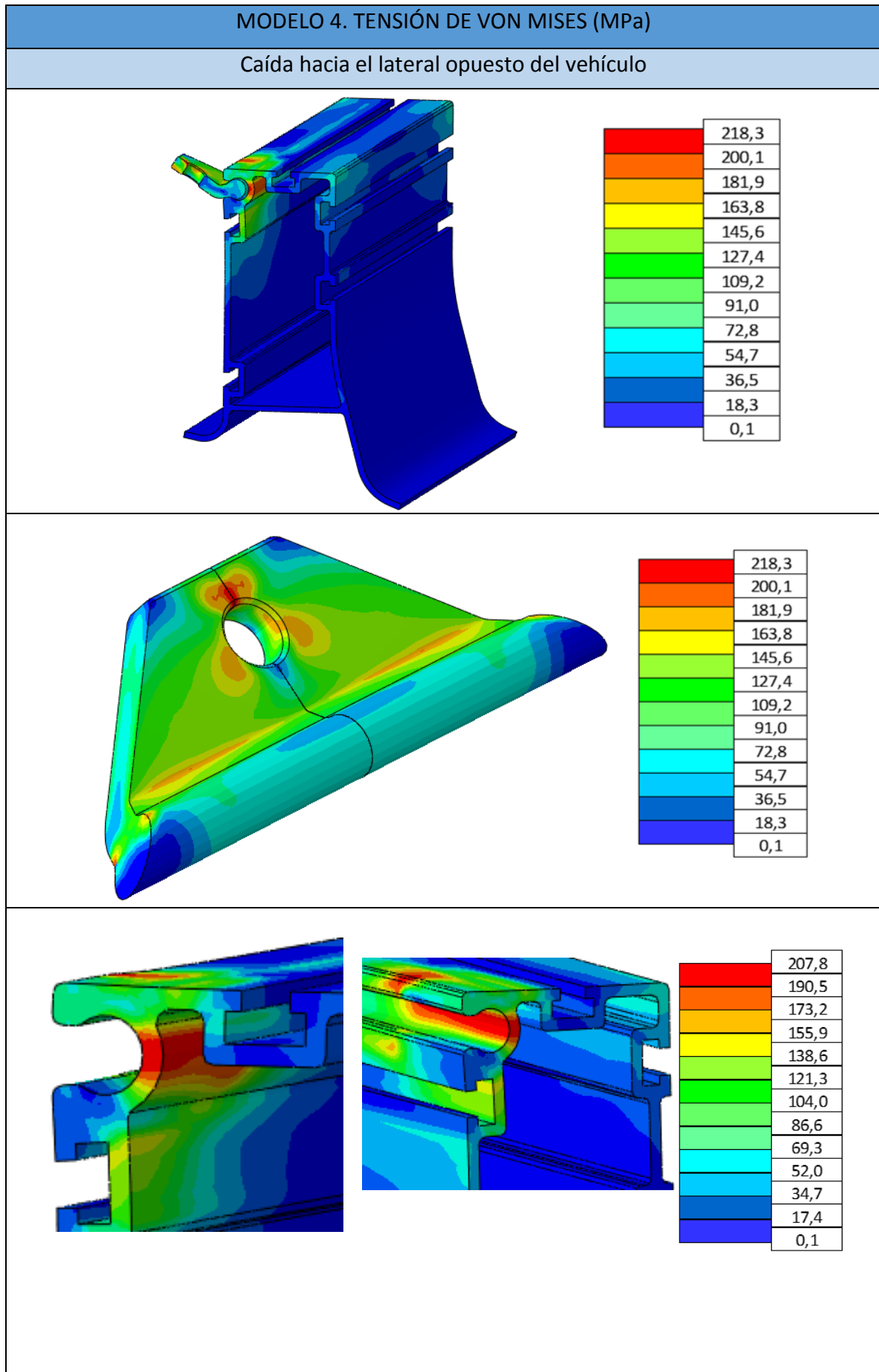
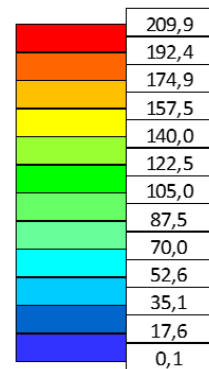
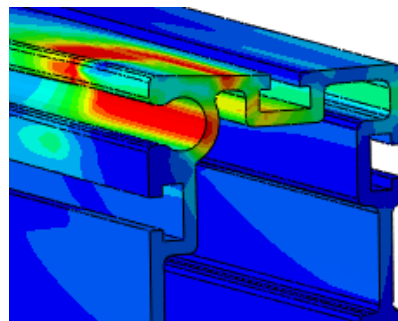
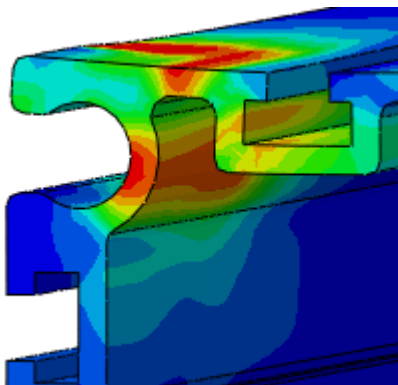
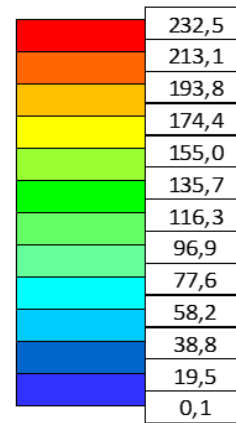
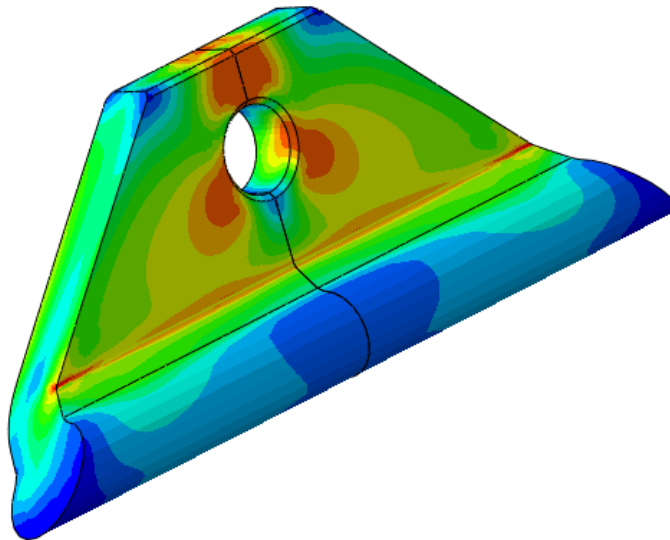
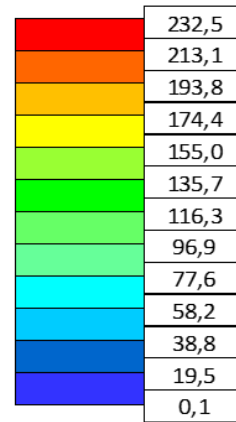
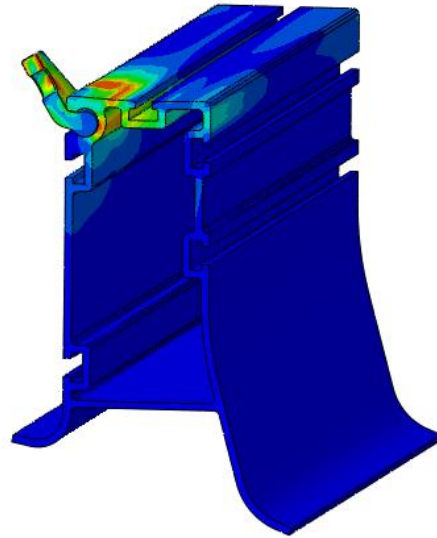


Ilustración A4. Tensión Von Mises en el modelo 4

MODELO 4. TENSIÓN DE VON MISES (MPa)

Caída hacia el mismo opuesto del vehículo



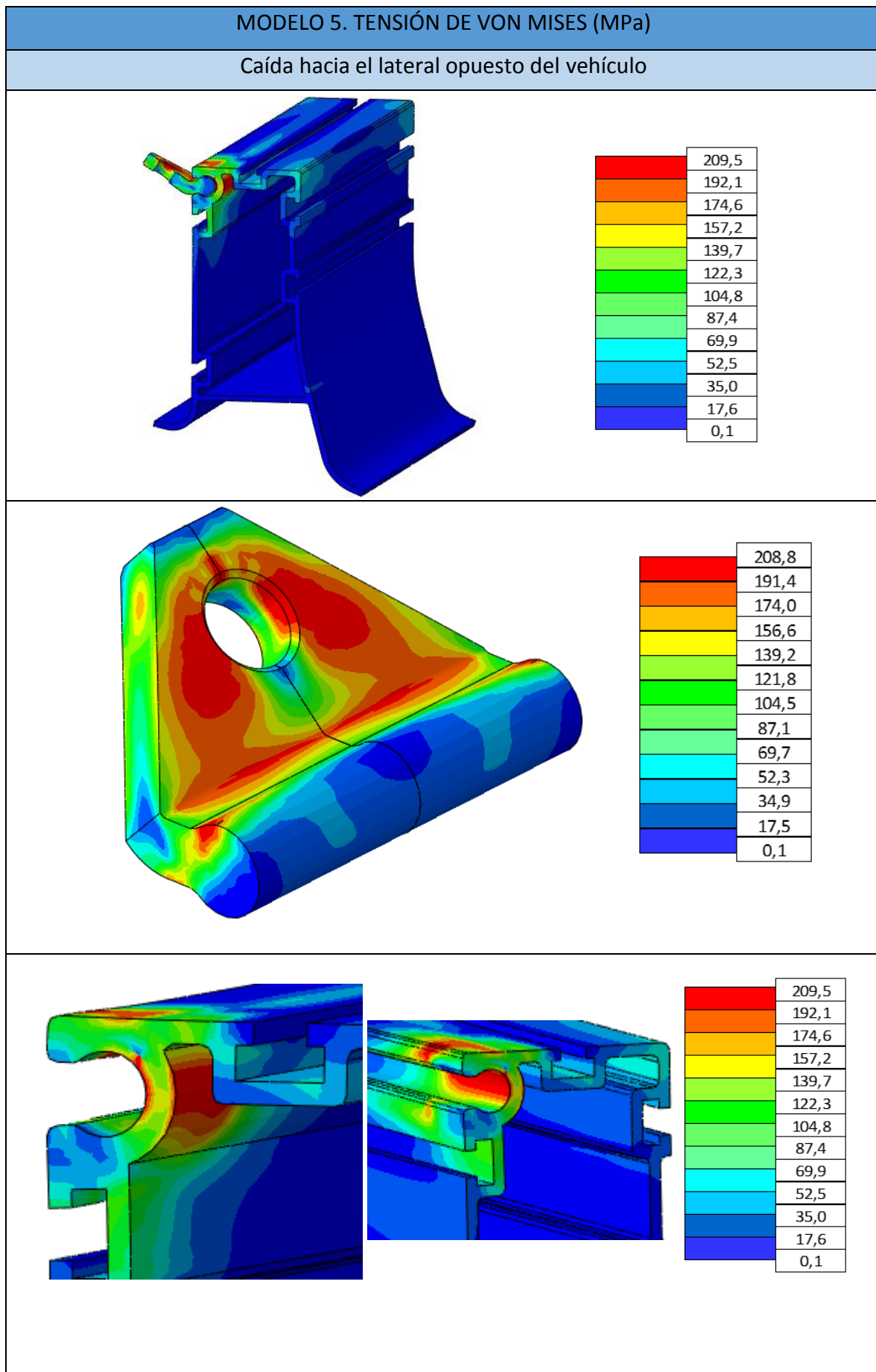
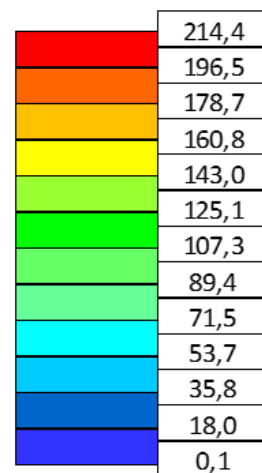
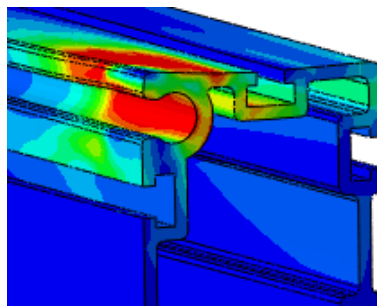
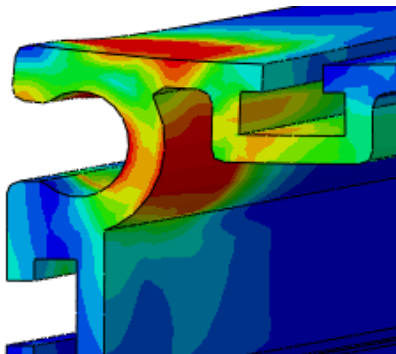
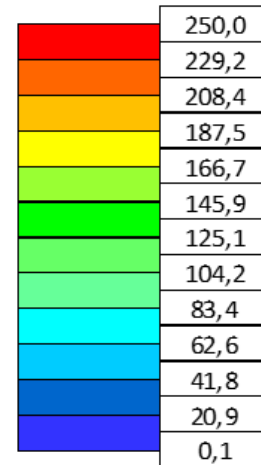
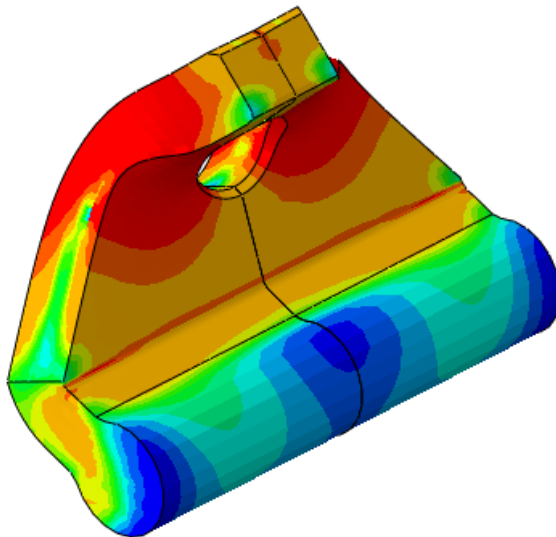
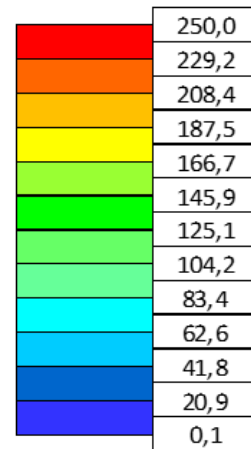
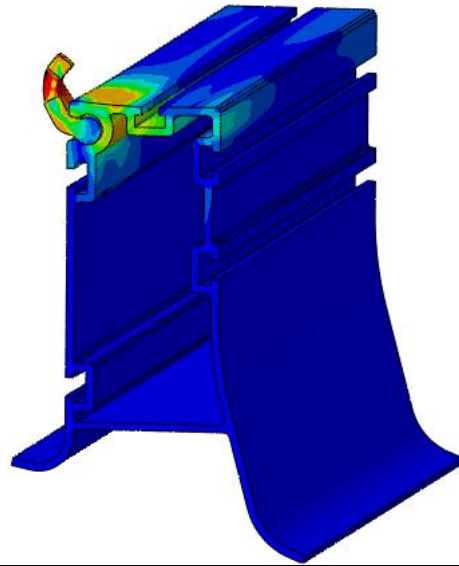


Ilustración A5. Tensión Von Mises en el modelo 5

MODELO 5. Tensión de VON MISES (MPa)

Caída hacia el mismo opuesto del vehículo



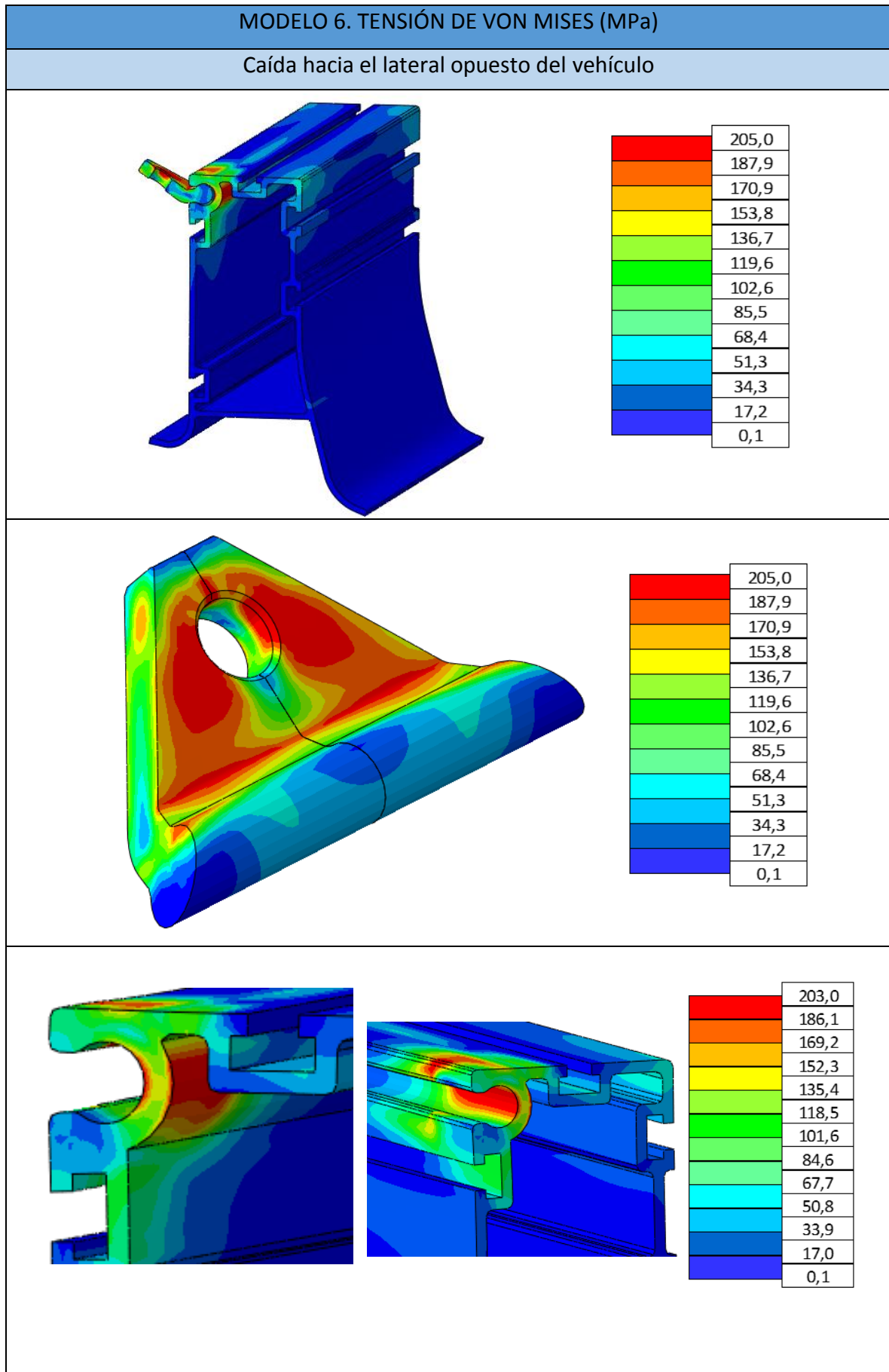
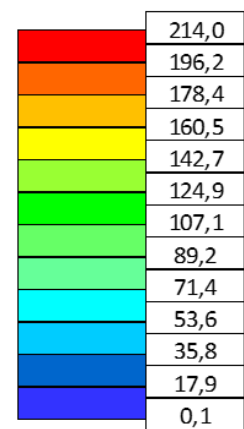
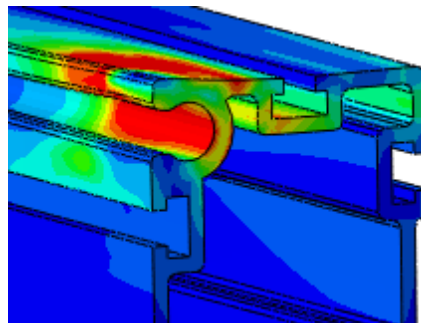
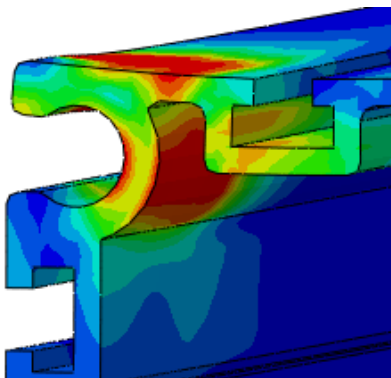
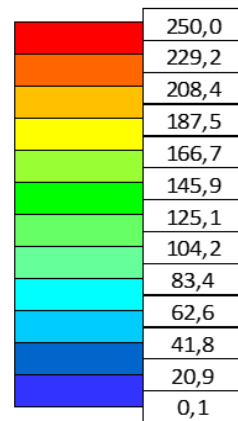
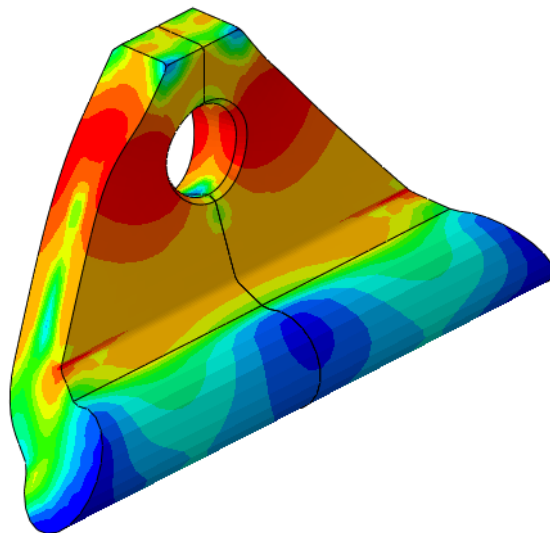
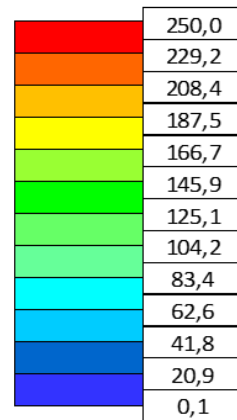
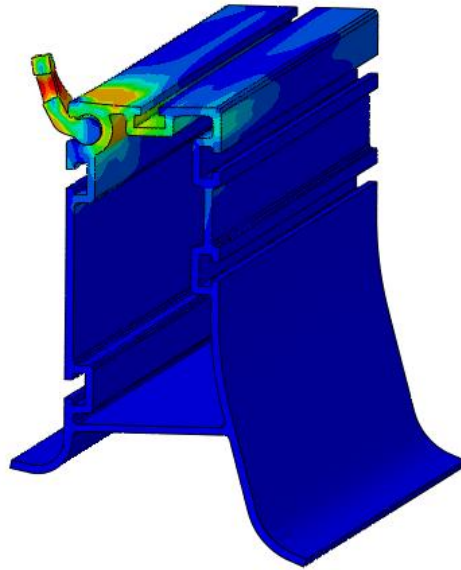


Ilustración A6. Tensión Von Mises en el modelo 6

MODELO 6. Tensión DE VON MISES (MPa)

Caída hacia el mismo opuesto del vehículo



MODELO 7. Tensión DE VON MISES (MPa)

Caída hacia el lateral opuesto del vehículo

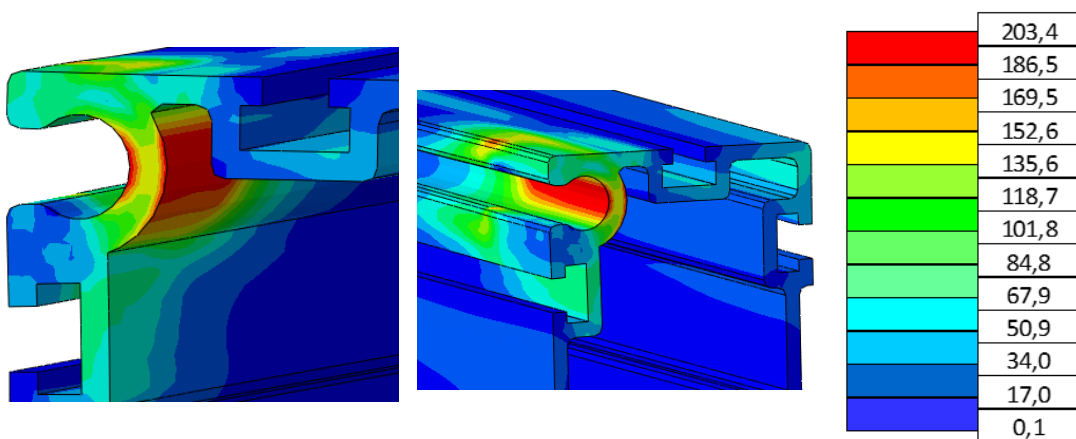
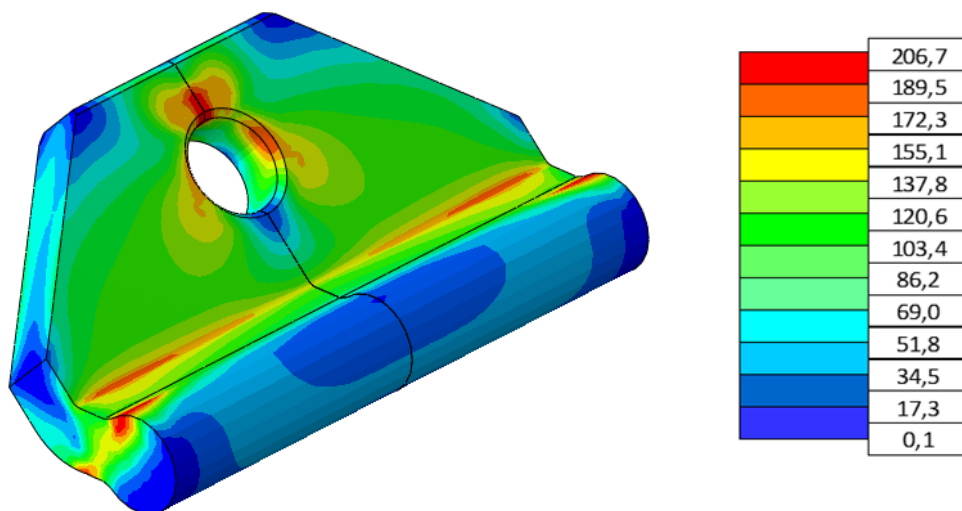
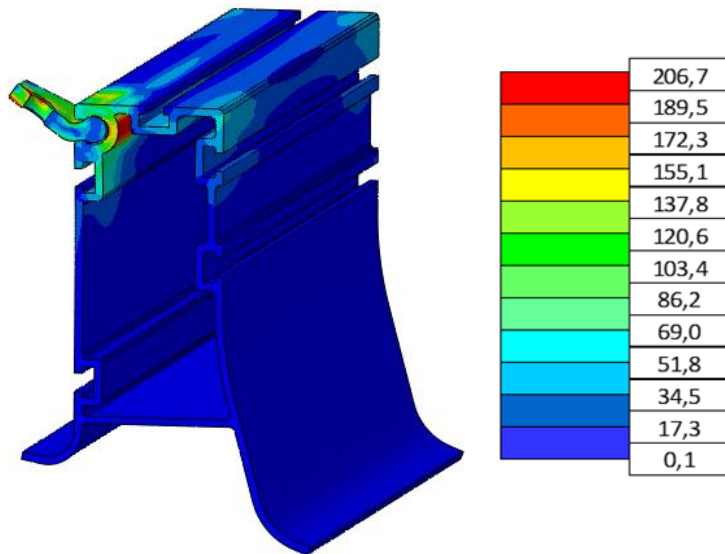
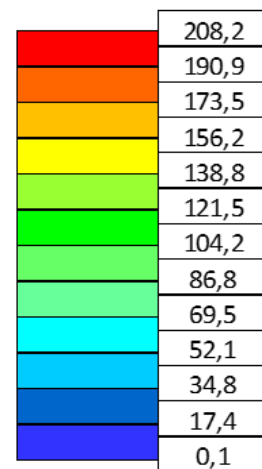
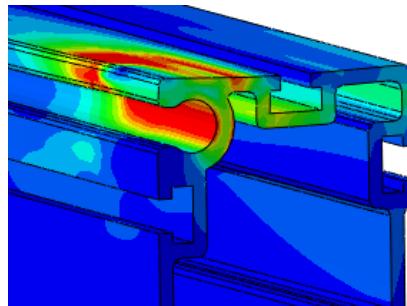
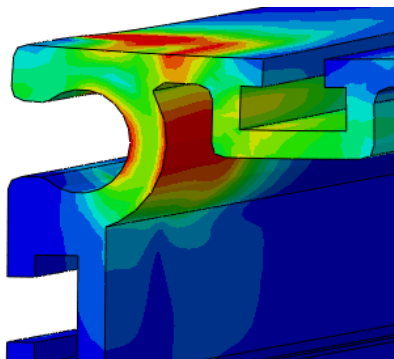
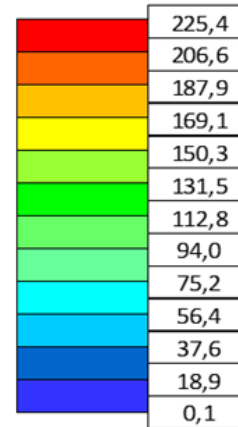
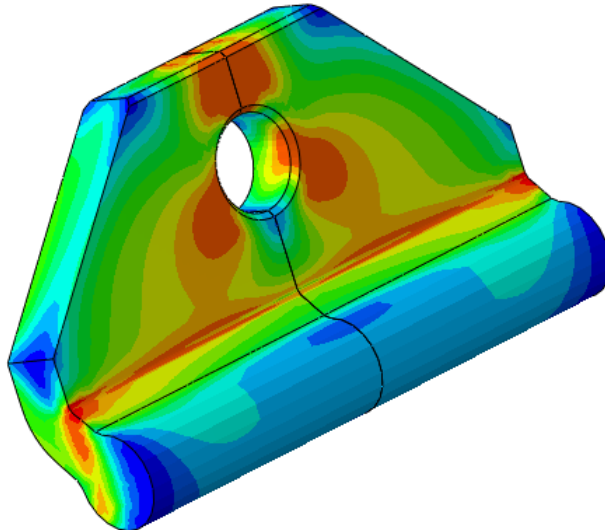
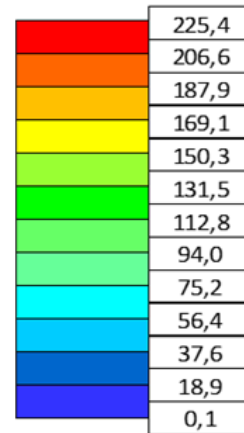
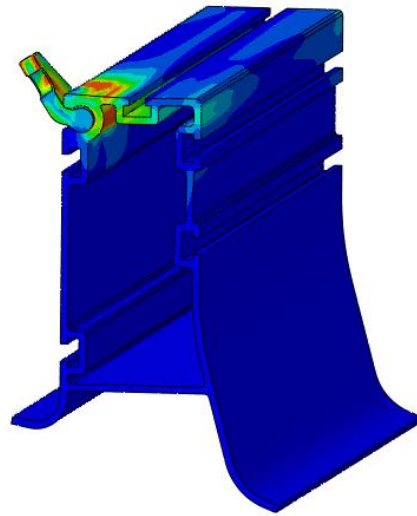


Ilustración A7. Tensión Von Mises en el modelo 7

MODELO 7. TENSIÓN DE VON MISES (MPa)

Caída hacia el mismo opuesto del vehículo



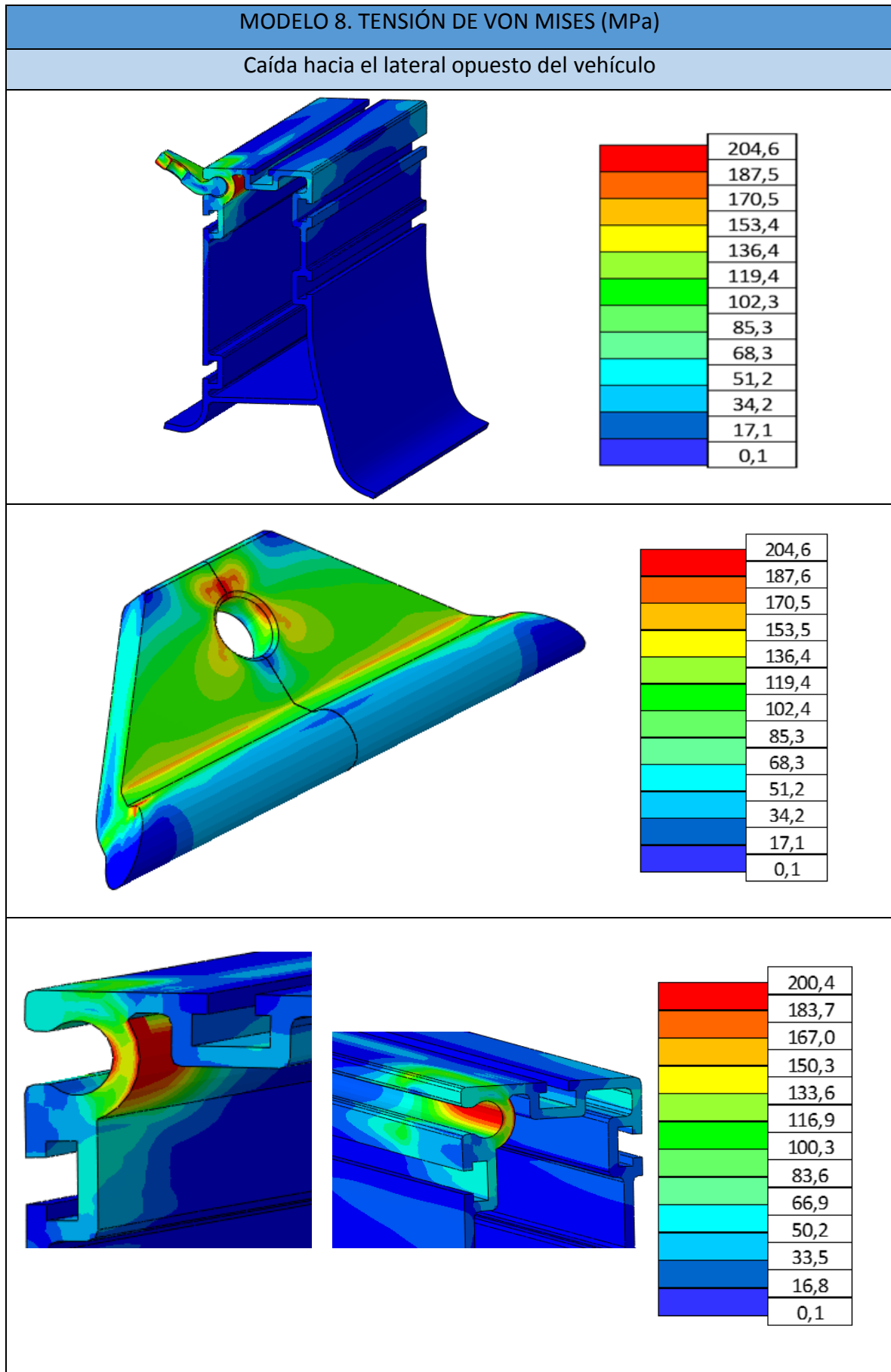
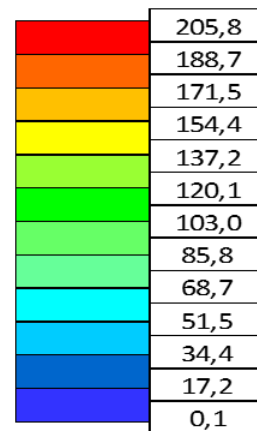
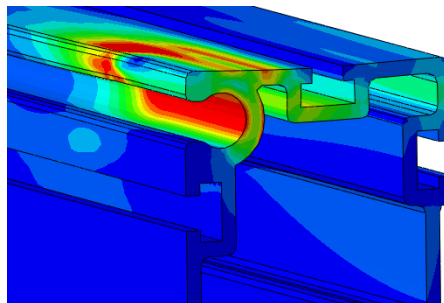
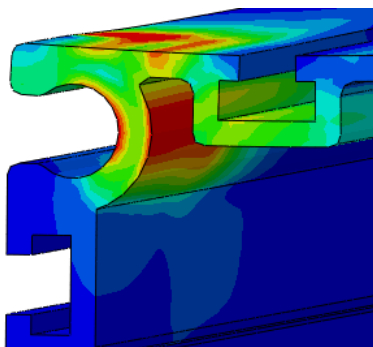
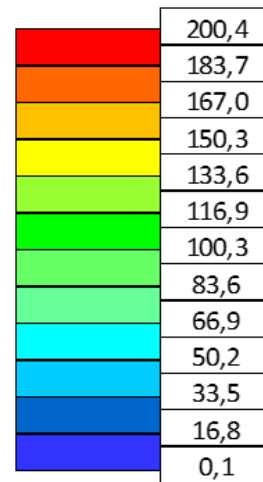
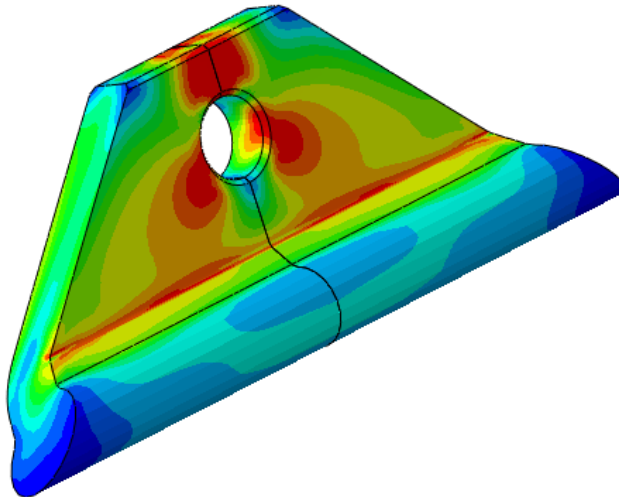
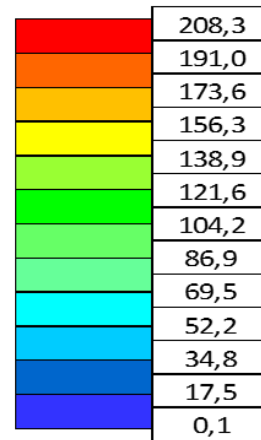
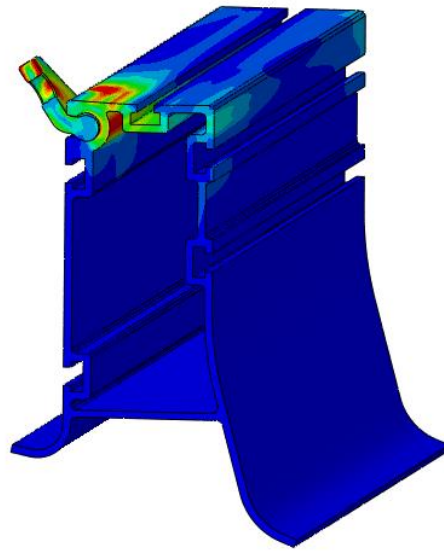


Ilustración A8. Tensión Von Mises en el modelo 8

MODELO 8. TENSIÓN DE VON MISES (MPa)

Caída hacia el mismo opuesto del vehículo



Anexo 2: Deformación plástica

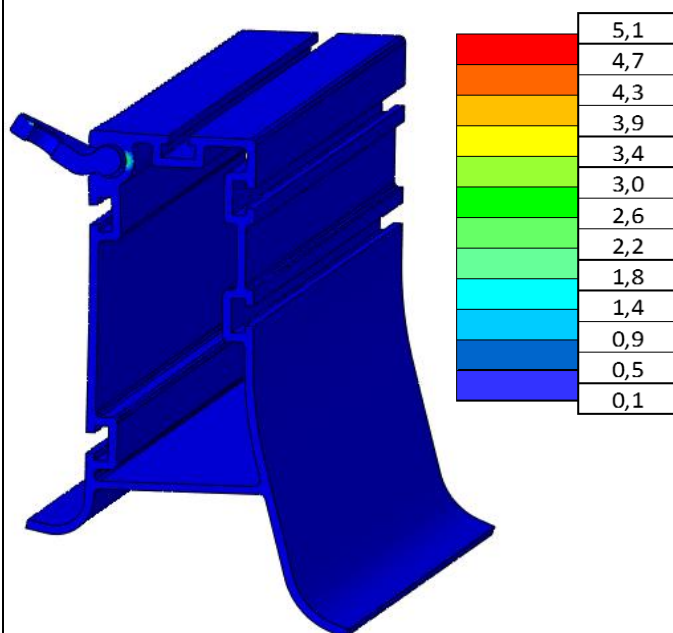
En este Anexo se encuentran las deformaciones plásticas del conjunto de la línea de vida de todos los modelos analizados, para ambos lados de la caída.

Para los modelos 1, 2, 5 y 6, se ve en las imágenes la gran deformación que sufre la corredera. Además de estos 4 casos, el modelo 3 también sobre pasa el porcentaje de alargamiento máximo del material, 8%.

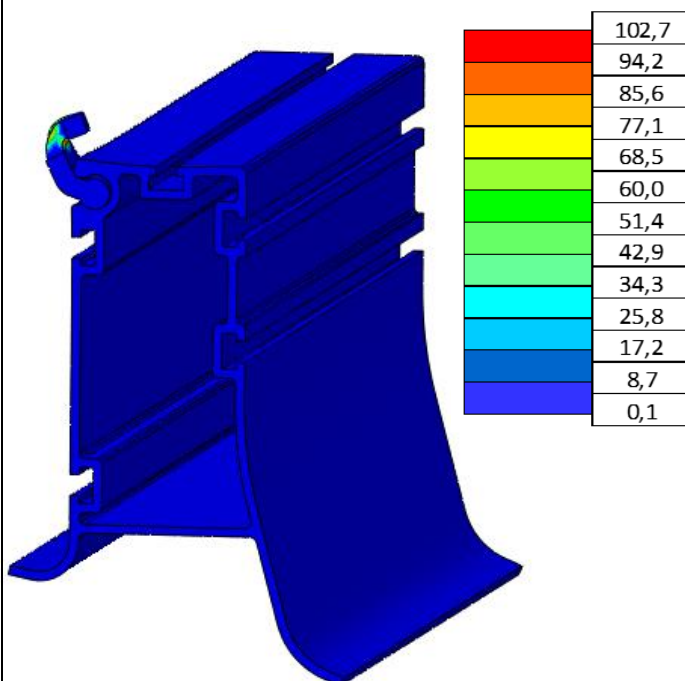
Por tanto esos modelos quedarán descartados, de cara a la elección del diseño óptimo.

MODELO 1. DEFORMACIÓN PLÁSTICA (%)

Caída hacia el lateral opuesto del vehículo

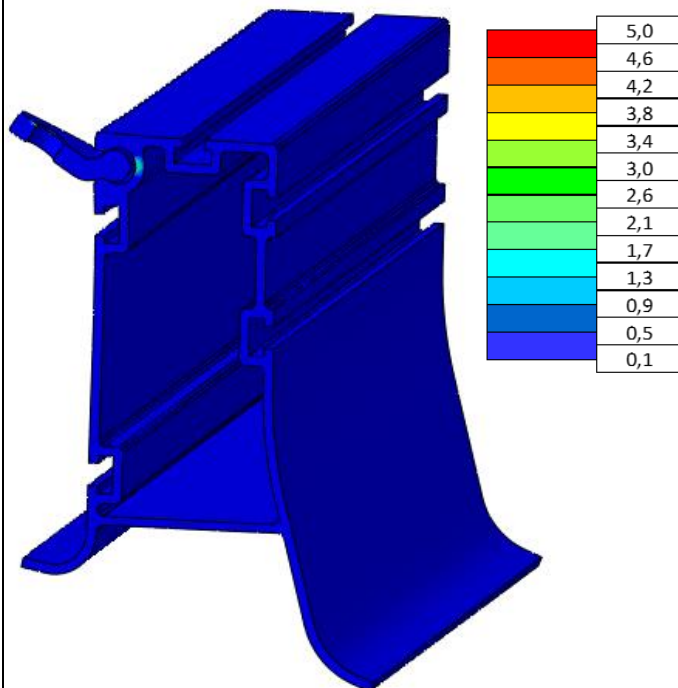


Caída hacia el mismo lateral del vehículo



MODELO 2. DEFORMACIÓN PLÁSTICA (%)

Caída hacia el lateral opuesto del vehículo



Caída hacia el mismo lateral del vehículo

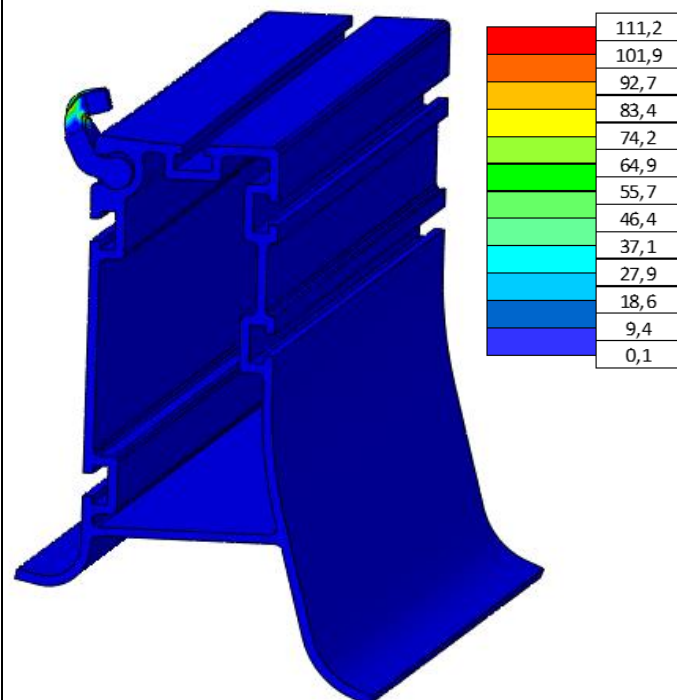
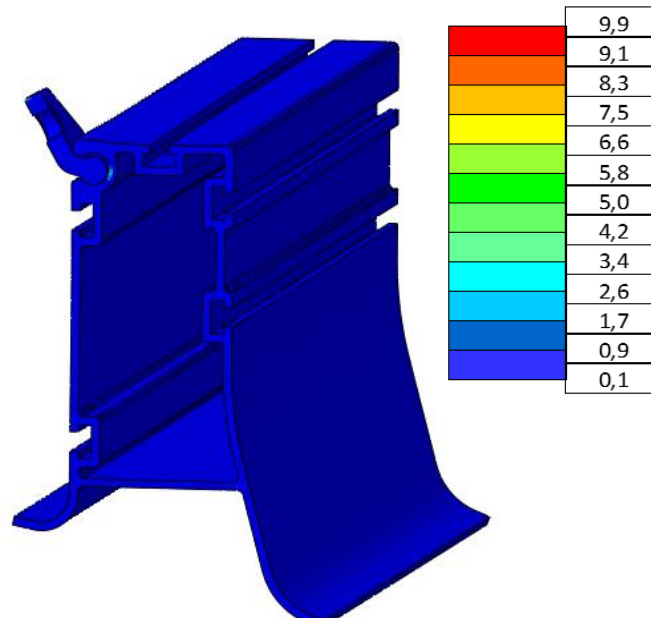
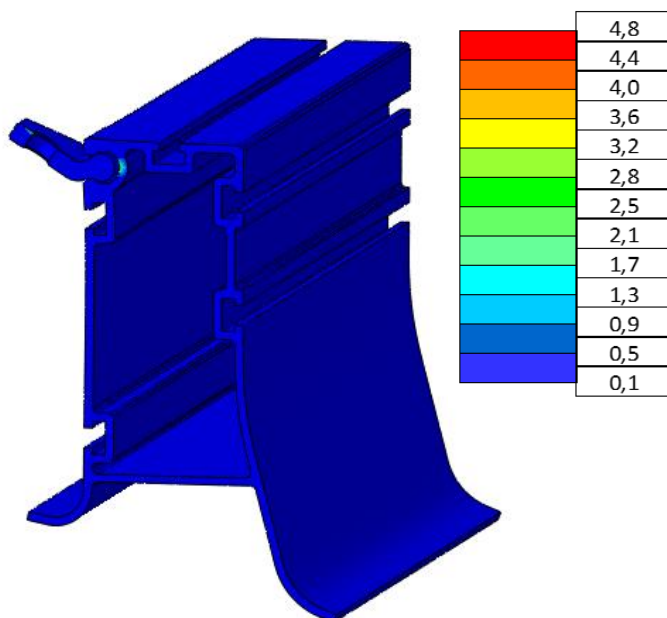


Ilustración A9. Deformación plástica modelos 1 y 2

MODELO 3. DEFORMACIÓN PLÁSTICA (%)

Caída hacia el lateral opuesto del vehículo

Caída hacia el mismo lateral del vehículo



MODELO 4. DEFORMACIÓN PLÁSTICA (%)

Caída hacia el lateral opuesto del vehículo

Caída hacia el mismo lateral del vehículo

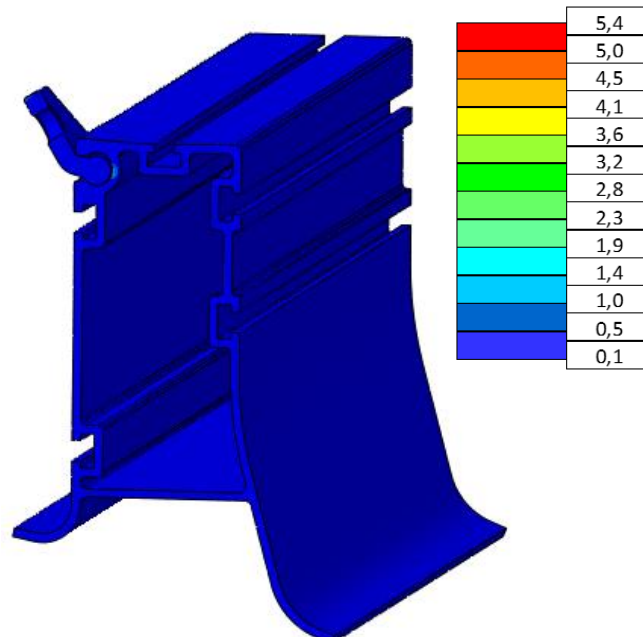
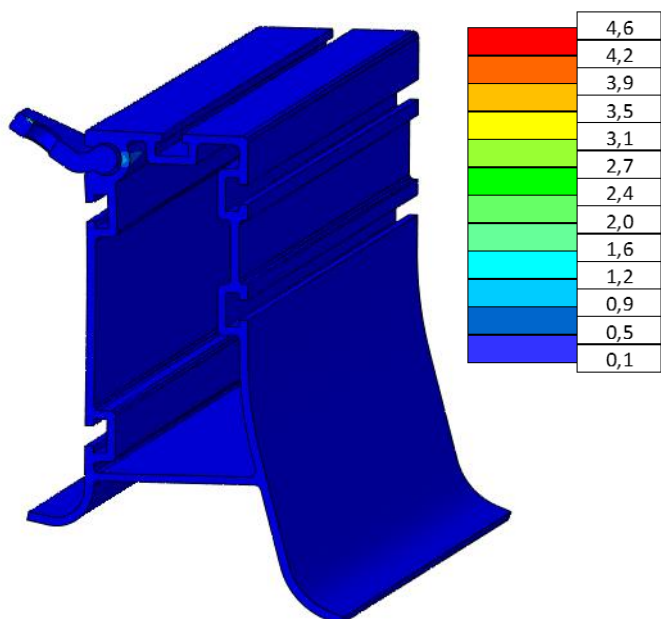
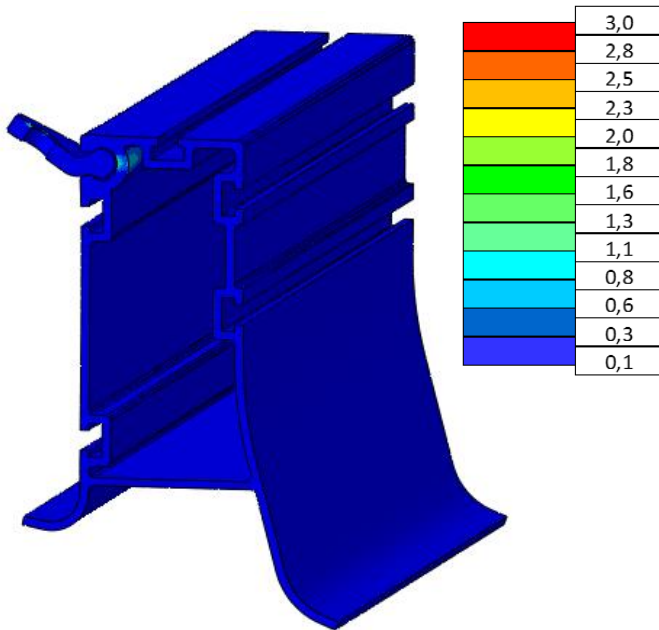


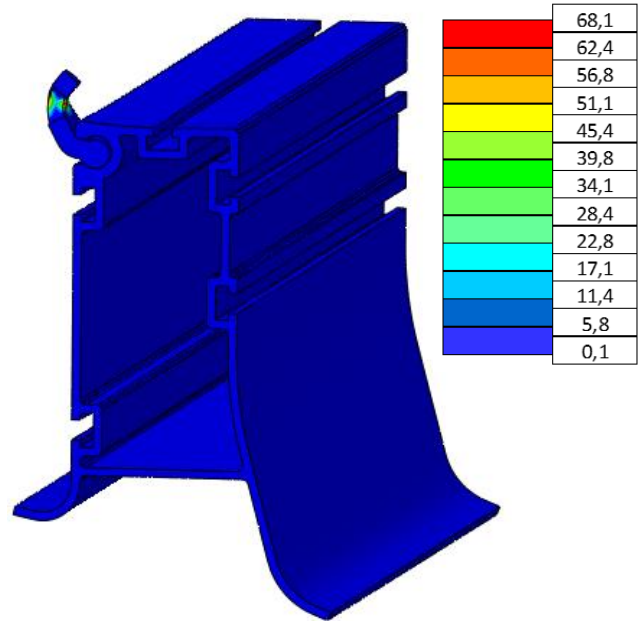
Ilustración A10. Deformación plástica modelos 3 y 4

MODELO 5. DEFORMACIÓN PLÁSTICA (%)

Caída hacia el lateral opuesto del vehículo

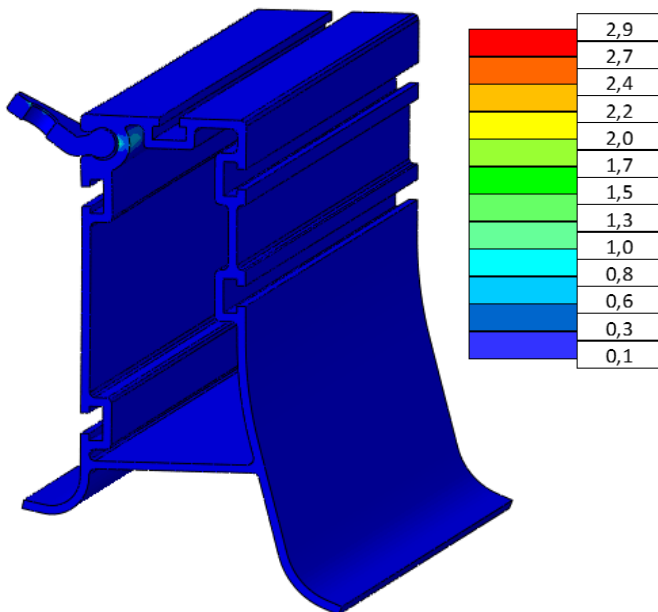


Caída hacia el mismo lateral del vehículo



MODELO 6. DEFORMACIÓN PLÁSTICA (%)

Caída hacia el lateral opuesto del vehículo



Caída hacia el mismo lateral del vehículo

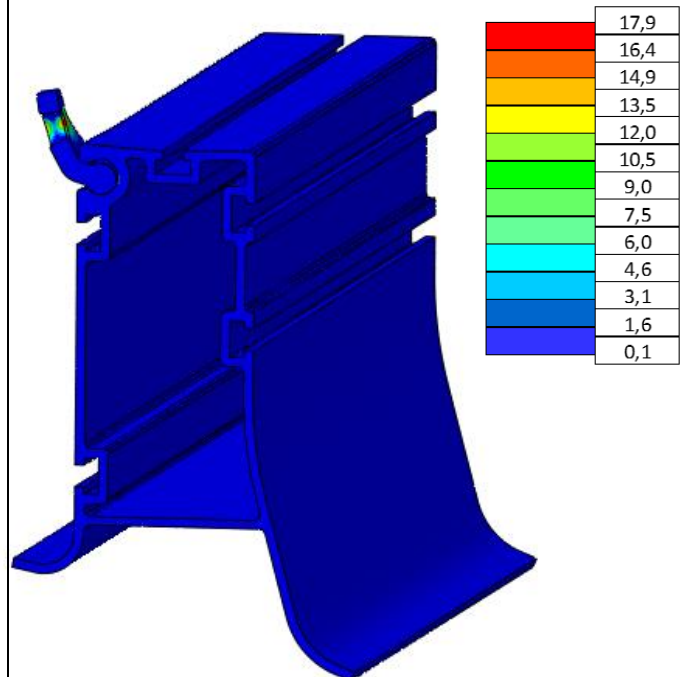
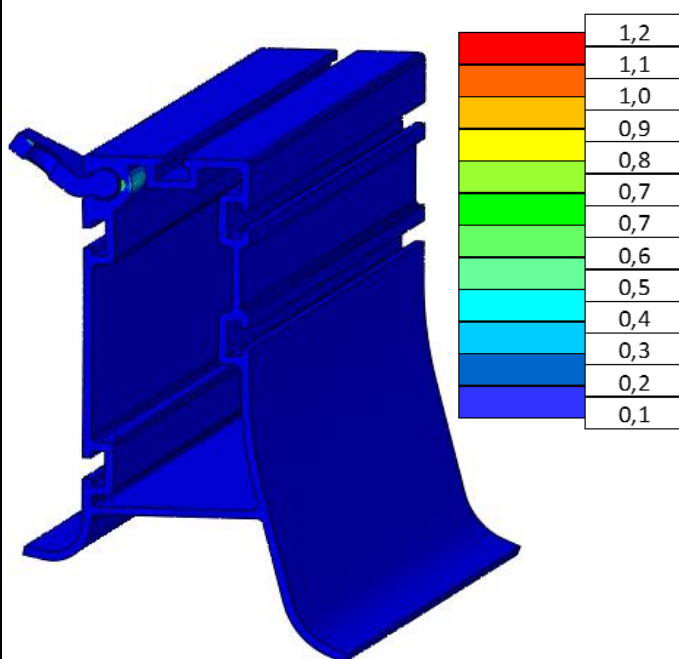


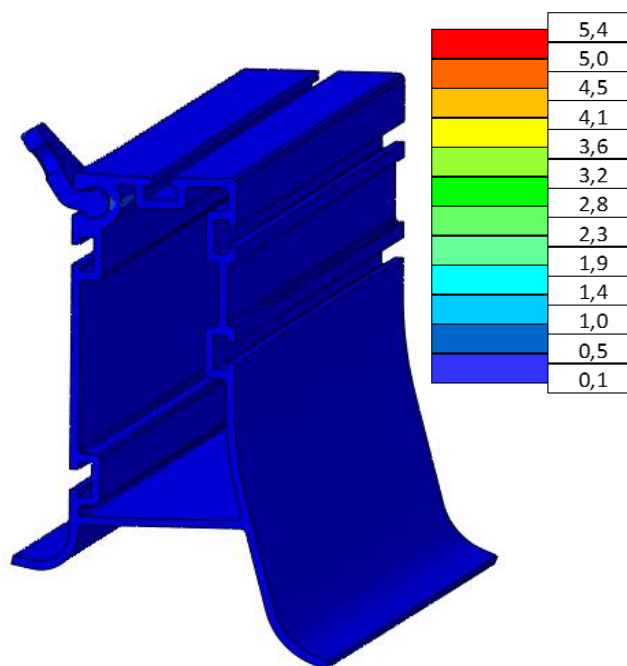
Ilustración A11. Deformación plástica modelos 5 y 6

MODELO 7. DEFORMACIÓN PLÁSTICA (%)

Caída hacia el lateral opuesto del vehículo

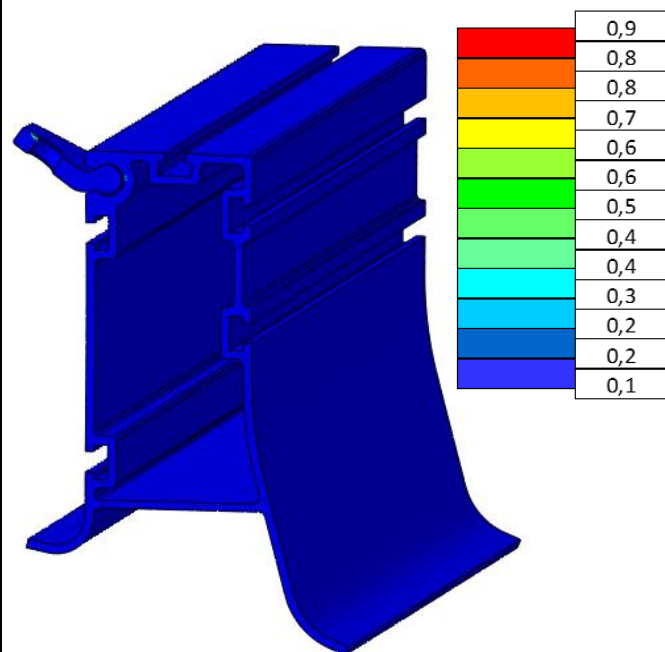


Caída hacia el mismo lateral del vehículo



MODELO 8. DEFORMACIÓN PLÁSTICA (%)

Caída hacia el lateral opuesto del vehículo



Caída hacia el mismo lateral del vehículo

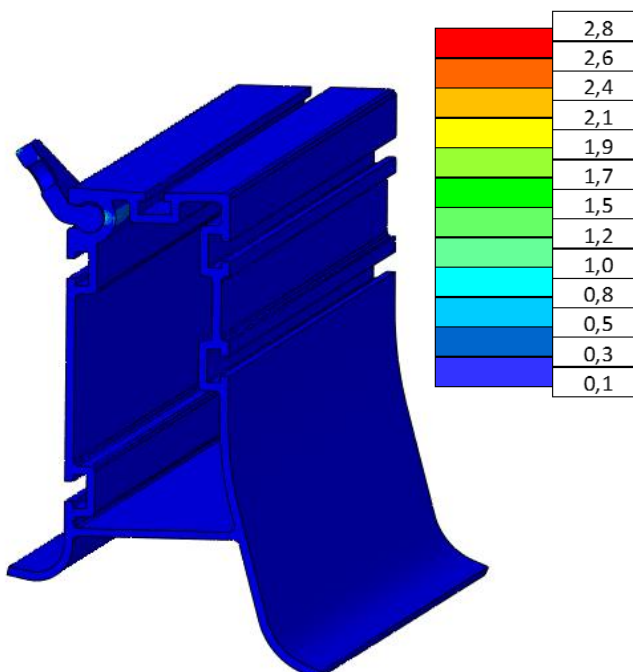


Ilustración A12. Deformación plástica modelos 7 y 8

Anexo 3: Aplicación límite elástico

En este Anexo se encuentra en la primera columna el cálculo de la tensión de Von Mises aplicando el límite elástico del aluminio 6005A-T6, 200 MPa, en la corredera y en el perfil, para todos los modelos analizados.

En la segunda columna, está a modo de comprobación, el cálculo de la deformación plástica de forma individual para la corredera y para el perfil.

Se aprecia que las zonas que sobrepasan el límite elástico (color gris), corresponden a las regiones en las que hay deformación plástica.

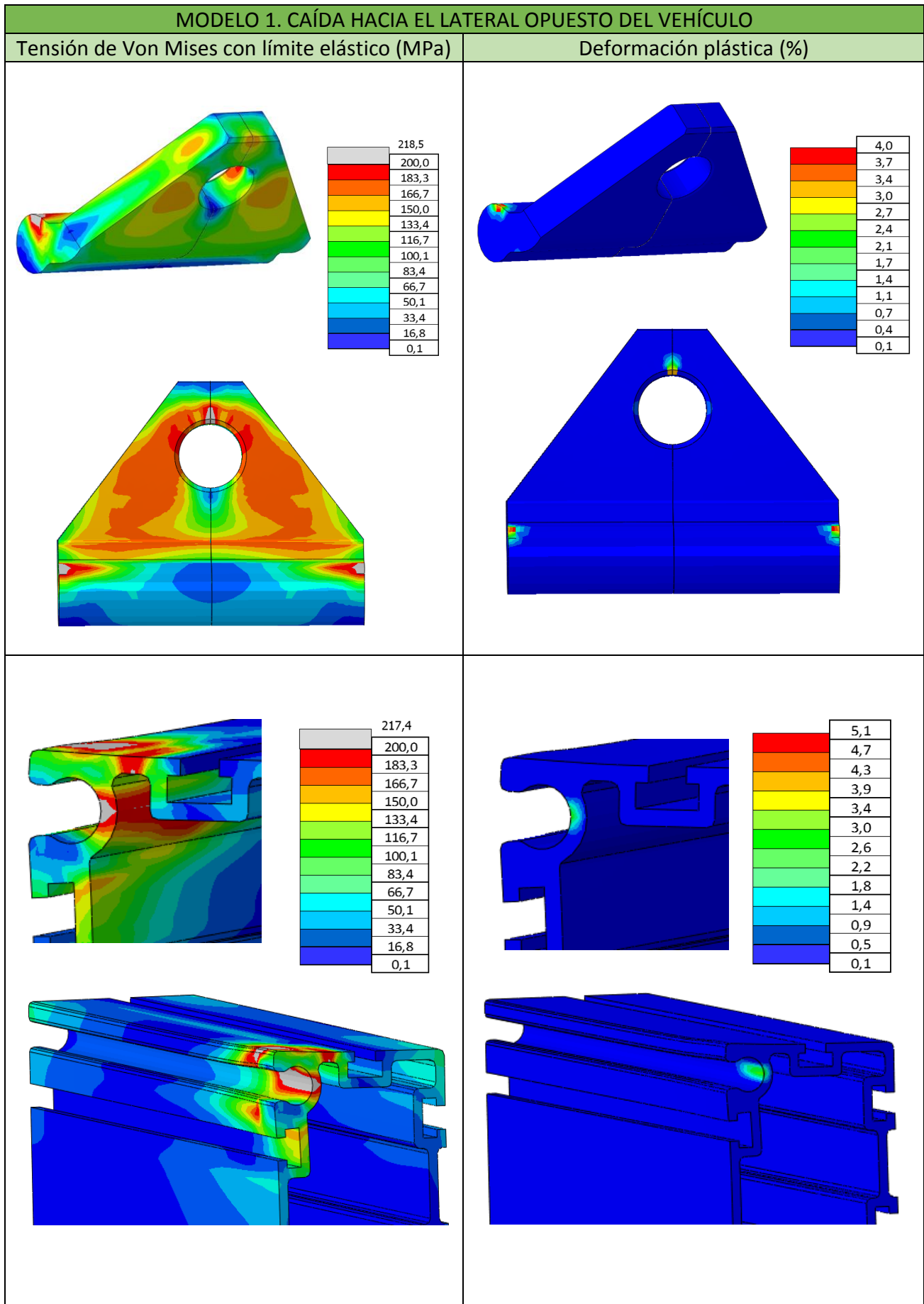
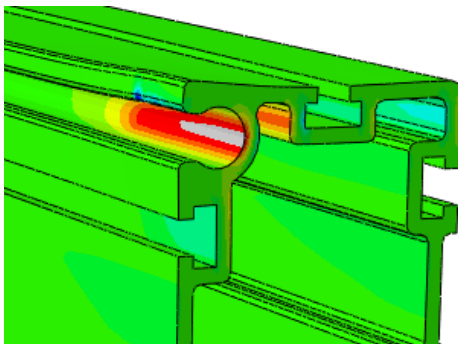
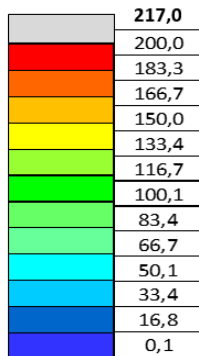
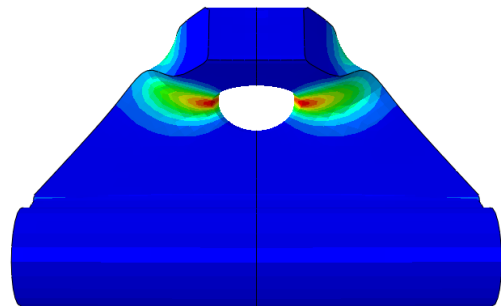
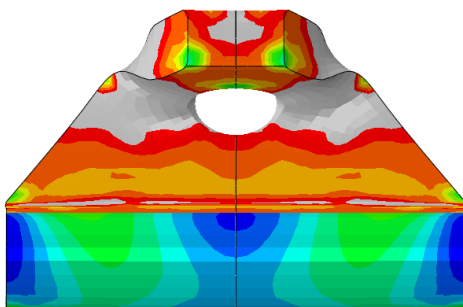
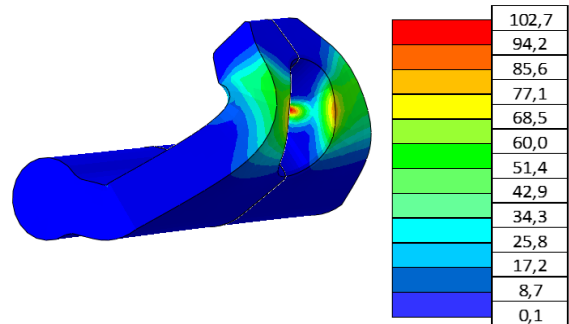
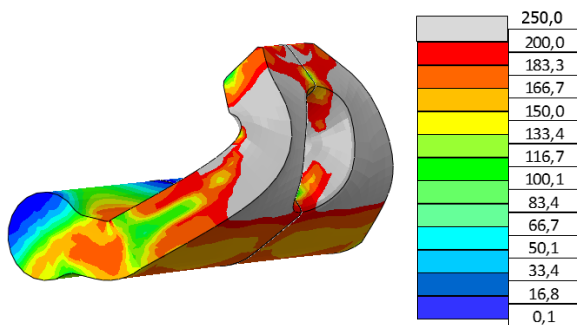


Ilustración A13. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 1

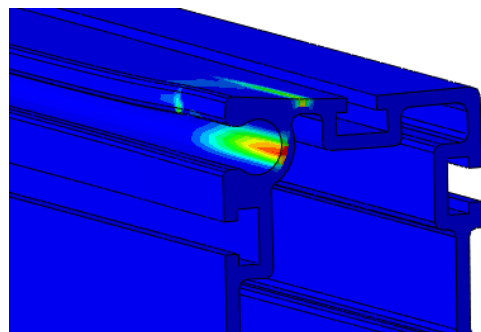
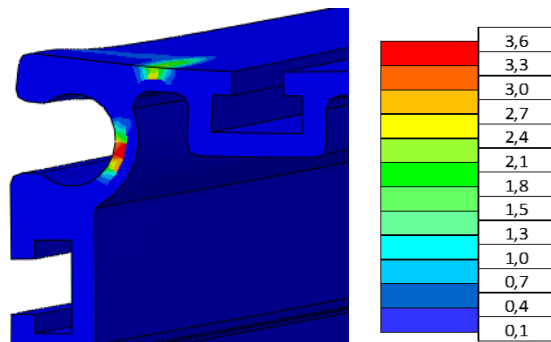
MODELO 1. CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO

Tensión de Von Mises con límite elástico (MPa)

Deformación plástica (%)



*En esta imagen se muestra las tensiones alcanzadas en S22, que es la vertical, aplicando el límite elástico.



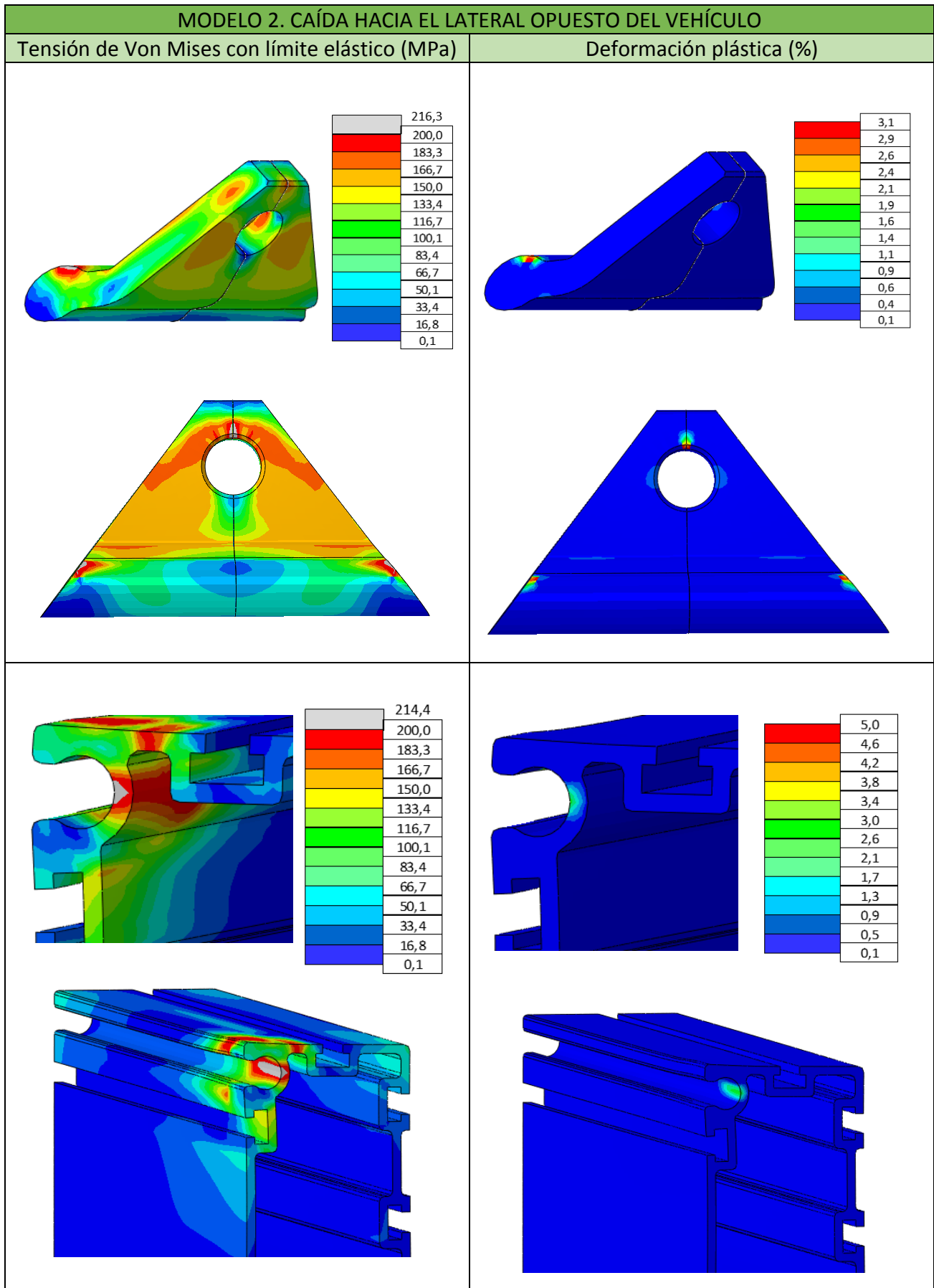
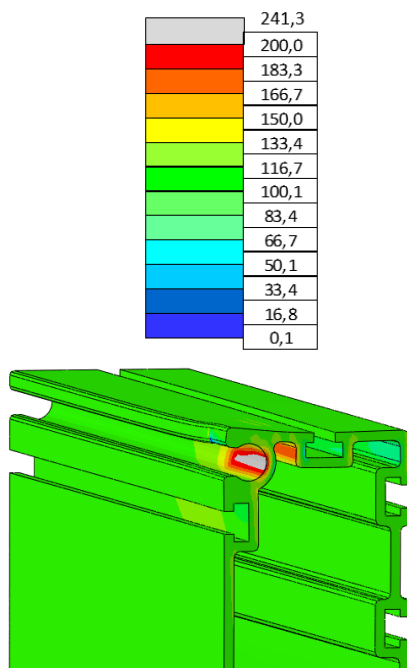
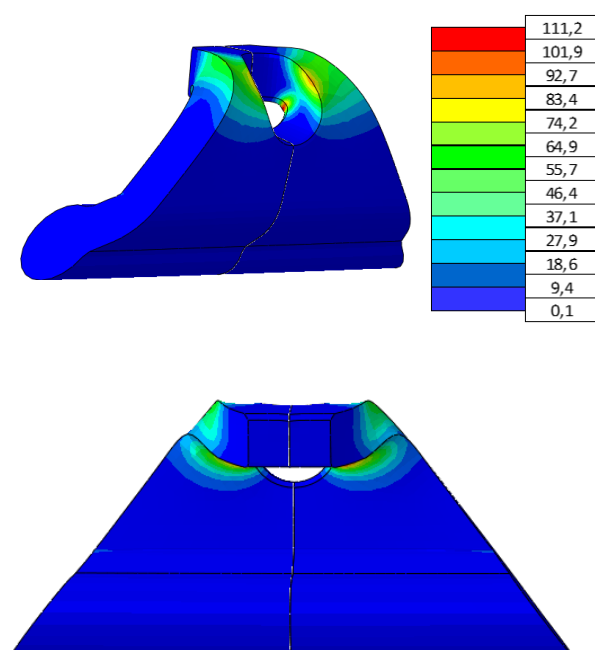
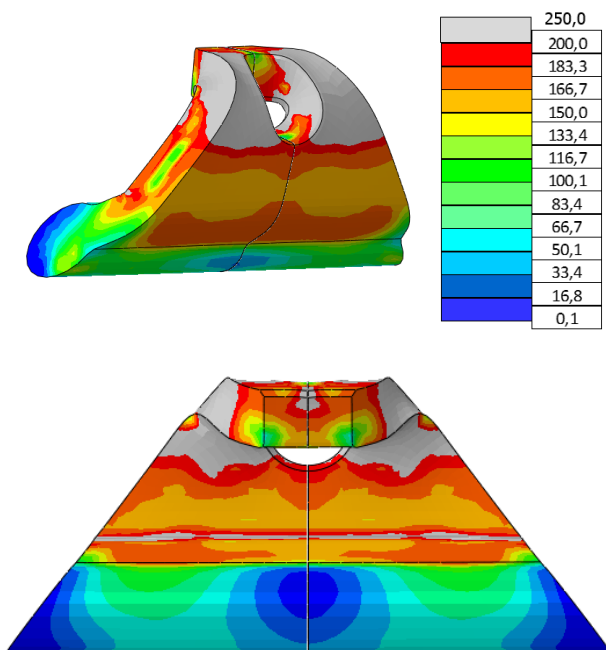


Ilustración A14. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 2

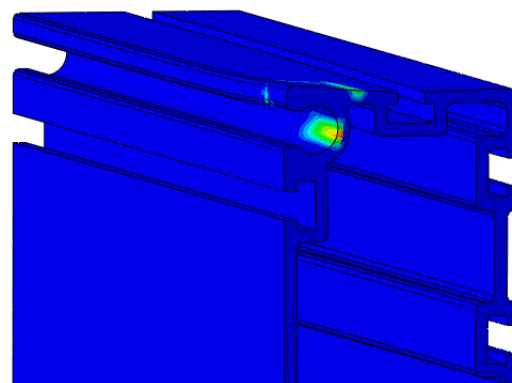
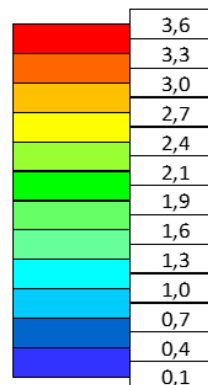
MODELO 2. CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO

Tensión de Von Mises con límite elástico (MPa)

Deformación plástica (%)



*En esta imagen se muestra las tensiones alcanzadas en S22, que es la vertical, aplicando el límite elástico.



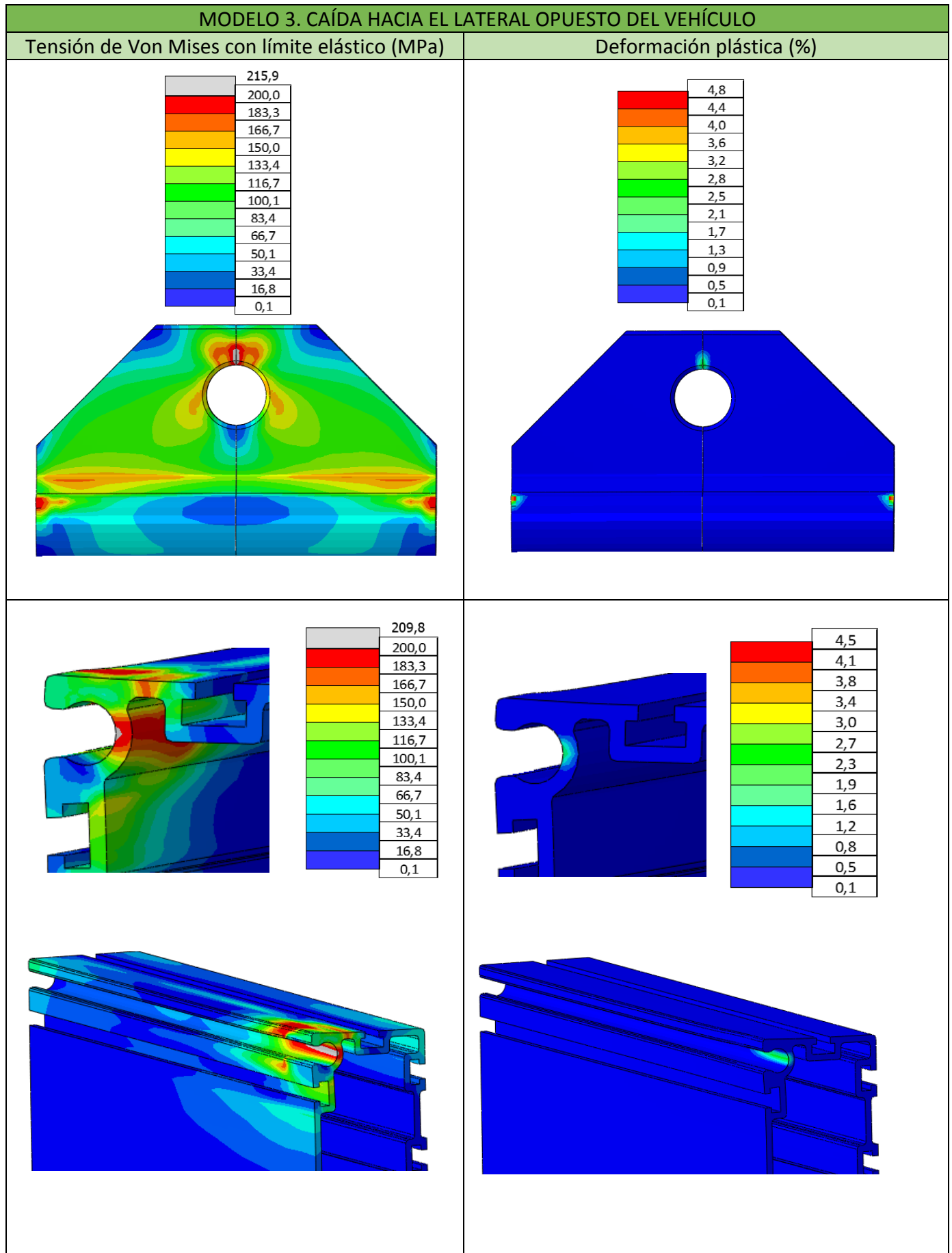
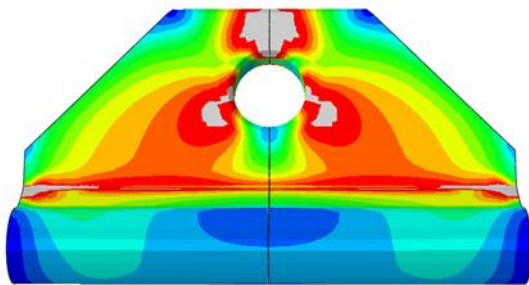
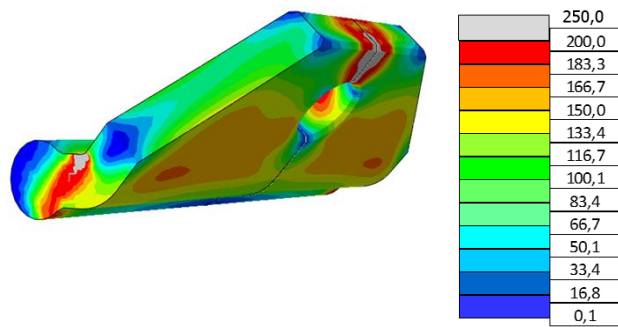


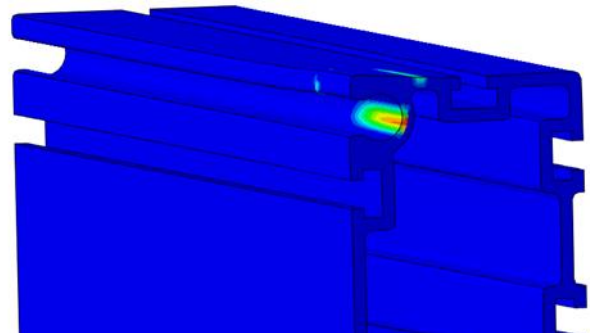
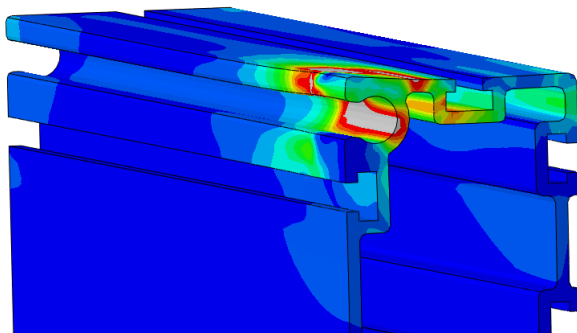
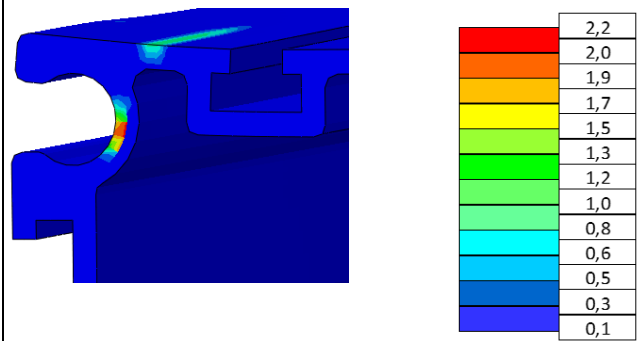
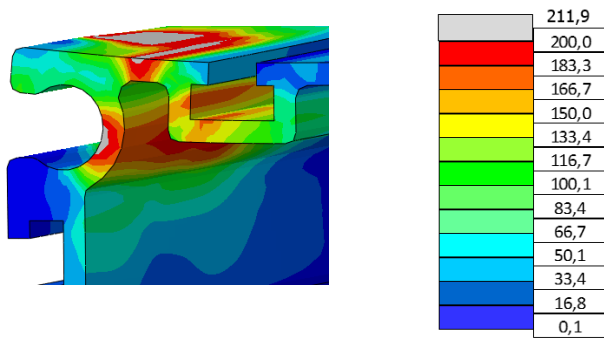
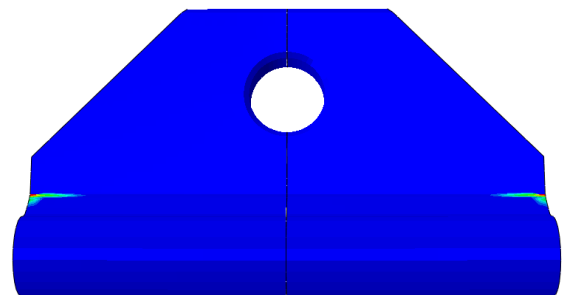
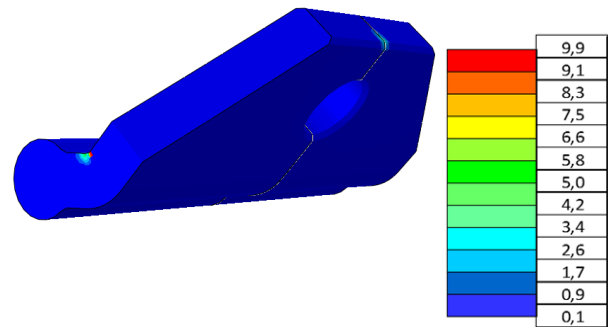
Ilustración A15. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 3

MODELO 3. CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO

Tensión de Von Mises con límite elástico (MPa)



Deformación plástica (%)



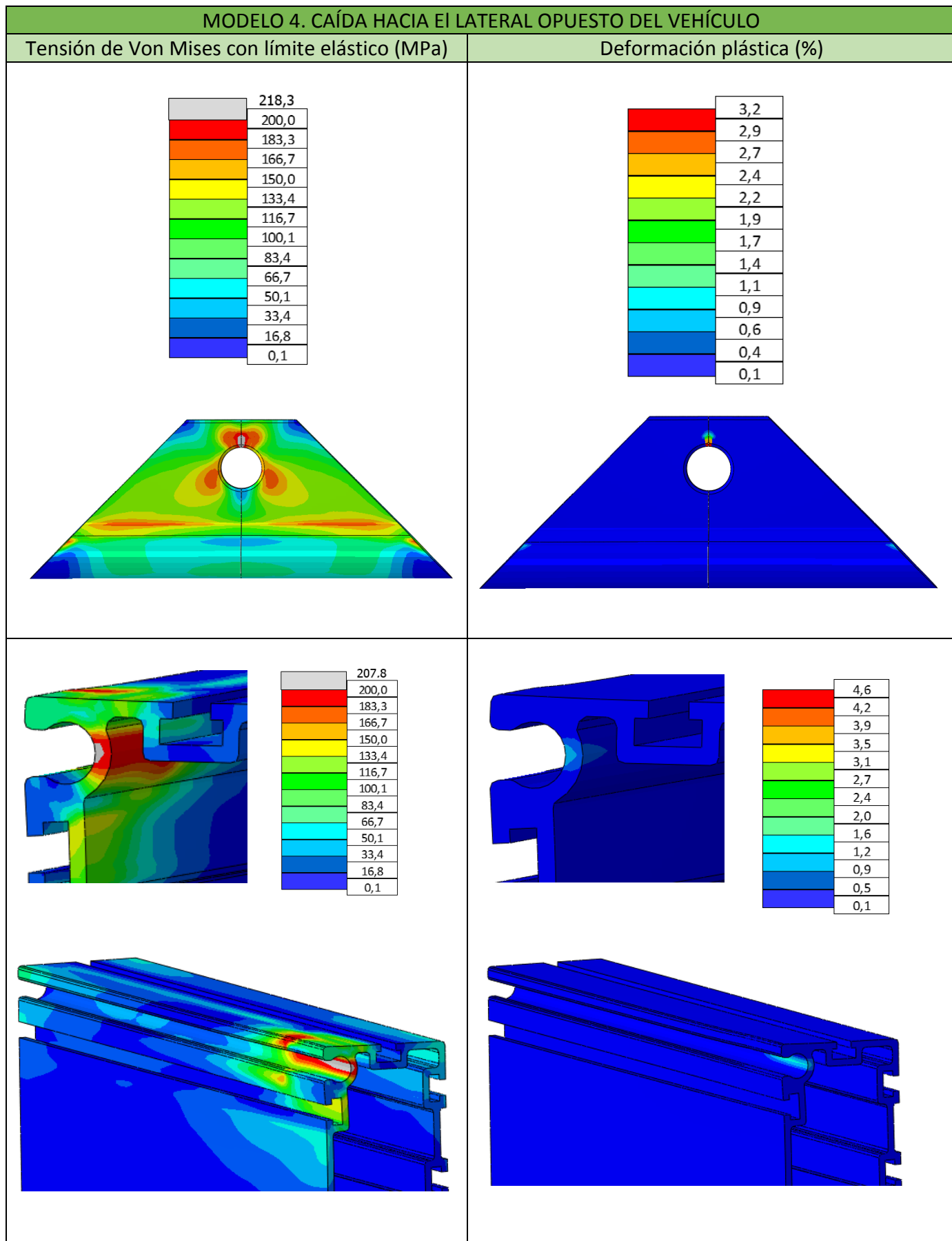
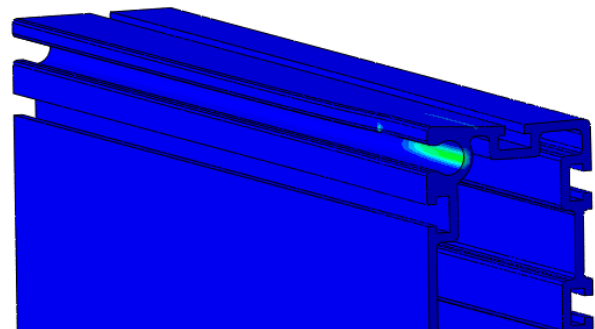
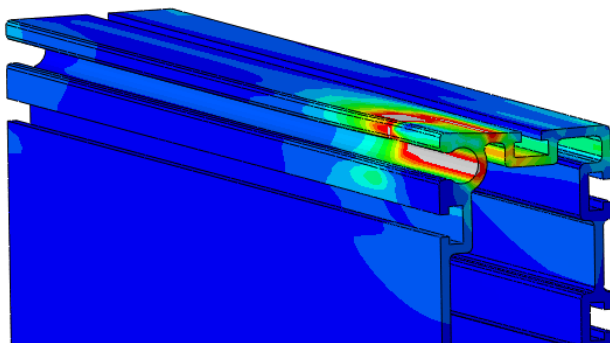
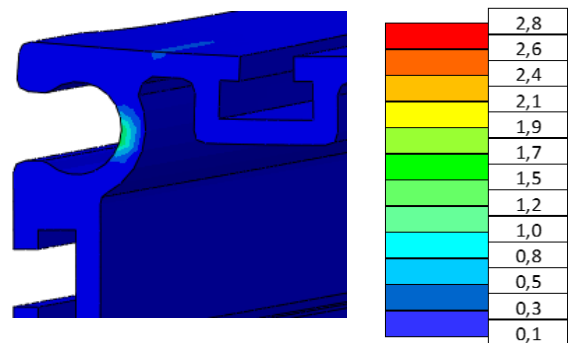
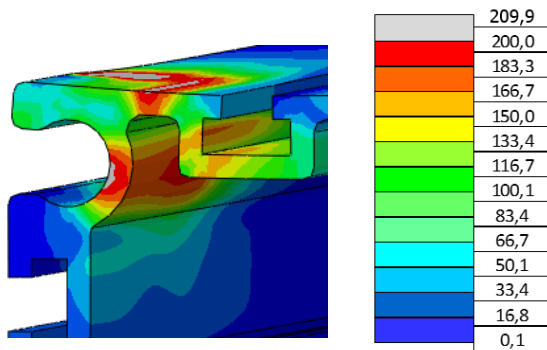
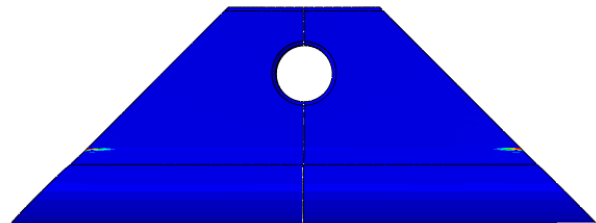
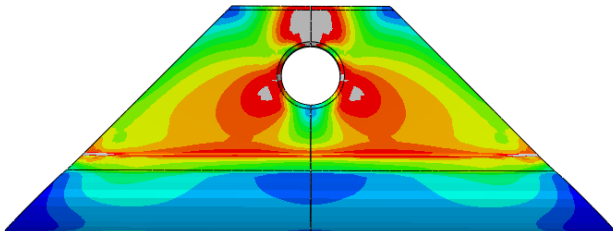
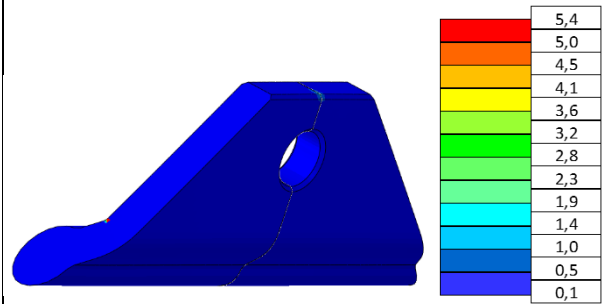
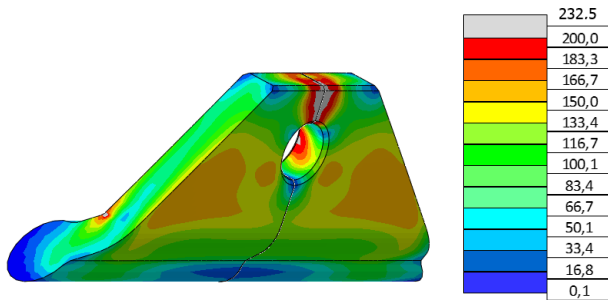


Ilustración A16. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 4

MODELO 4. CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO

Tensión de Von Mises con límite elástico (MPa)

Deformación plástica (%)



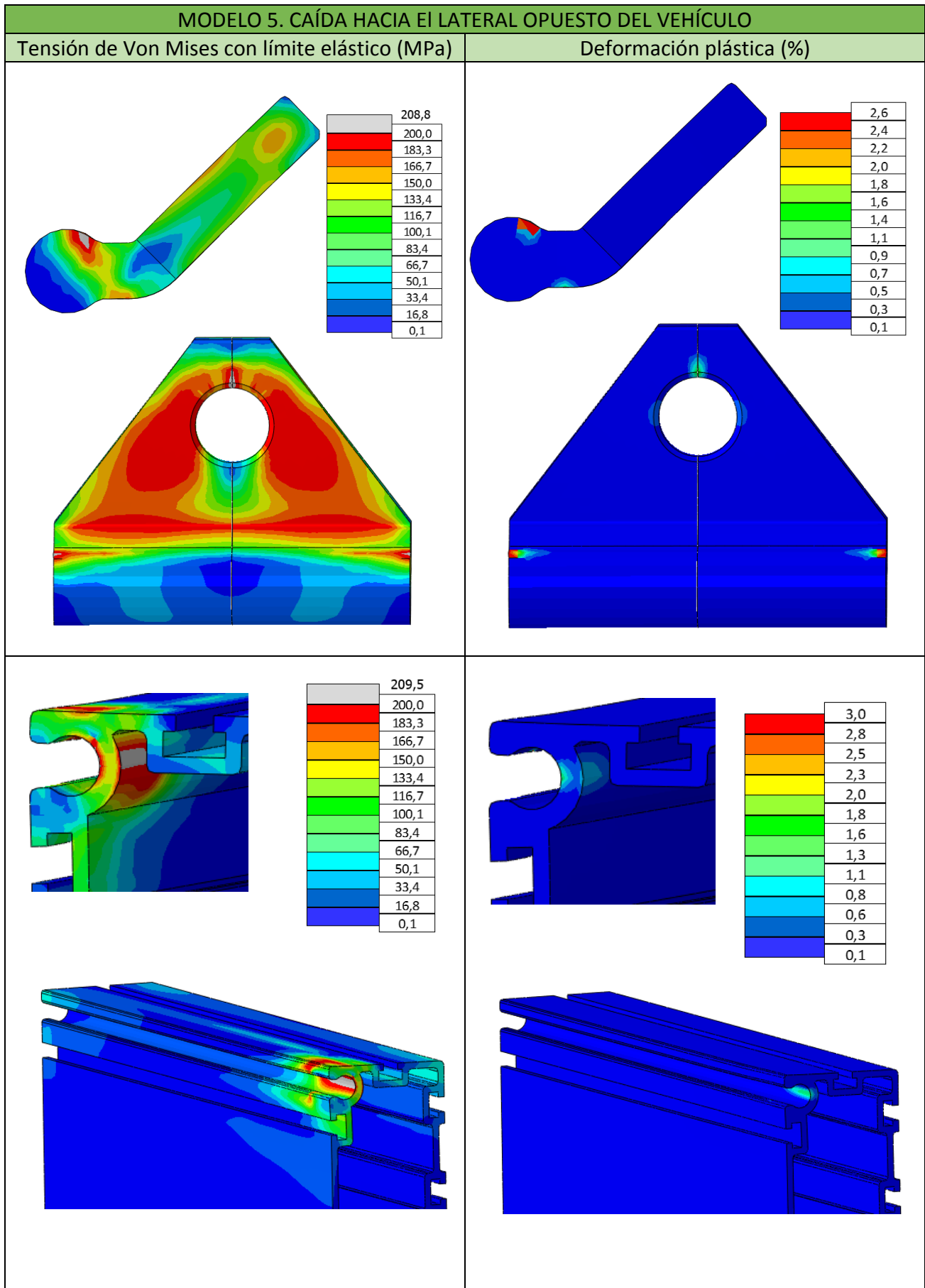
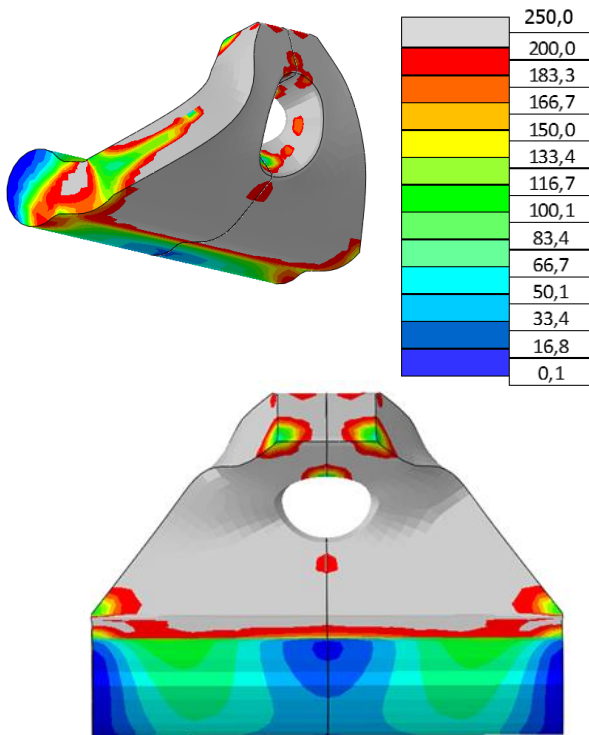


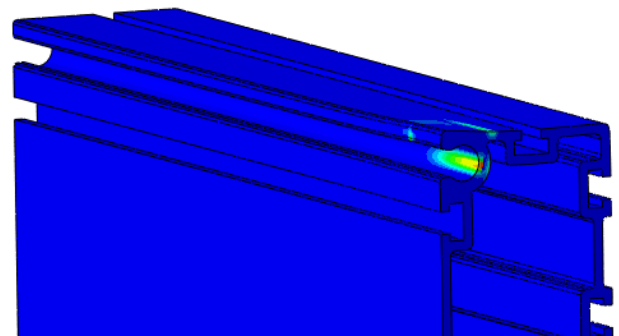
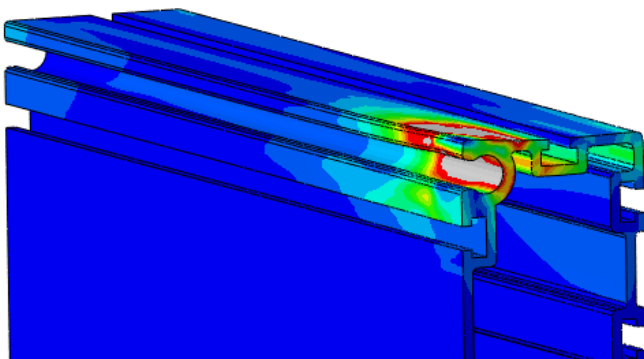
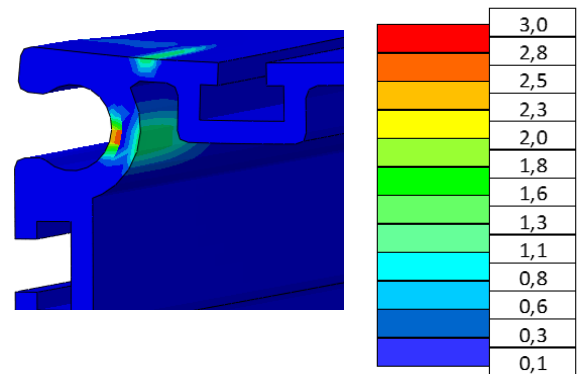
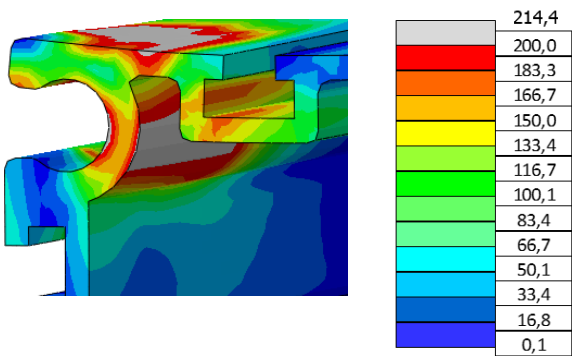
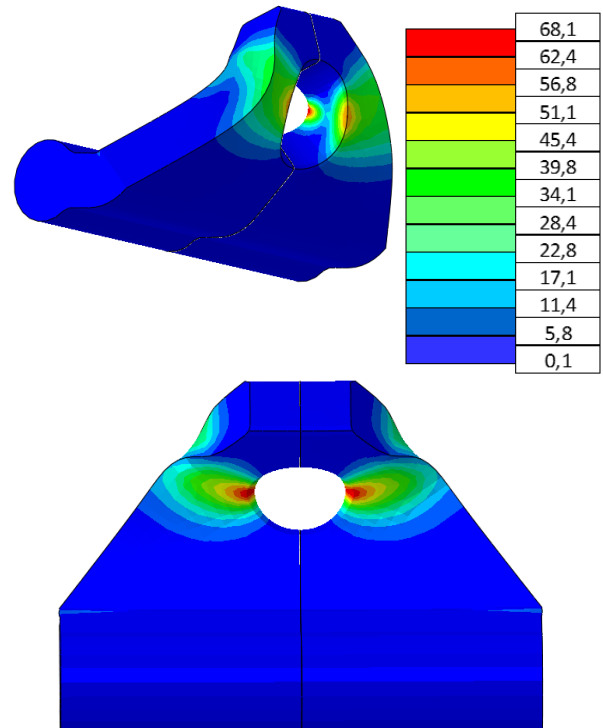
Ilustración A17. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 5

MODELO 5. CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO

Tensión de Von Mises con límite elástico (MPa)



Deformación plástica (%)



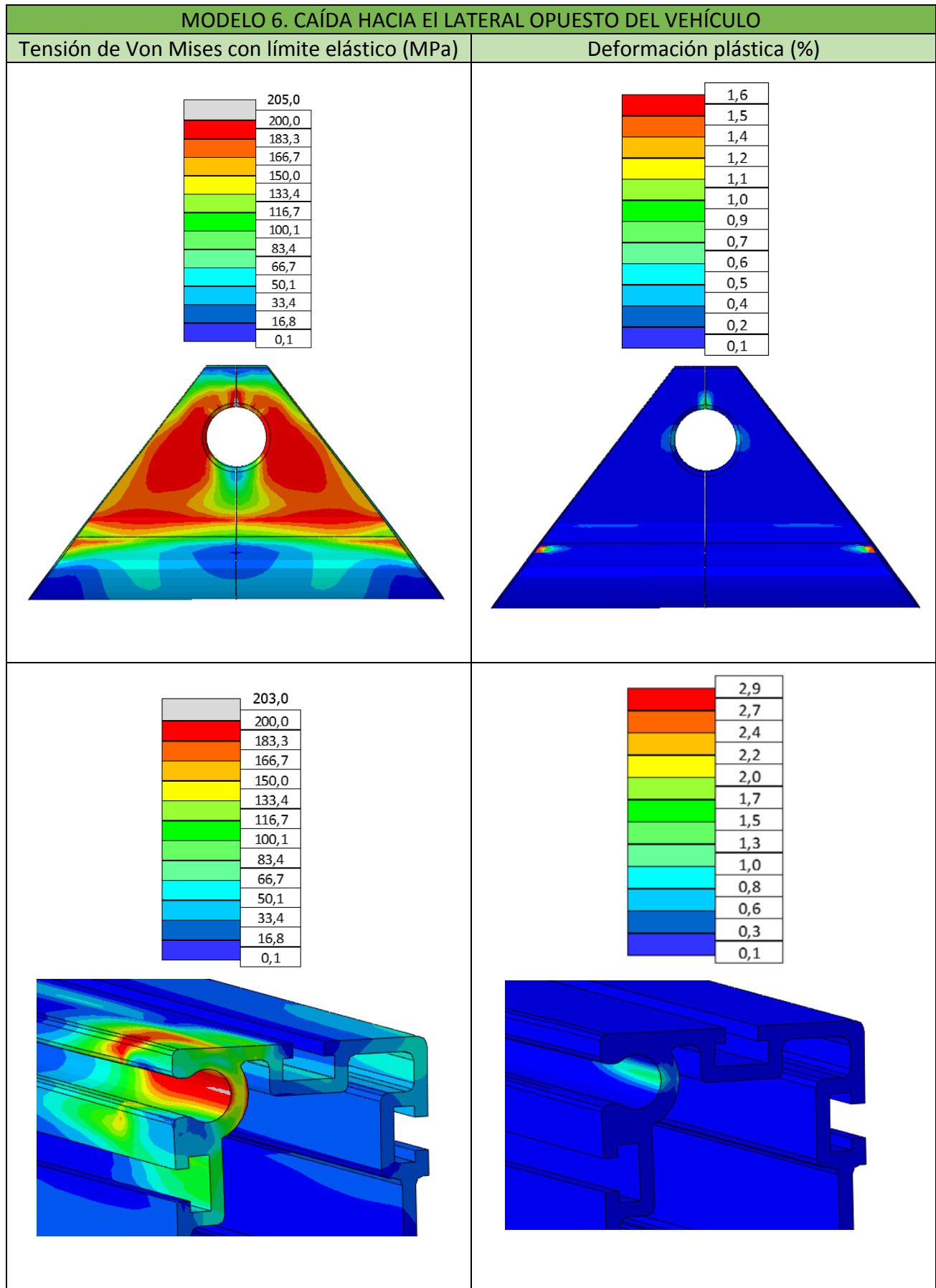
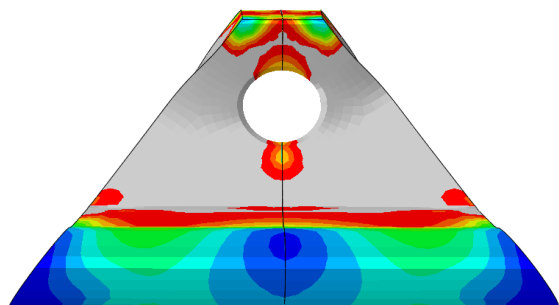
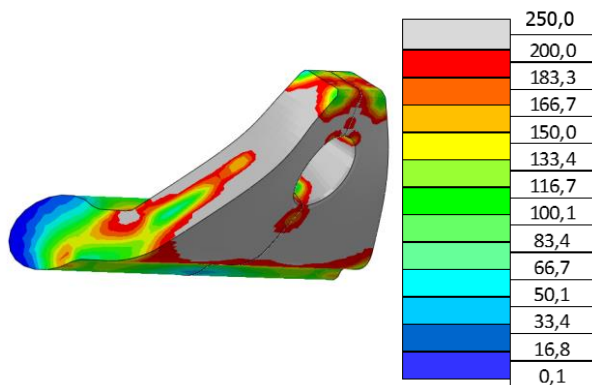


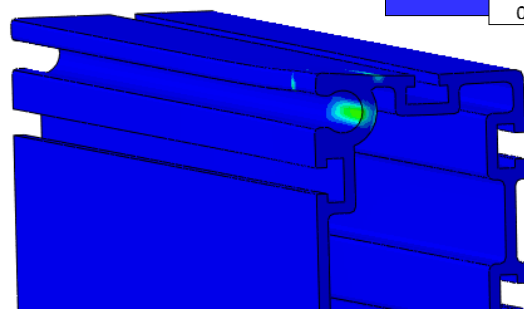
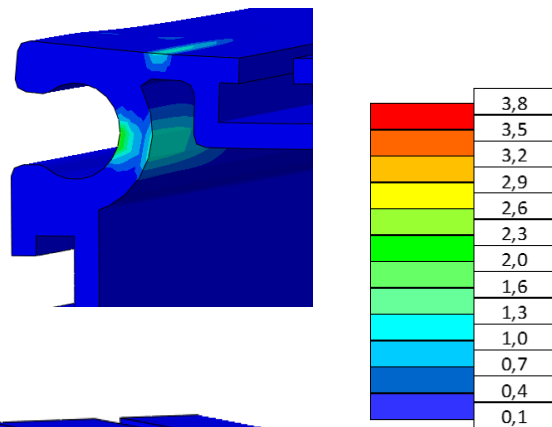
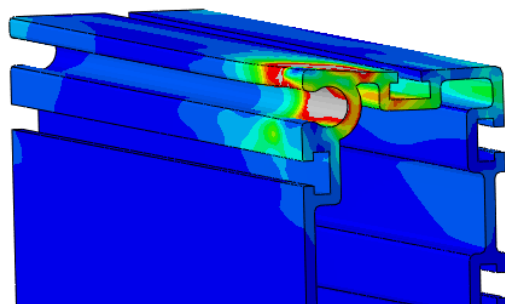
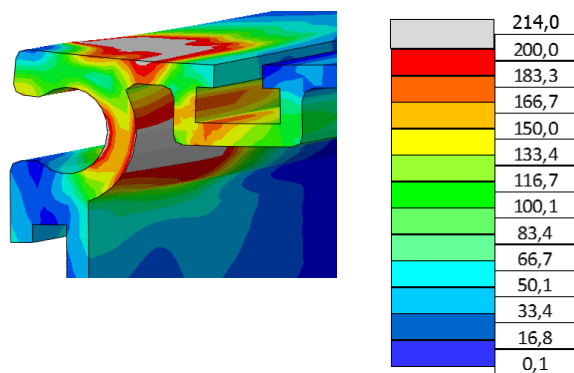
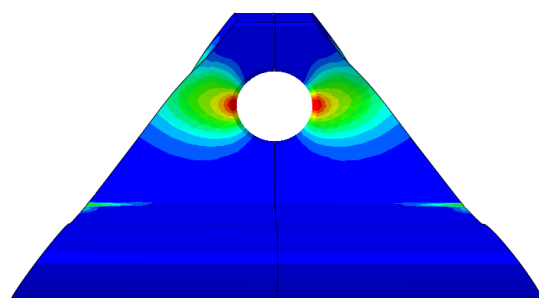
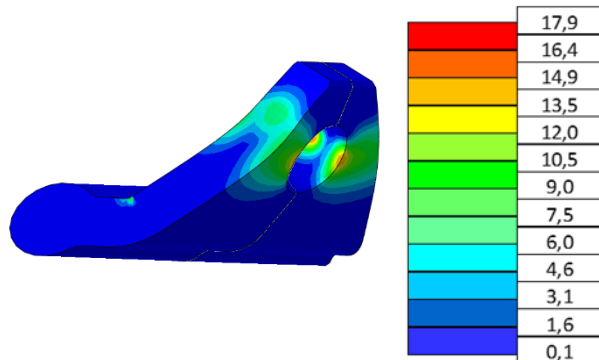
Ilustración A18. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 6

MODELO 6. CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO

Tensión de Von Mises con límite elástico (MPa)



Deformación plástica (%)



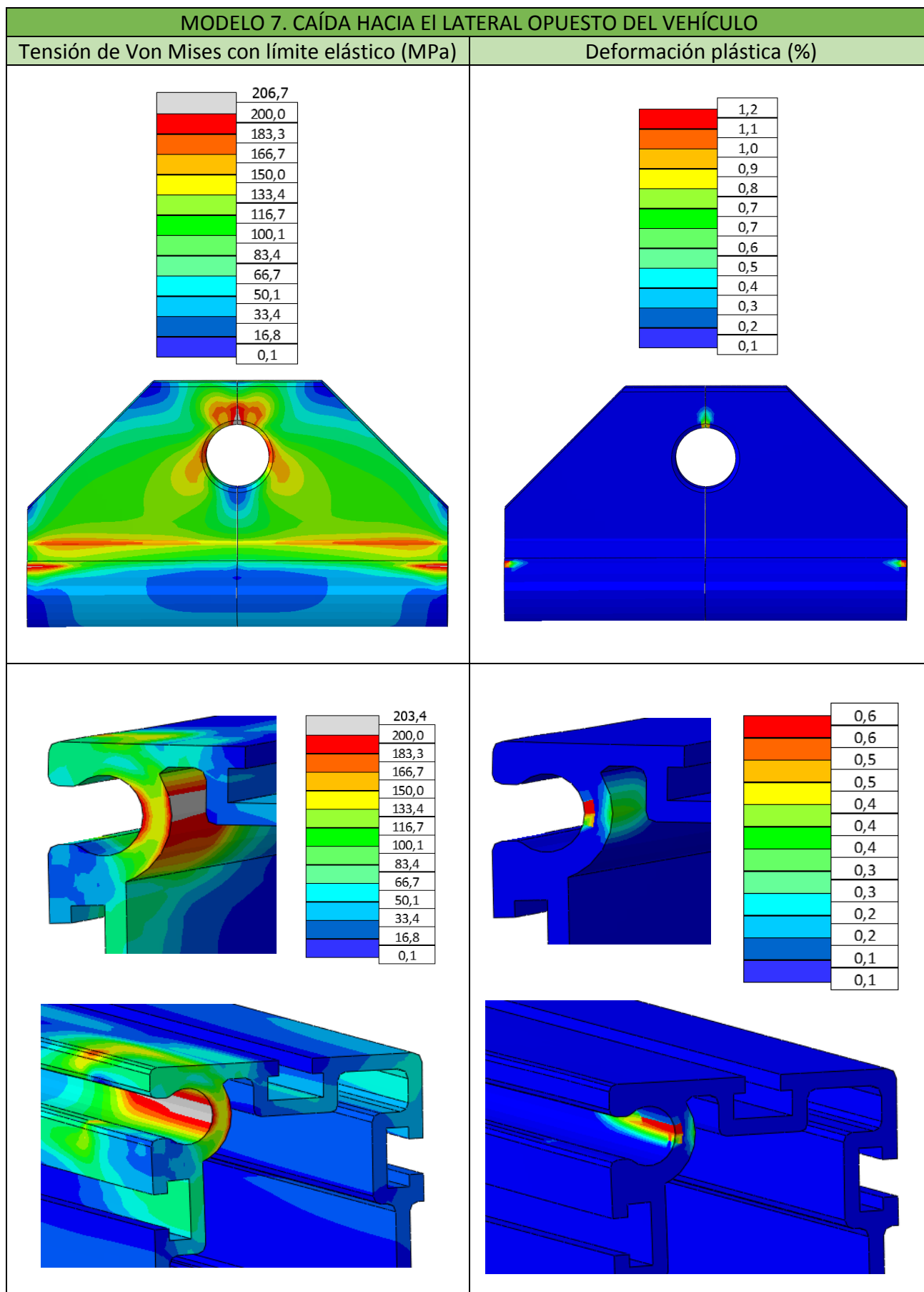
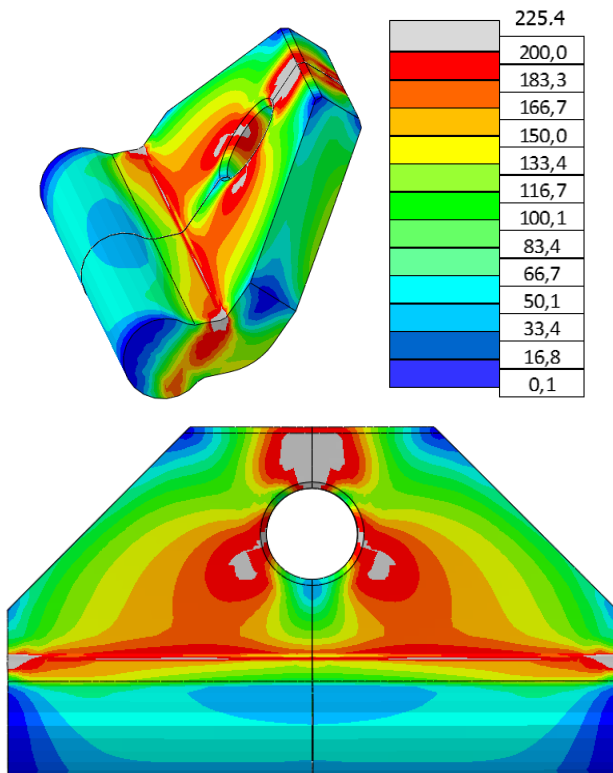


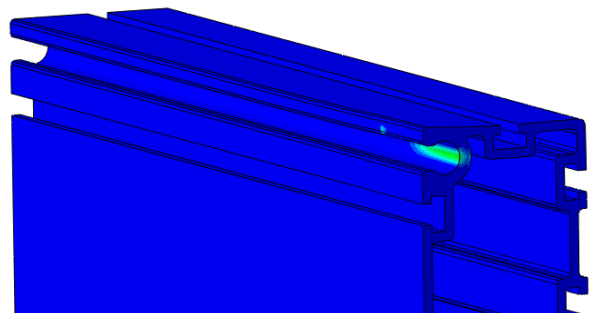
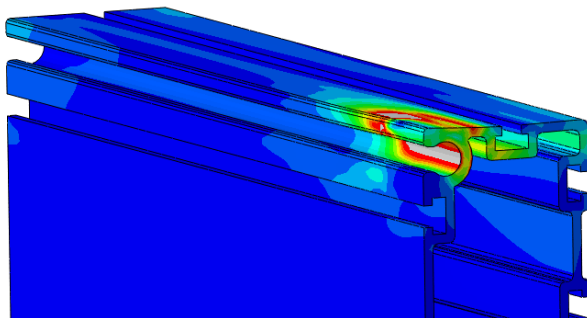
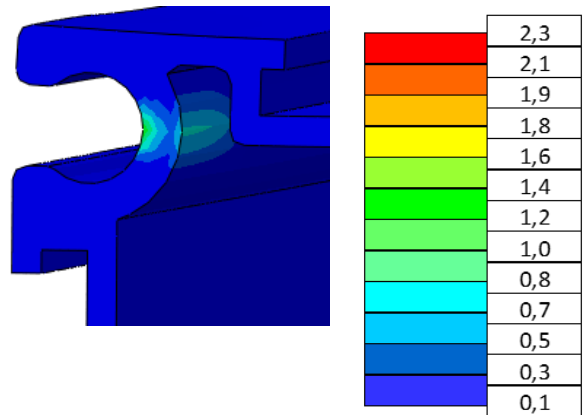
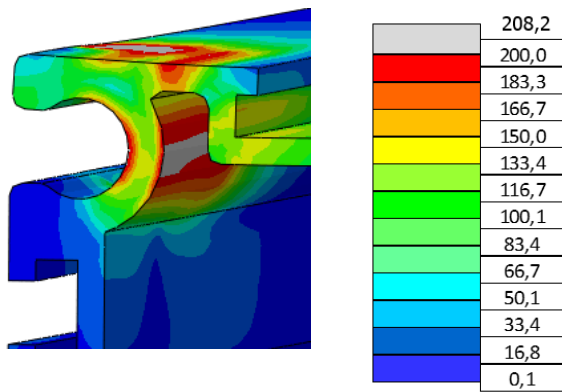
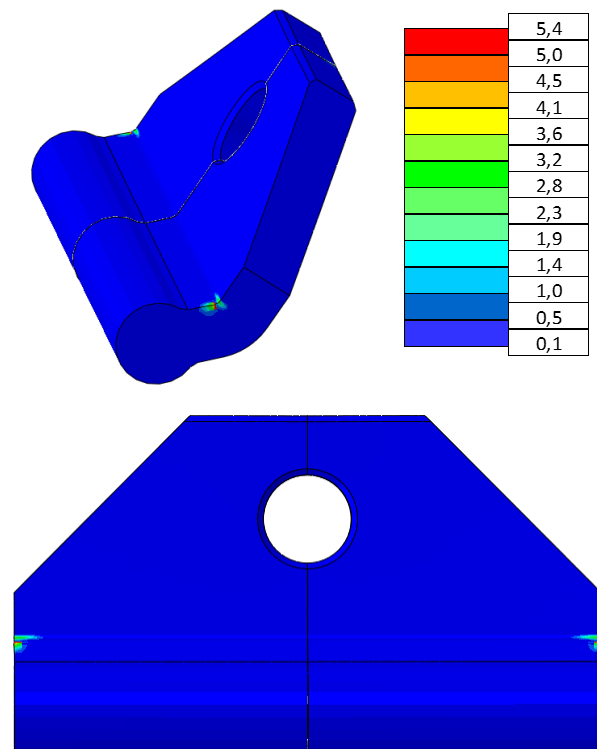
Ilustración A19. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 7

MODELO 7. CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO

Tensión de Von Mises con límite elástico (MPa)



Deformación plástica (%)



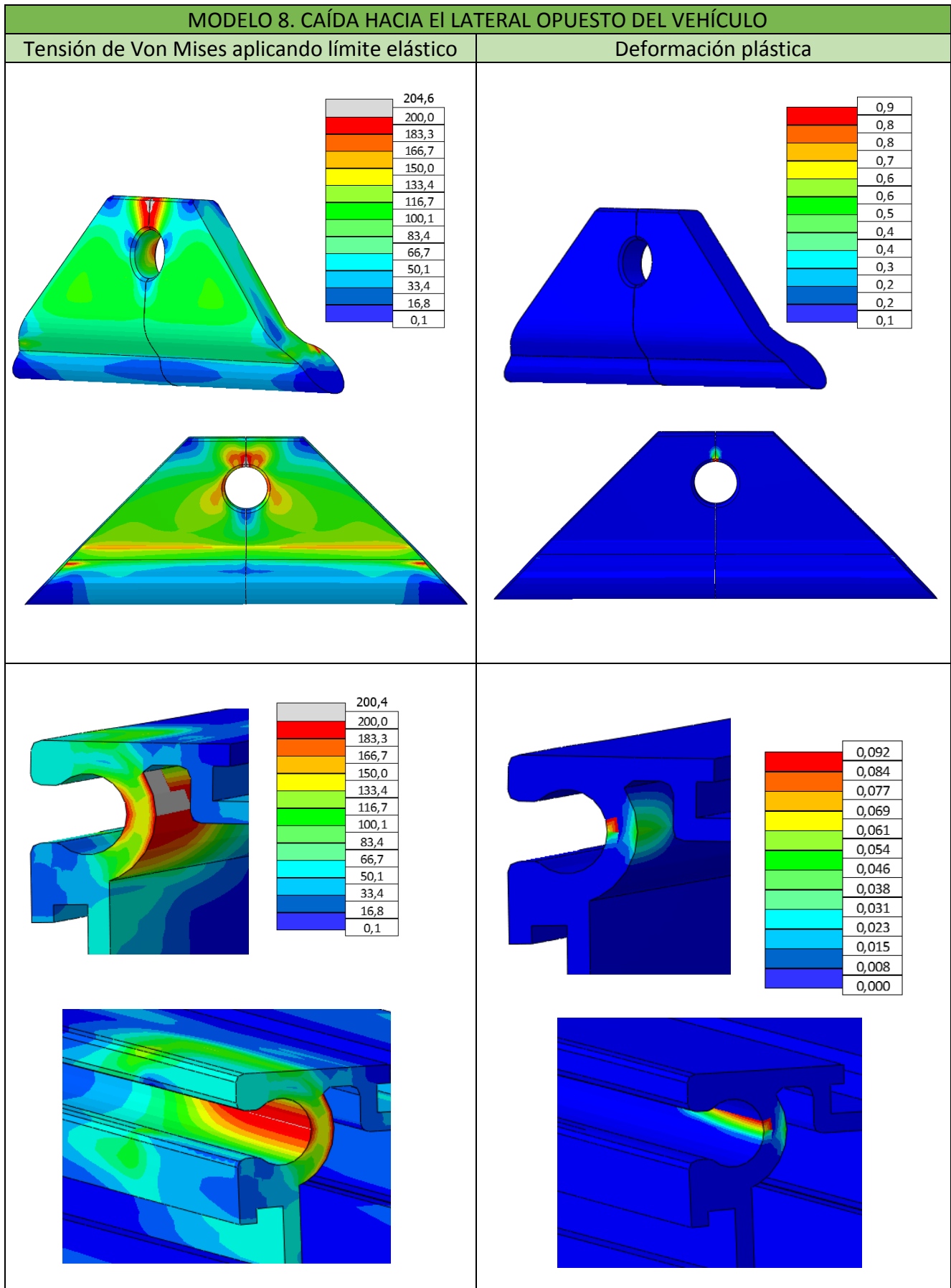
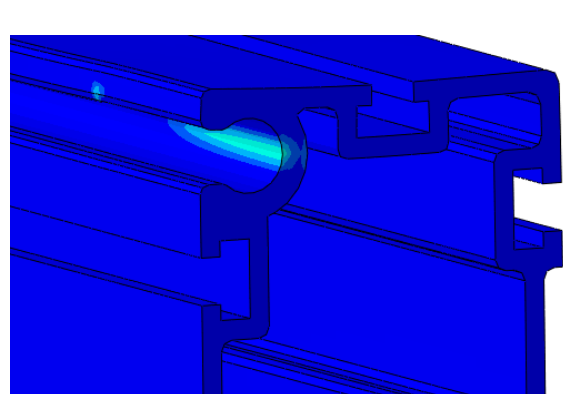
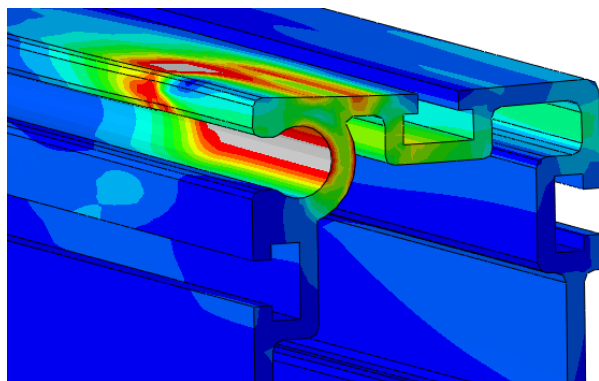
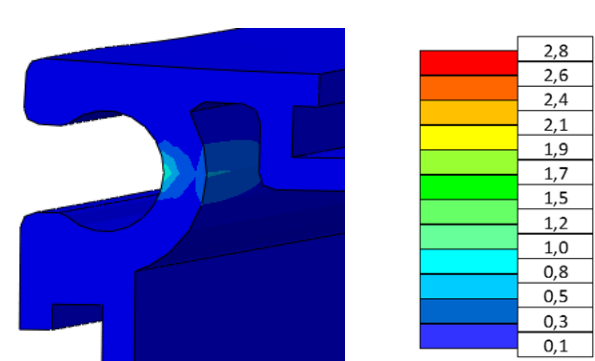
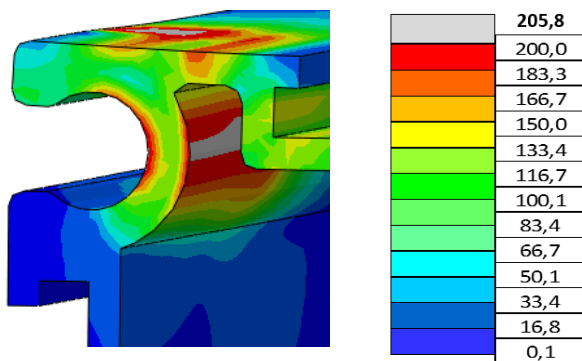
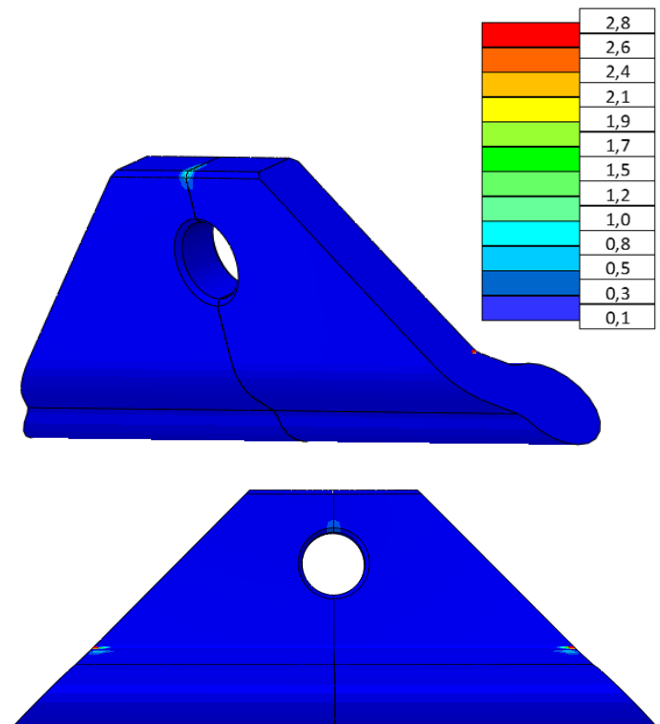
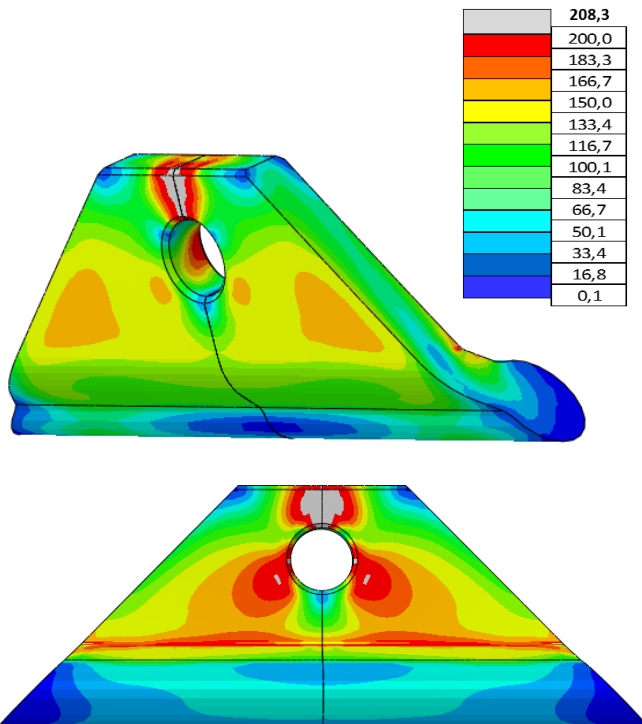


Ilustración A20. Tensión Von Mises aplicando el límite elástico y comprobación con la deformación plástica modelo 8

MODELO 8. CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO

Tensión de Von Mises aplicando límite elástico

Deformación plástica



Anexo 4: Desplazamiento resultante

En este Anexo se encuentra el desplazamiento resultante tanto del conjunto de la línea de vida, como del perfil y de la corredera individualmente, que se produce en caso de caída para todos los modelos estudiados.

El desplazamiento resultante es la distancia que llega a desplazarse el modelo cuando se produce la caída con respecto al inicio, antes de la caída.

Los modelos de la corredera con la sección inicial (modelos 1, 2, 5 y 6) sufren un desplazamiento muy elevado.

Es una razón más para descartar dichos modelos.

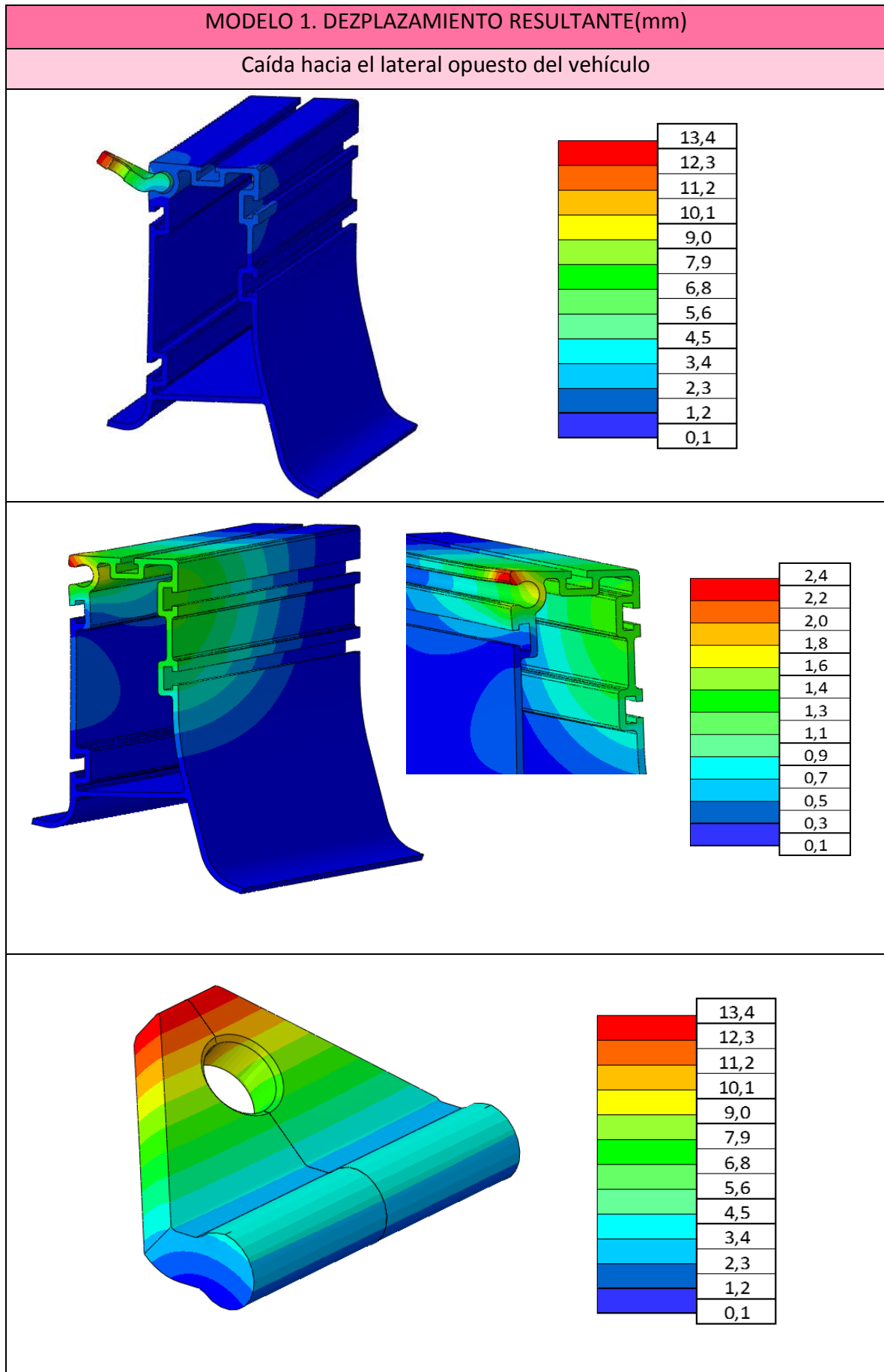
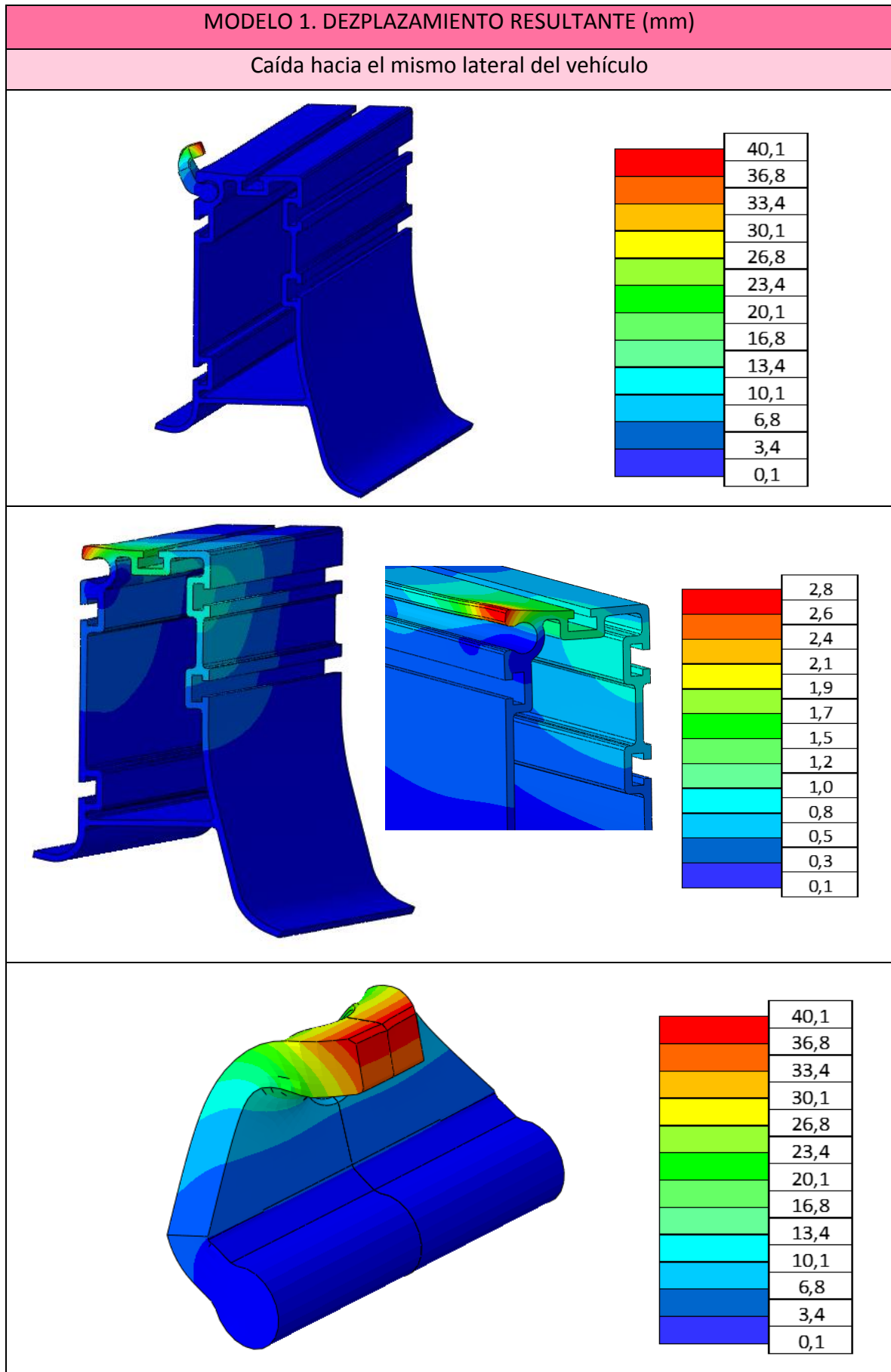


Ilustración A21. Desplazamiento resultante modelo 1



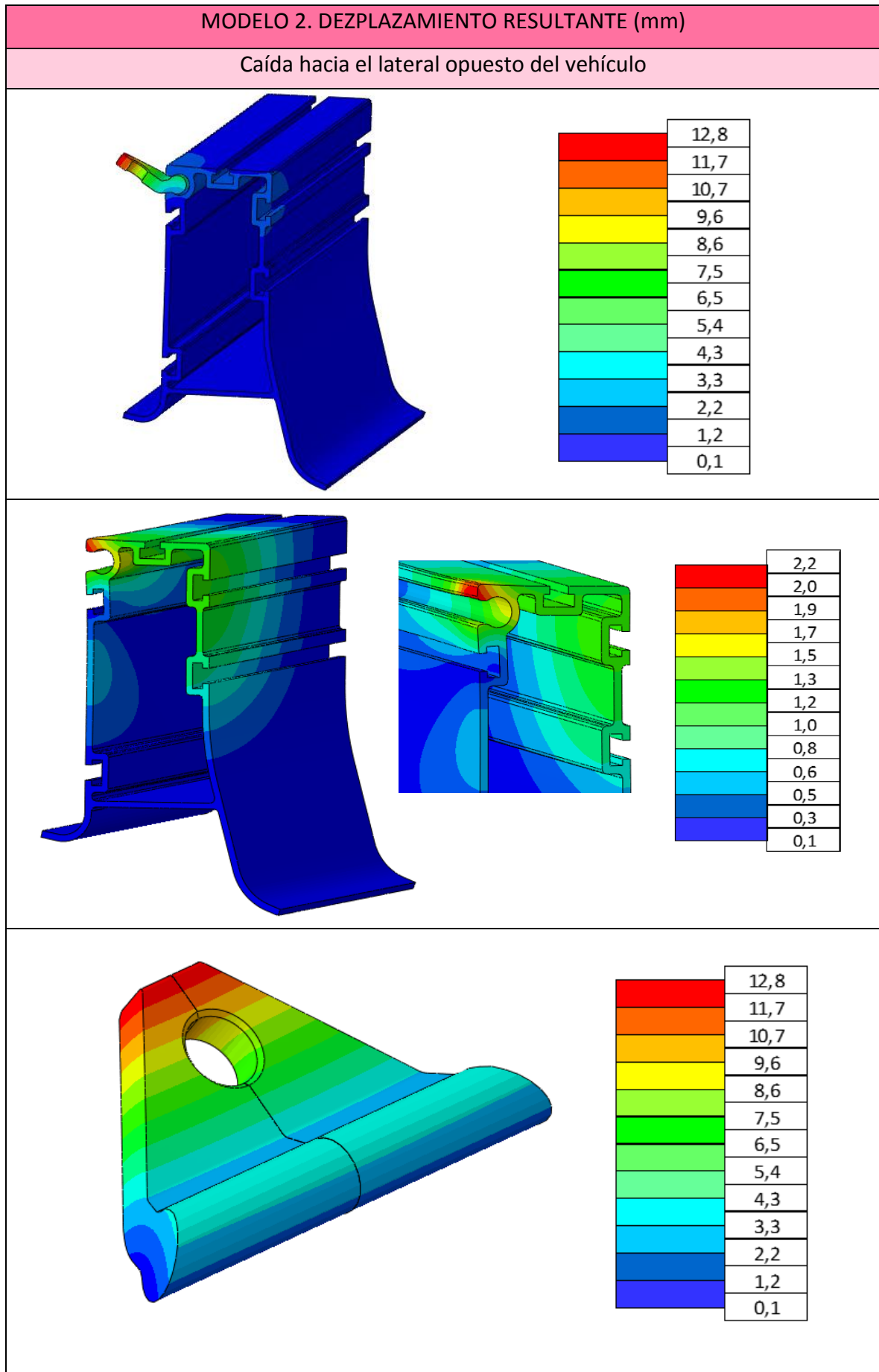
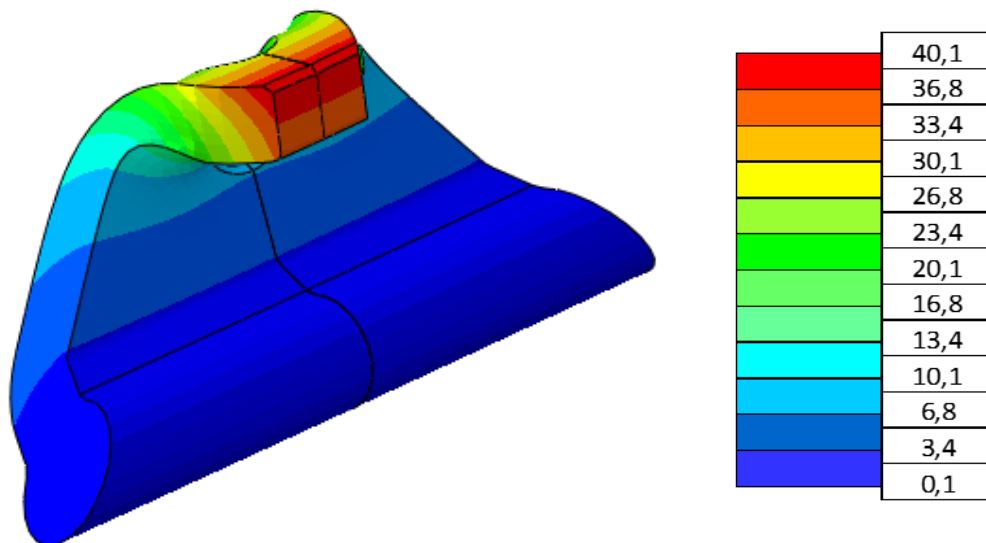
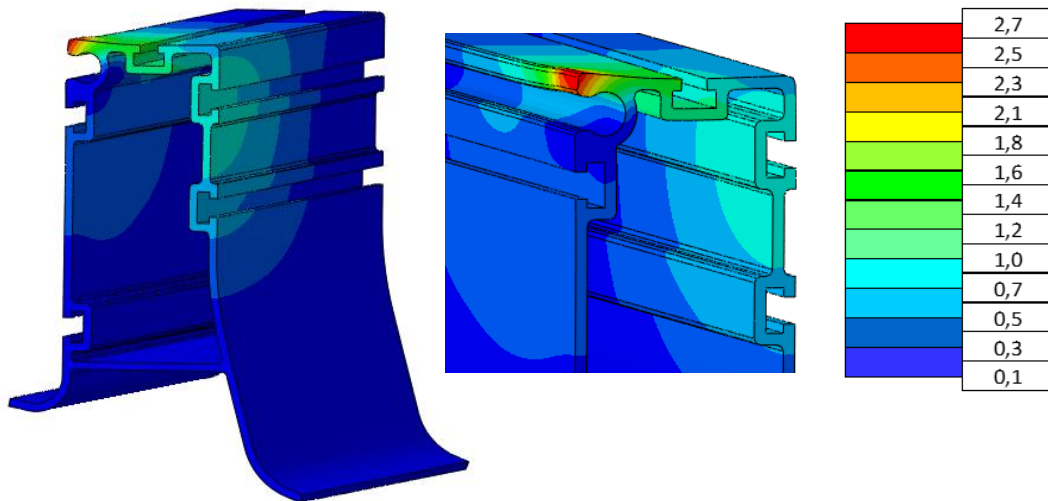
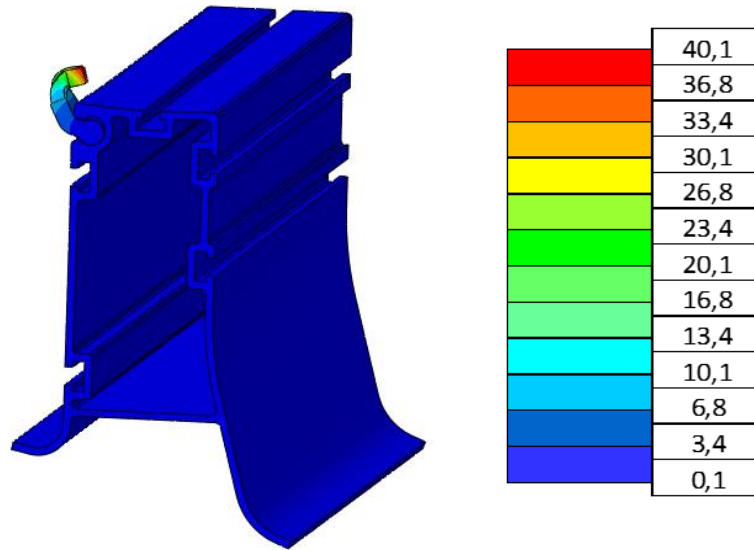


Ilustración A22. Desplazamiento resultante modelo 2

MODELO 2. DEZPLAZAMIENTO RESULTANTE (mm)

Caída hacia el mismo lateral del vehículo



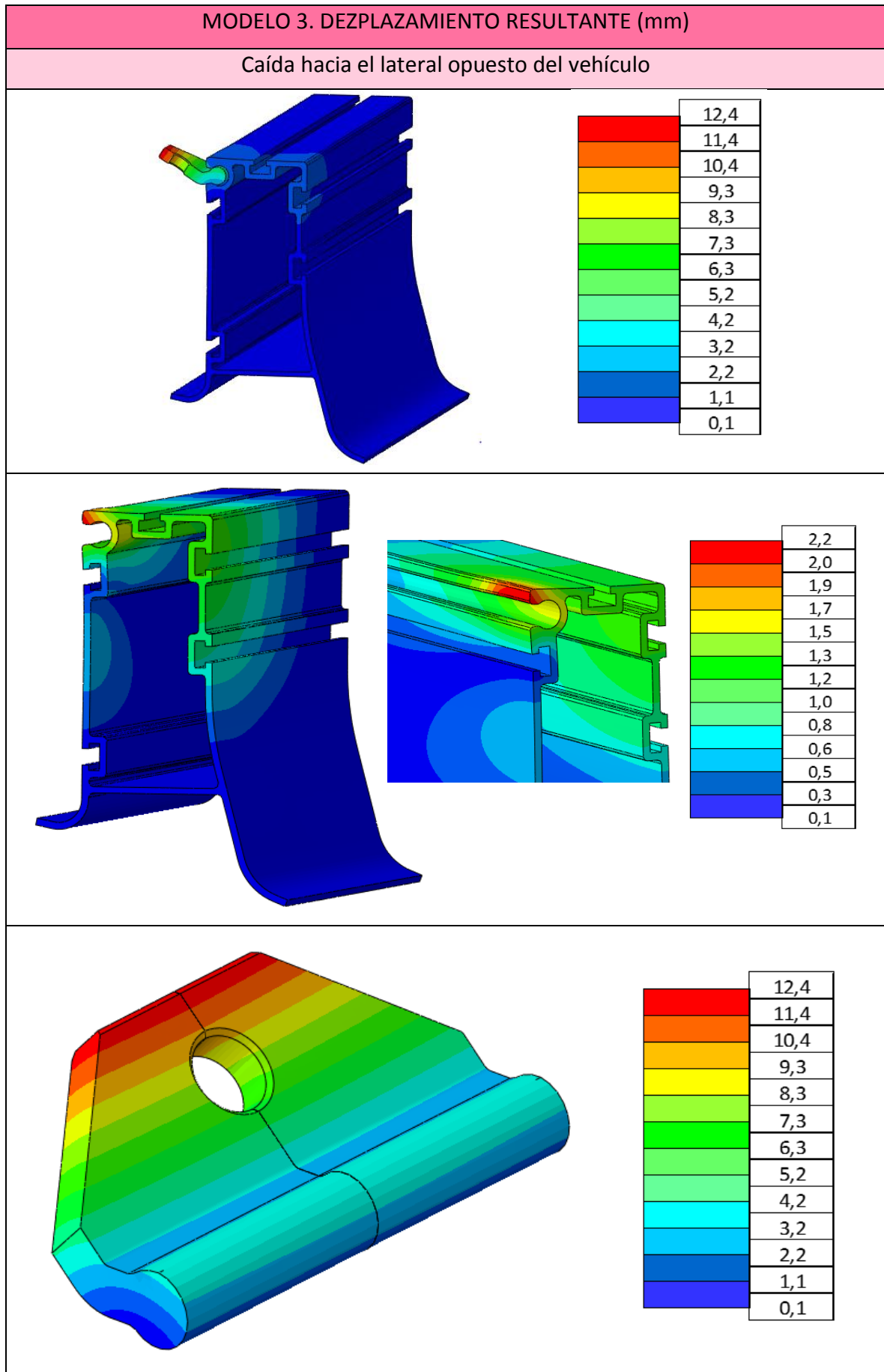
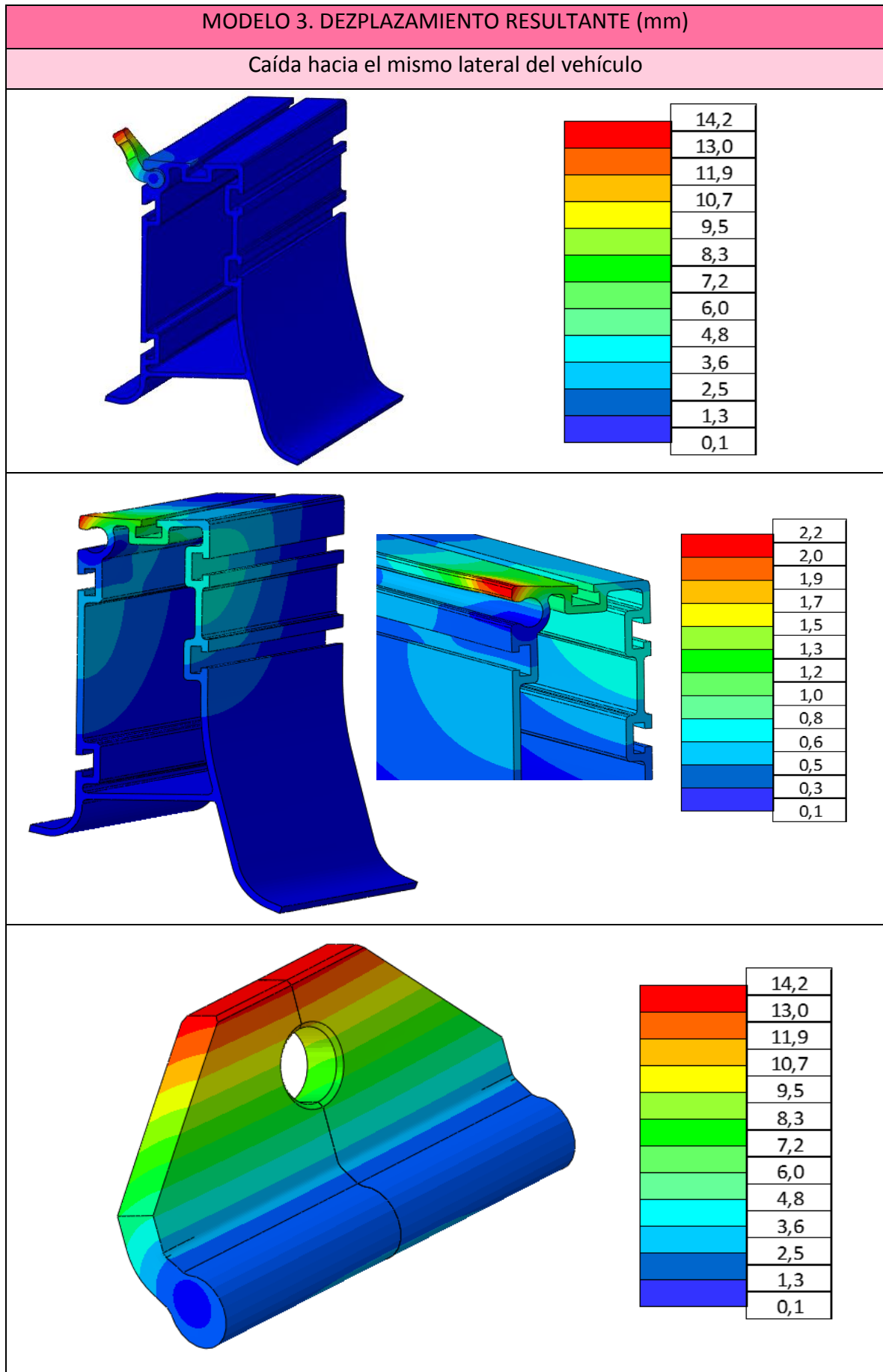


Ilustración A23. Desplazamiento resultante modelo 3



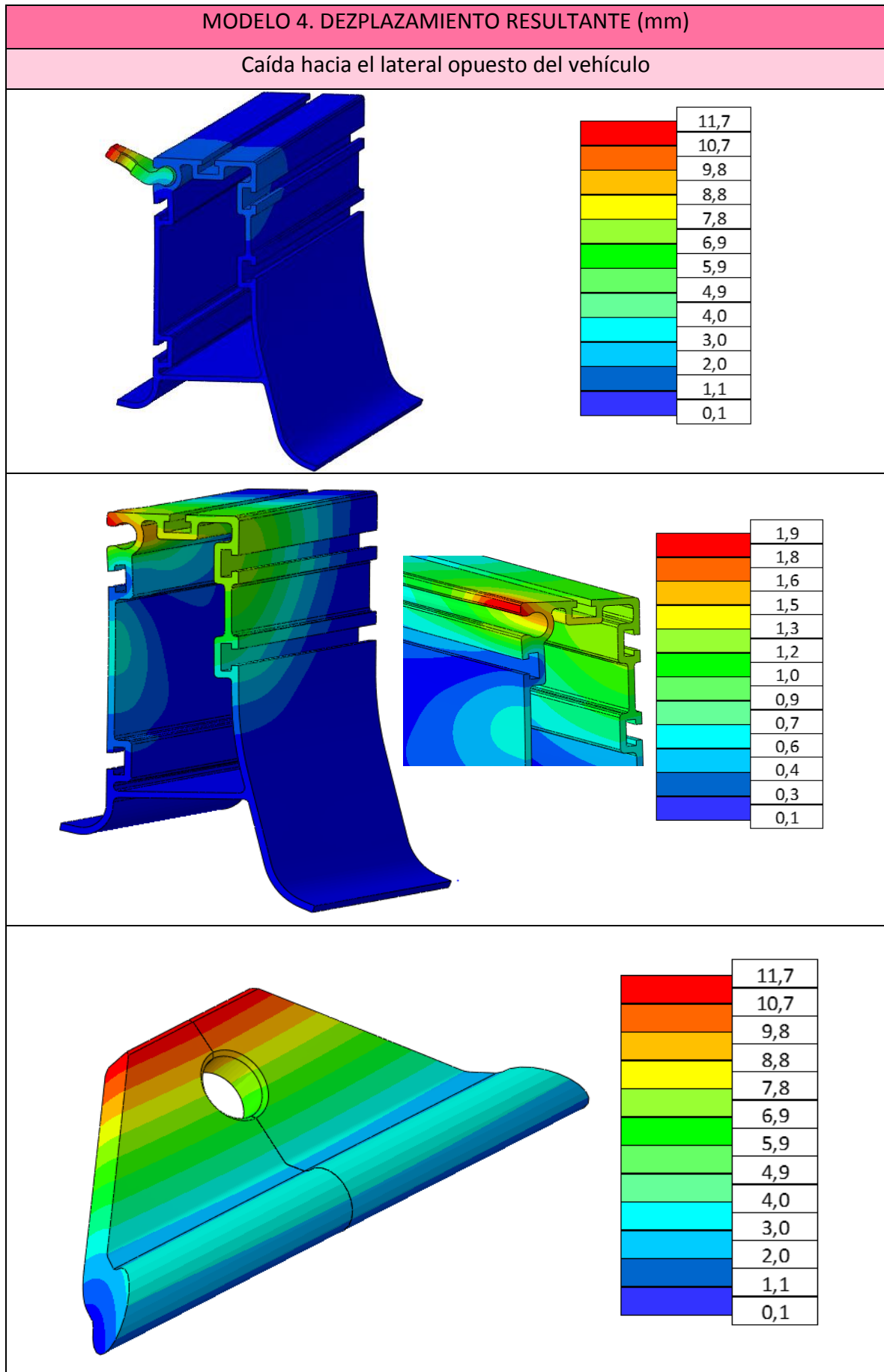
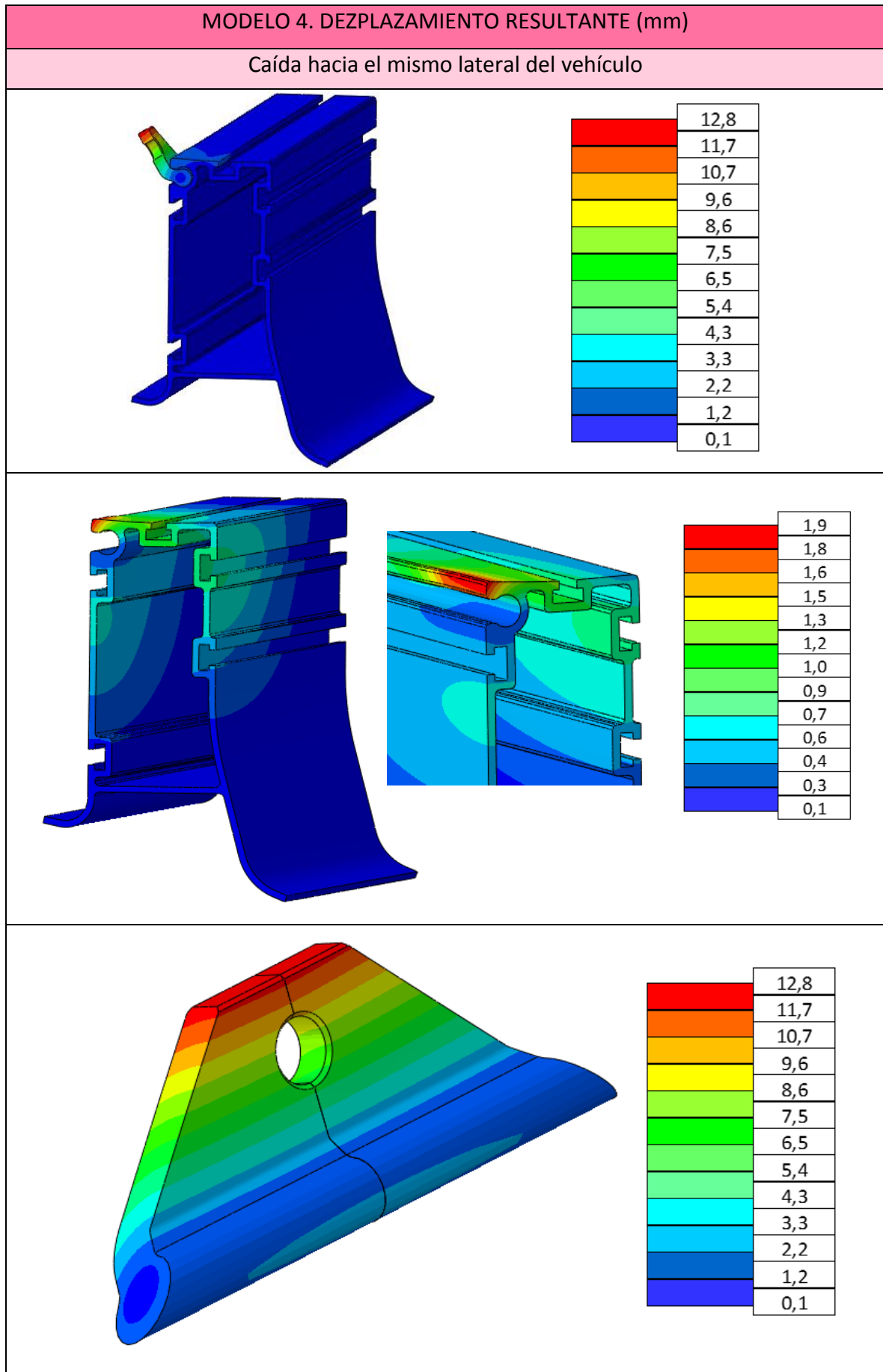


Ilustración A24. Desplazamiento resultante modelo 4



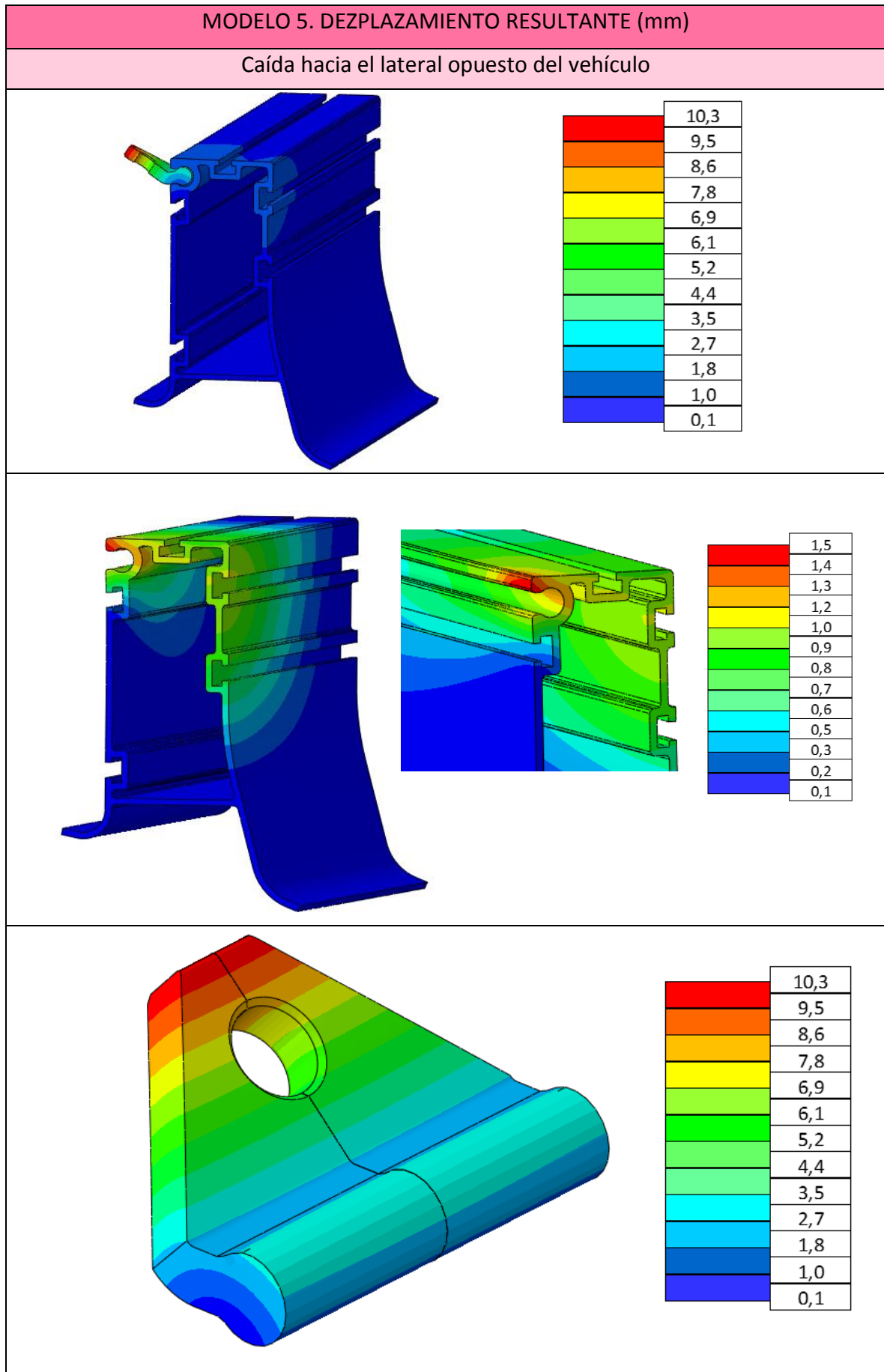
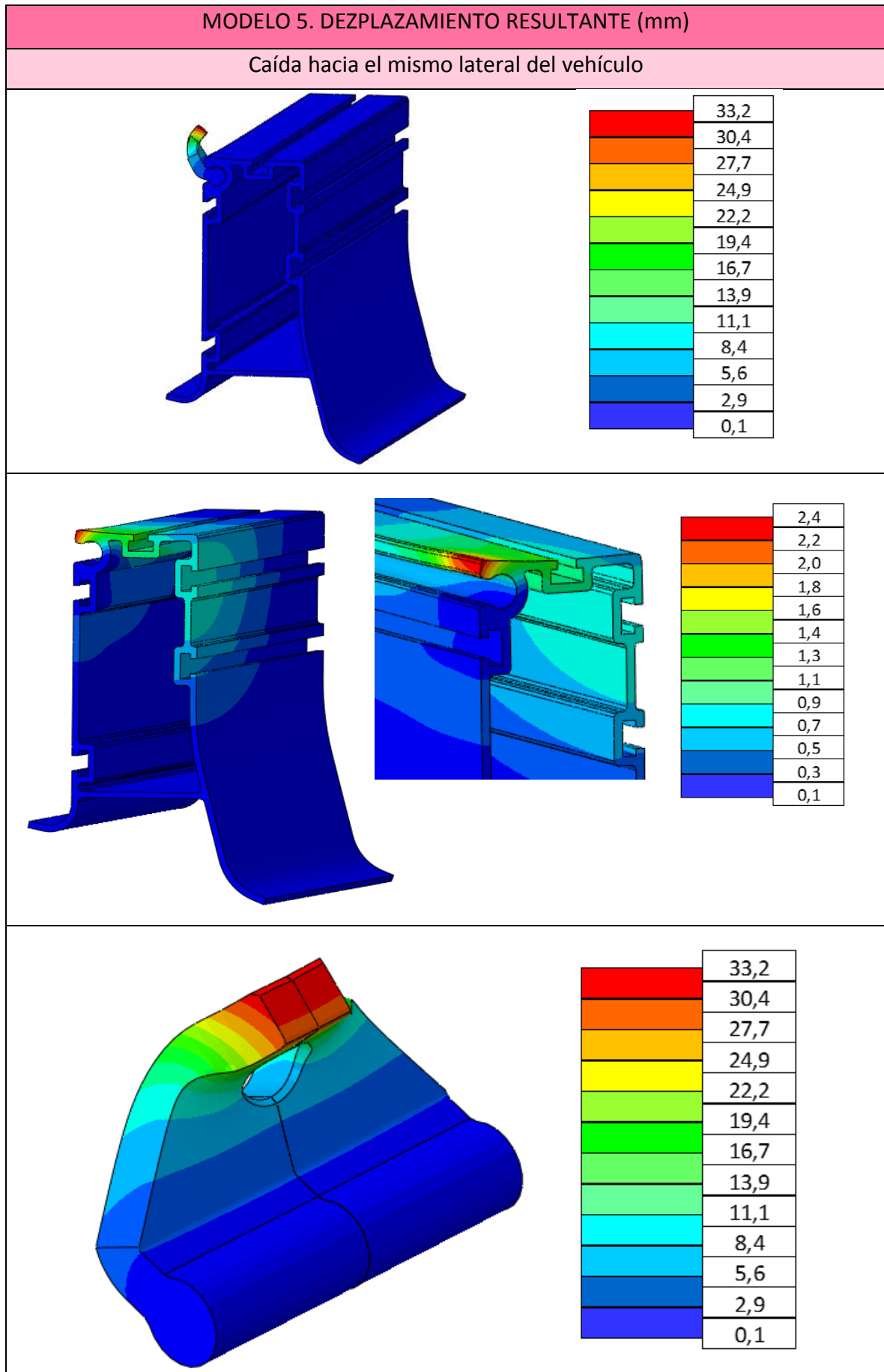


Ilustración A25. Desplazamiento resultante modelo 5



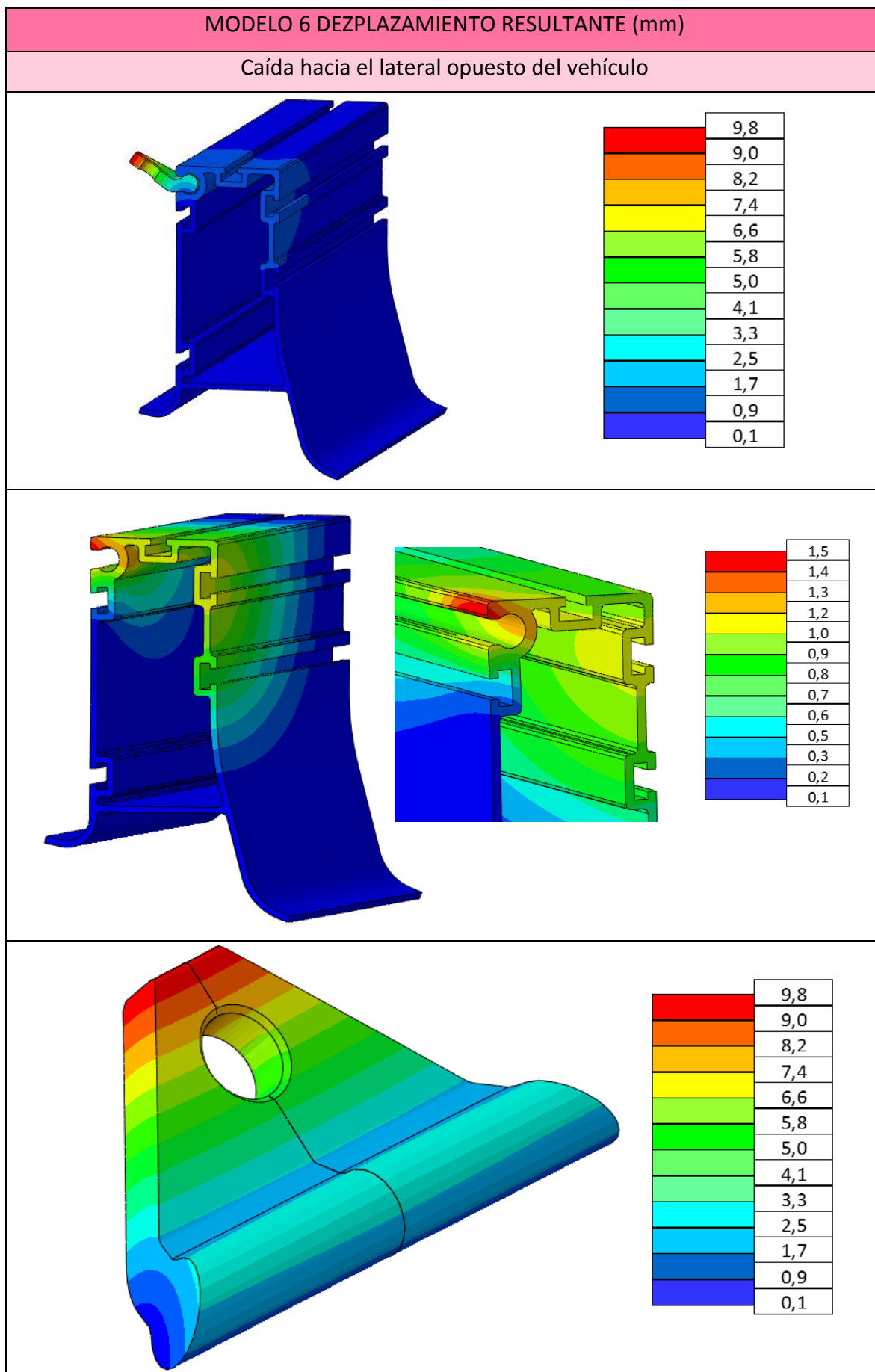
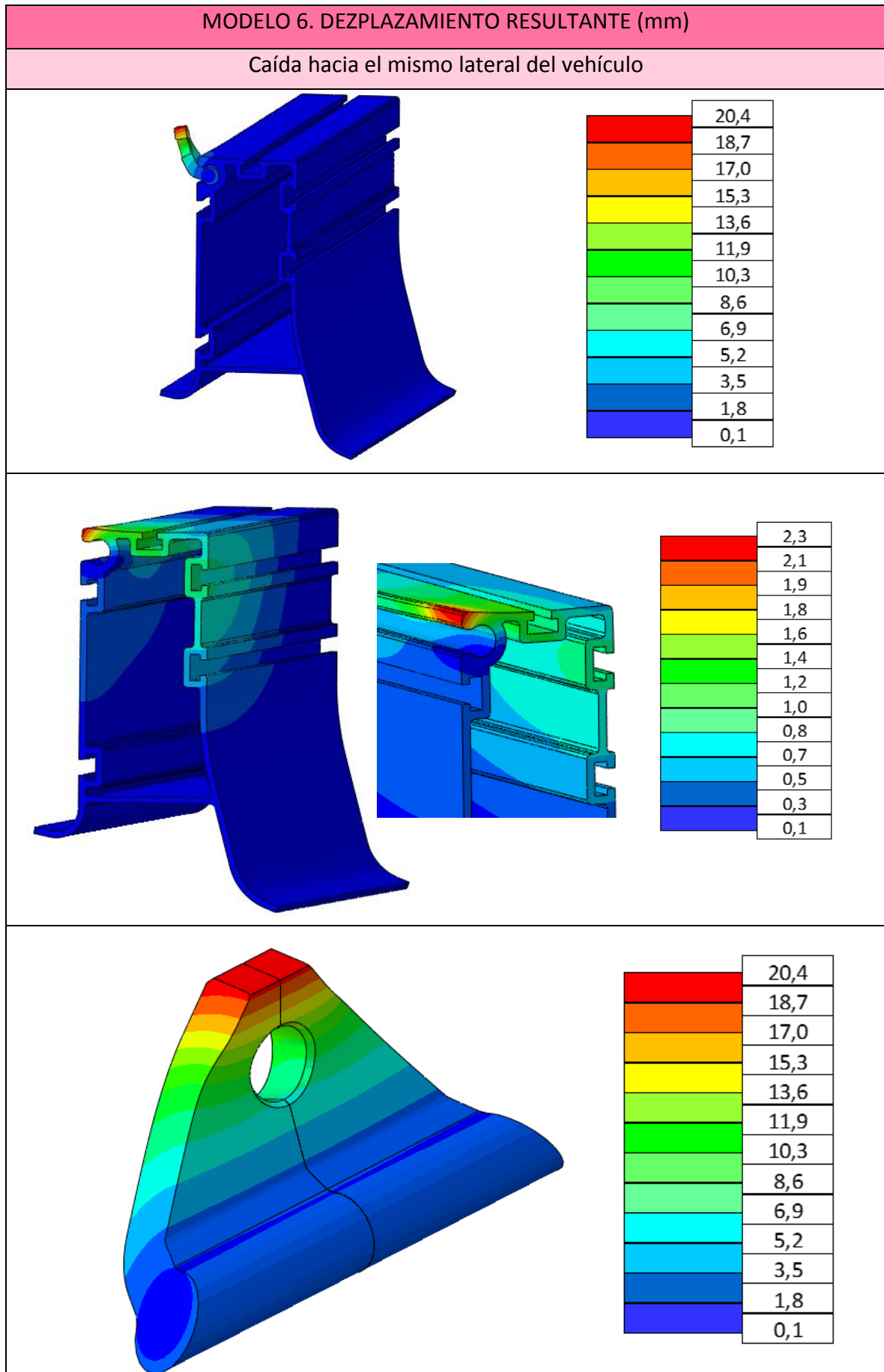


Ilustración A26. Desplazamiento resultante modelo 6



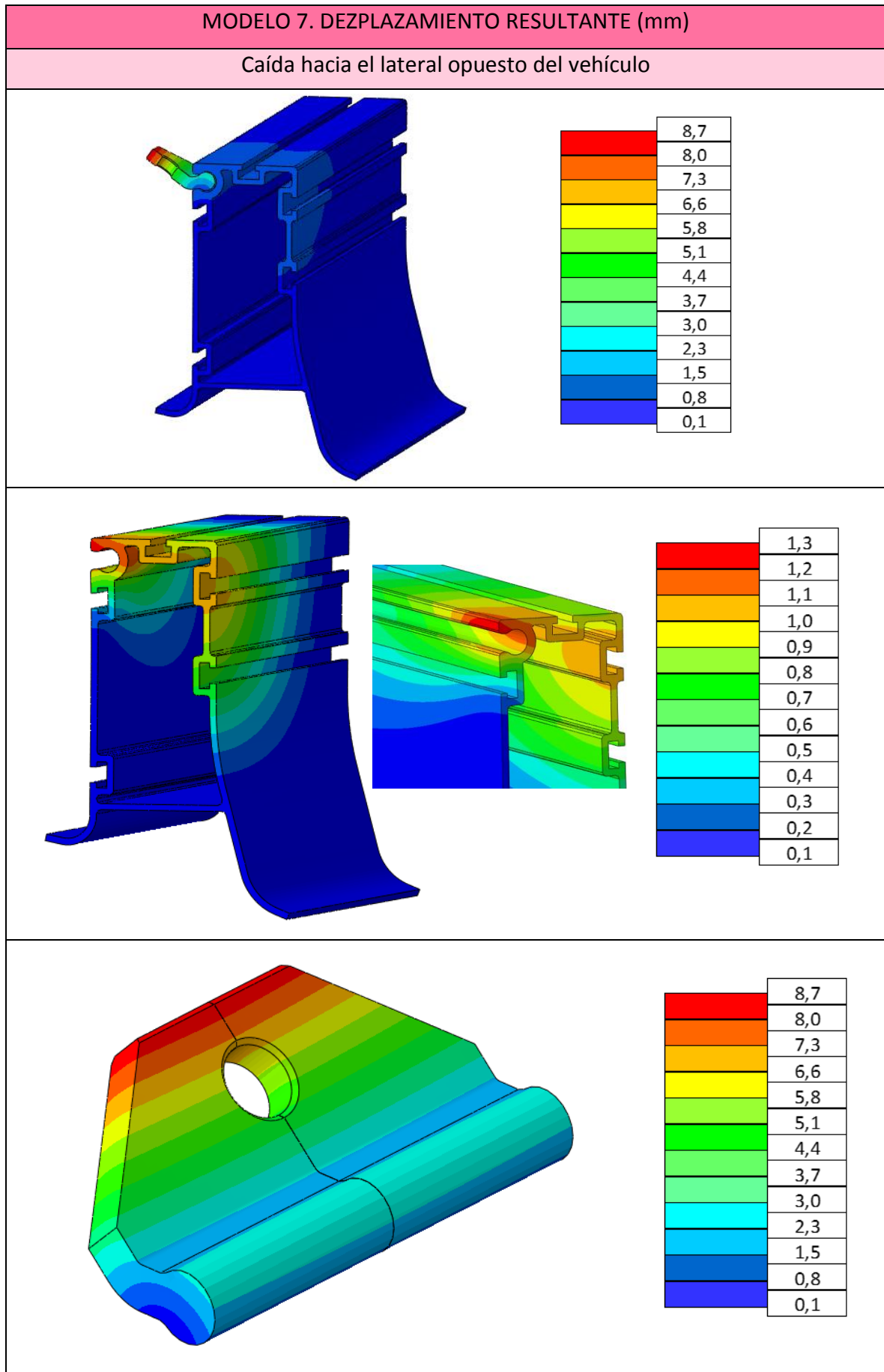
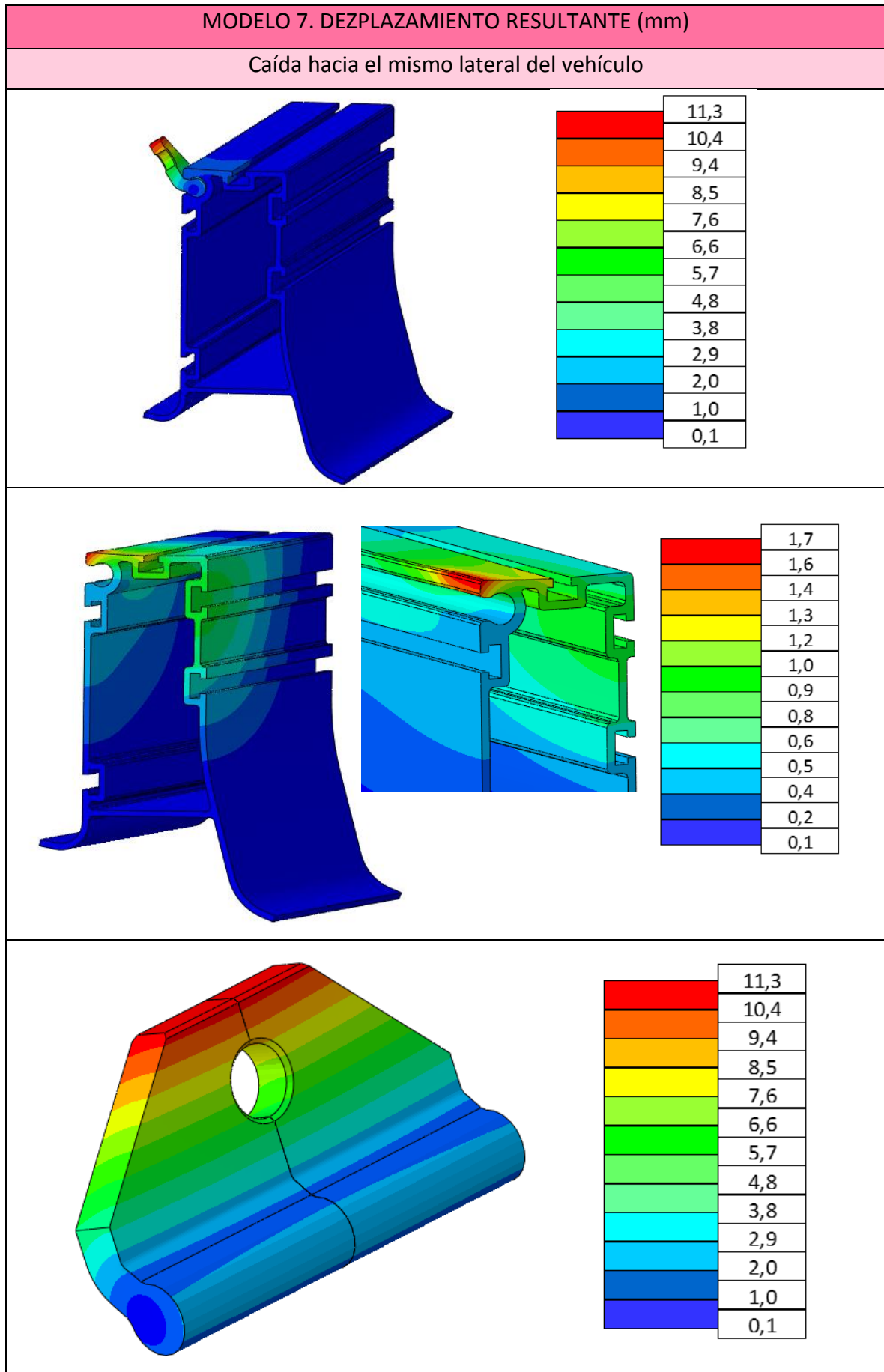


Ilustración A27. Desplazamiento resultante modelo 7



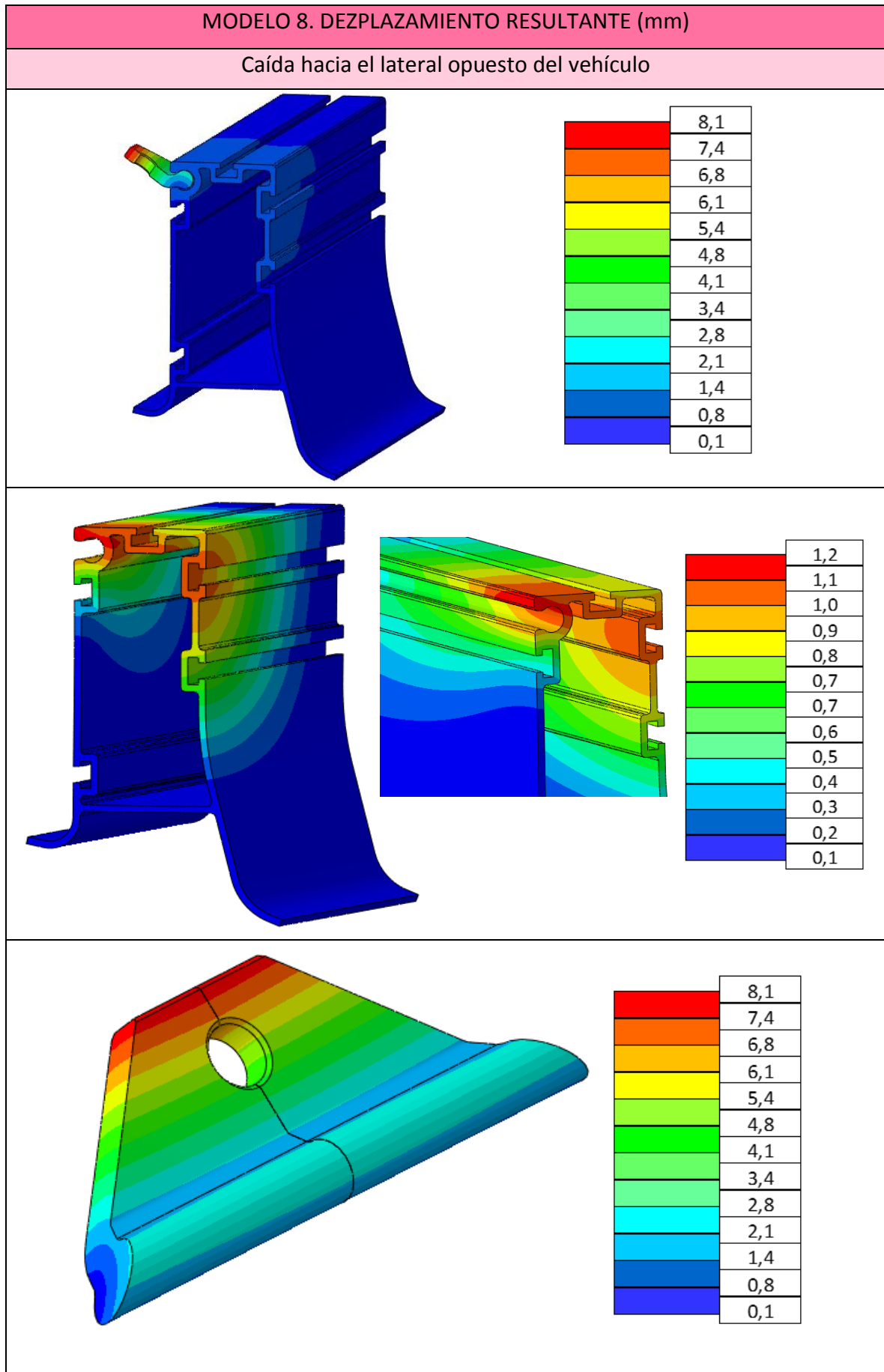
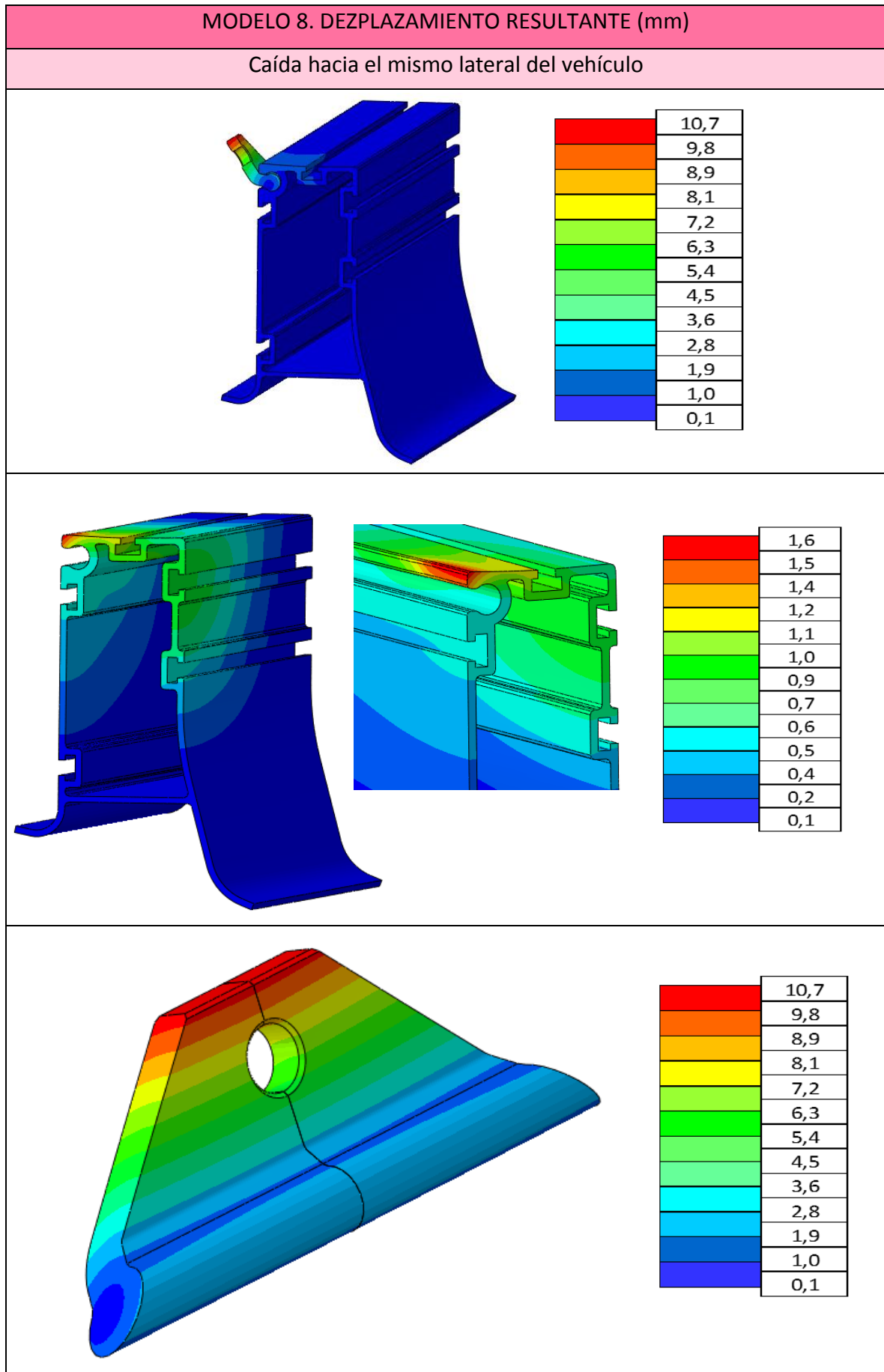


Ilustración A28. Desplazamiento resultante modelo 8



Anexo 5: Gráficas

Las gráficas se emplean a modo de comprobación de todo lo analizado y estudiado anteriormente.

Anexo 5.1 Energía plástica (J)

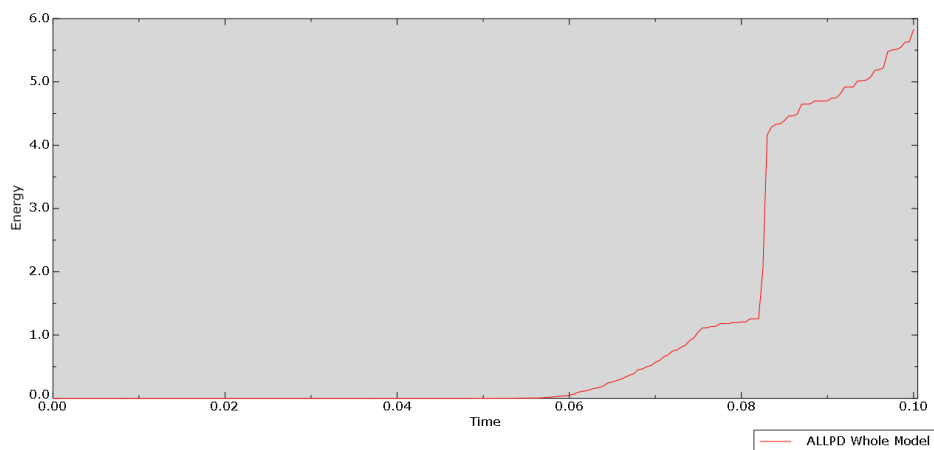
En primer lugar tenemos las gráficas del modelo inicial. Como se puede ver, para la caída hacia el lado opuesto del vehículo, es un valor muy elevado.

Cuando se llega al límite de rotura del material, la pieza se rompería. En este proyecto al no implementar un modelo de rotura, la pieza llega hasta 250 MPa y se deforma totalmente como se ve en el *Anexo 1*. De ahí ese valor tan elevado.

Cuando la caída se produce al mismo lado del vehículo, se ve la diferencia entre el modelo inicial y el final. El modelo inicial tiene una mayor deformación plástica.

MODELO INICIAL

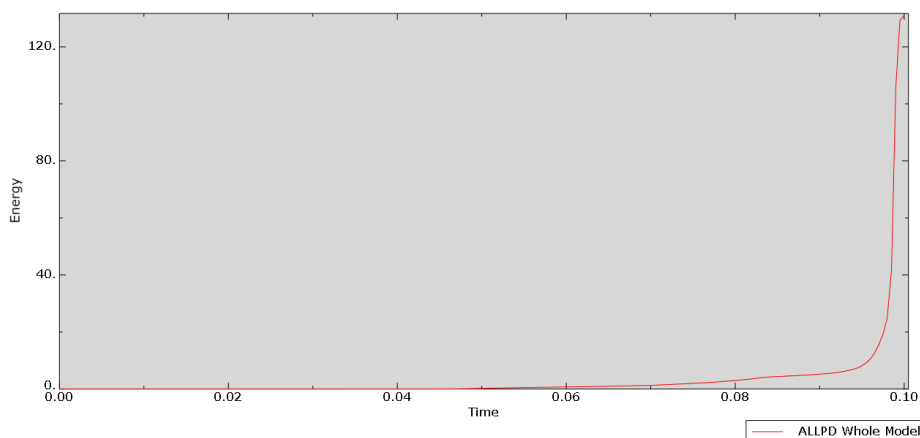
CAÍDA HACIA LATERAL OPUESTO DEL VEHÍCULO



Gráfica A1. Energía plástica modelo inicial. Caída lateral opuesto

MODELO INICIAL

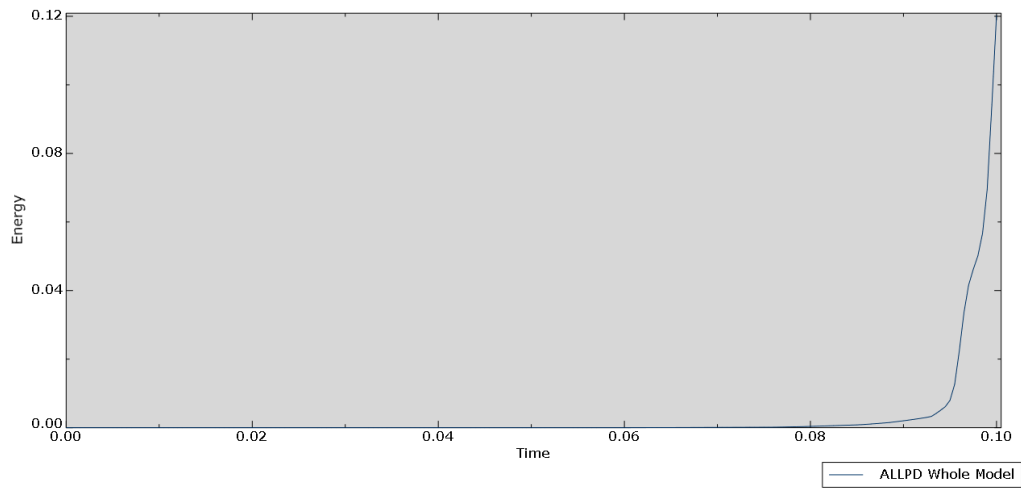
CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO



Gráfica A2. Energía plástica modelo inicial. Caída mismo lateral

MODELO FINAL

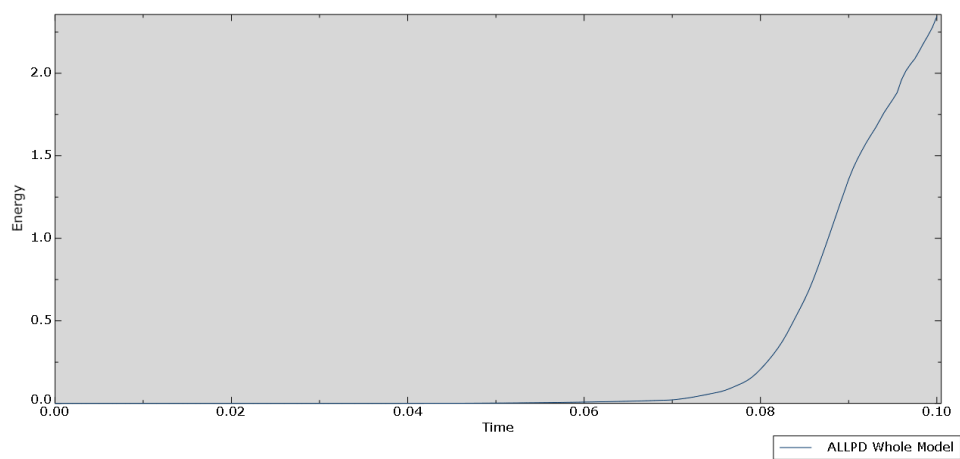
CAÍDA HACIA LATERAL OPUESTO DEL VEHÍCULO



Gráfica A3. Energía plástica modelo final. Caída lateral opuesto

MODELO FINAL

CAÍDA HACIA MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO



Gráfica A4. Energía plástica modelo final. Caída mismo lateral

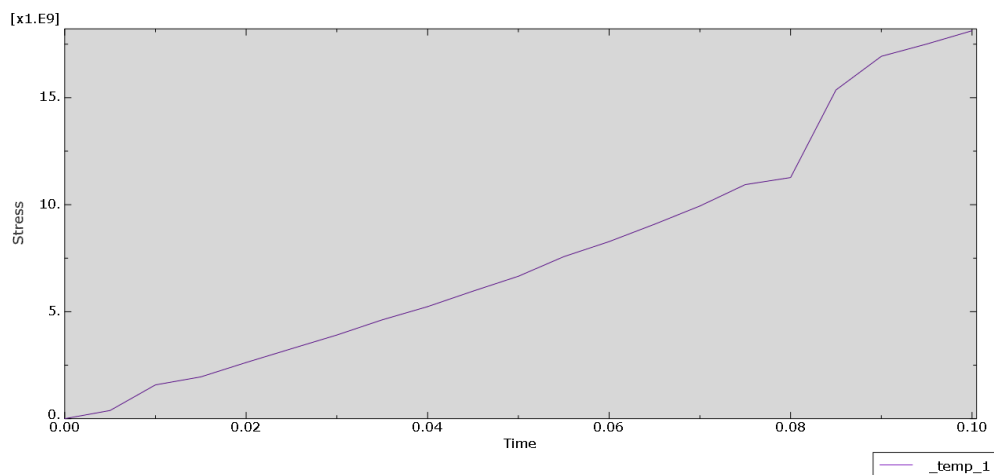
Anexo 5.2 Gráficas presión de contacto (GPa)

En este apartado se pueden ver las gráficas de la presión de contacto tanto para el modelo inicial como para el final.

La presión de contacto cuando la caída se produce al lado opuesto del vehículo es similar en todos los modelos. En cambio, en la caída hacia el mismo lateral, la presión de contacto aumenta de manera considerada.

MODELO INICIAL

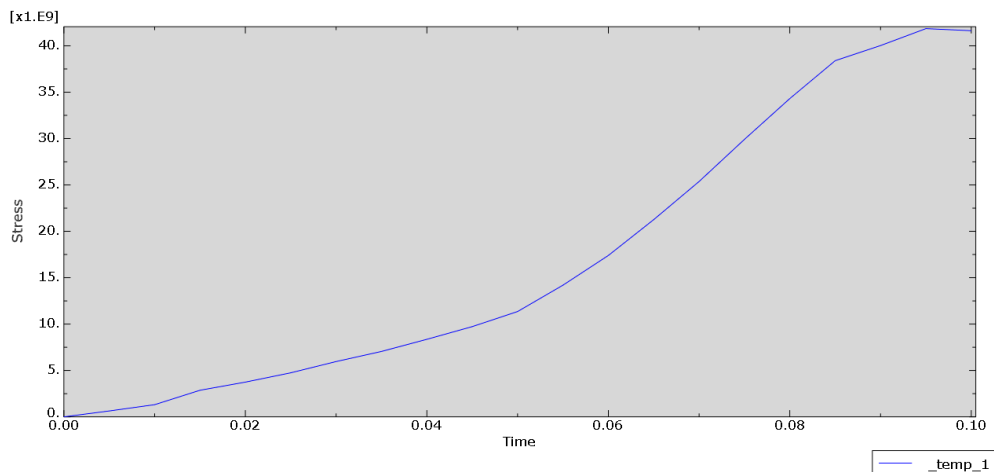
CAÍDA HACIA LATERAL OPUESTO DEL VEHÍCULO



Gráfica A5. Presión de contacto modelo inicial. Caída lateral opuesto

MODELO INICIAL

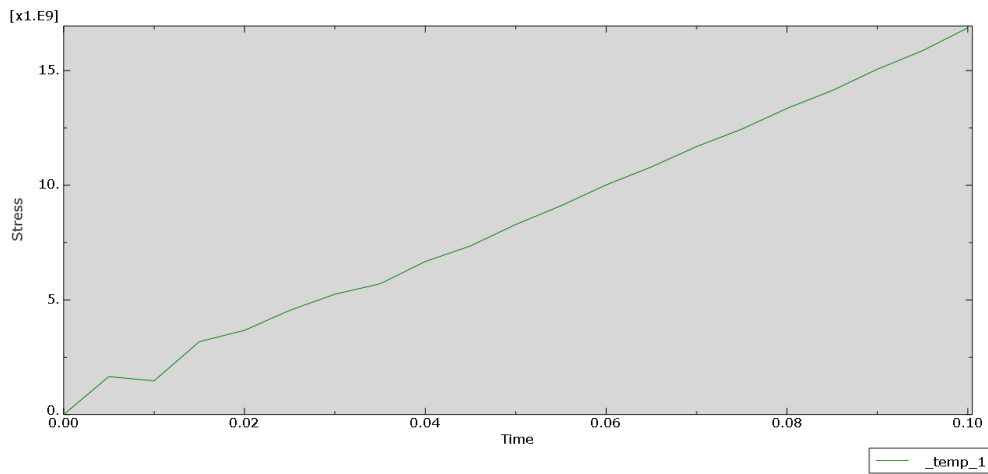
CAÍDA HACIA EL MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO



Gráfica A6. Presión de contacto modelo inicial. Caída mismo lateral

MODELO FINAL

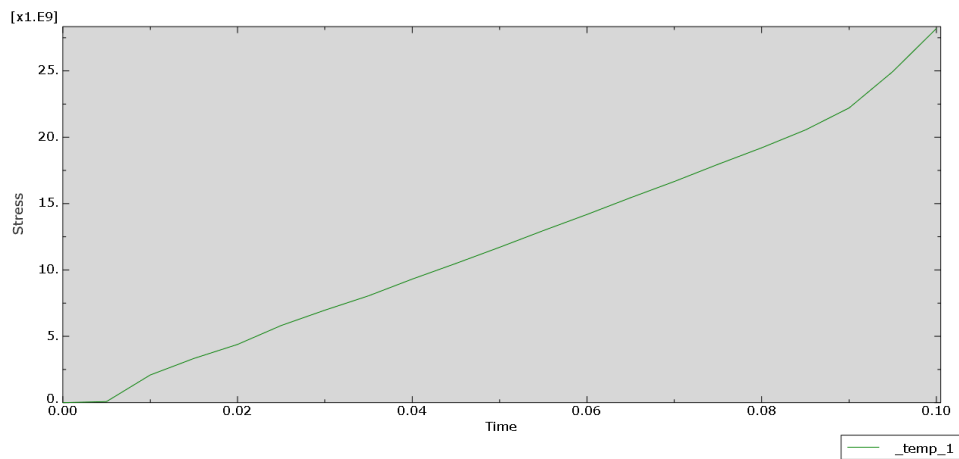
CAÍDA HACIA LATERAL OPUESTO DEL VEHÍCULO



Gráfica A7. Presión de contacto modelo final. Caída lateral opuesto

MODELO FINAL

CAÍDA HACIA MISMO LATERAL DEL VEHÍCULO



Gráfica A8. Presión de contacto modelo final. Caída mismo lateral