

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA POSICIÓN DEL PUNTO-H EN EL DISEÑO DEL ASIENTO TRASERO DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

DOCUMENTO 2 - MEMORIA

Alumno/Alumna: Herrera de Arteche, Ane

Director/Directora: Corral Saiz, Javier

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 18, Junio, 2019

ÍNDICE: MEMORIA

Índice de tablas e ilustraciones	iv
1. Introducción.....	10
2. Planteamiento general	10
3. Objeto	12
4. Alcance	13
5. Antecedentes.....	13
5.1. Punto de referencia del asiento y punto de cadera	14
5.2. Sistema de referencia 3-D	18
5.3. Método de medición del punto-H	19
5.4. Factores influyentes en el punto-H	21
5.5. Maniquí con punto-H o HPM.....	22
5.6. Regulaciones del punto-H y del HPM	22
6. Normas y referencias	23
6.1. Disposiciones legales y normas aplicadas.....	23
6.1.1. Norma UNE	23
6.1.2. ISO Normas	23
6.1.3. SAE Internacional.....	23
6.1.4. ECE Regulaciones	24
6.1.5. Federal Motor Vehicle Safety Standards.....	24
6.2. Bibliografía.....	24
6.3. Otras referencias	25
7. Nomenclatura	25
8. Programas de diseño.....	26
9. Requisitos de diseño.....	26
10. Diseño inicial.....	26
10.1. Diseño geométrico	27
10.2. Definición de materiales.....	32
10.2.1. Estructura metálica.....	32
10.2.2. Espumas.....	34
10.3. Definición de cargas	41
11. Modelo numérico para el estudio del punto-H.....	42
11.1. Análisis de elementos finitos.....	43
11.2. Resultados numéricos	49

12. Mediciones experimentales del punto-H.....	68
13. Análisis de resultados	71
13.1. Comparación de resultados numéricos y mediciones experimentales	71
13.2. Valoraciones iniciales	73
14. Análisis de alternativas	73
14.1. Tabla de resumen	86
15. Diseño final	87
15.1. Diseño geométrico	87
15.2. Definición de materiales.....	88
15.3. Definición de cargas	92
15.4. Resultados numéricos	93
15.5. Mediciones experimentales	103
15.6. Análisis de resultados.....	104
15.7. Valoraciones finales.....	106
16. Conclusiones.....	111

Índice de tablas e ilustraciones

Tabla 1. Tolerancias de las medidas del punto-H para el asiento trasero de un modelo determinado	16
Tabla 2. Límites legales del punto-H para el asiento trasero de un modelo determinado	18
Tabla 3. Dimensiones generales del diseño inicial del asiento	31
Tabla 4. Propiedades del material <i>ASTM A606 HSLA Steel</i> de placas y refuerzos	33
Tabla 5. Propiedades del material <i>420 HSLA Steel</i> de los tubos	33
Tabla 6. Densidad y dureza de la espuma del cojín en el diseño inicial	37
Tabla 7. Densidad y dureza de las espumas de respaldo en el diseño inicial	37
Tabla 8. Propiedades del material <i>PUR 50</i> necesarias para definir el modelo Neo-Hookeano (no lineal) .	38
Tabla 9. Propiedades del material <i>PUR 50</i> lineal	40
Tabla 10. Valores y calidad del parámetro <i>Skewness</i>	48
Tabla 11. Resultados numéricos de la proyección del punto-H en el asiento completo inicial (con respaldo)	64
Tabla 12. Resultados numéricos del punto-H real en el asiento completo inicial (con respaldo)	64
Tabla 13. Resultados numéricos de la proyección del punto-H en el asiento parcial inicial (sin respaldo)	67
Tabla 14. Resultados numéricos del punto-H real en el asiento parcial inicial (sin respaldo)	67
Tabla 15. Comparación de resultados del punto-H real del asiento inicial con y sin respaldo	67
Tabla 16. Comparación del número de elementos en <i>ANSYS Workbench</i> de las simulación del asiento con y sin respaldo	68
Tabla 17. Mediciones experimentales del punto-H en los prototipos del diseño inicial	70
Tabla 18. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 1 del diseño inicial.....	71
Tabla 19. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 2 del diseño inicial.....	72
Tabla 20. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 3 del diseño inicial.....	72
Tabla 21. Propiedades principales de los diferentes componentes con impacto en el punto-H	76

Tabla 22. Resumen de las deformaciones de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> de los tres módulos del asiento en el diseño inicial	77
Tabla 23. Resumen de las tensiones de Von Mises de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> de los tres módulos del asiento en el diseño inicial	79
Tabla 24. Mediciones del punto-H de prototipos con y sin fundas.....	82
Tabla 25. Mediciones de las propiedades de la espuma de cojín en los prototipos del diseño inicial	85
Tabla 26. Mediciones de las propiedades de las espumas de respaldo en los prototipos del diseño inicial	85
Tabla 27. Tabla de resumen del análisis de alternativas para el diseño final	87
Tabla 28. Densidad y dureza de la espuma del cojín en el diseño inicial	89
Tabla 29. Propiedades del material <i>PUR 60</i> necesarias para definir el modelo Neo-Hookeano (no lineal)	90
Tabla 30. Resultados numéricos de la proyección del punto-H en el asiento parcial final (sin respaldo)	102
Tabla 31. Resultados numéricos del punto-H real en el asiento parcial final (sin respaldo)	102
Tabla 32. Mediciones experimentales del punto-H en los prototipos del diseño final.....	103
Tabla 33. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 1 del diseño final	104
Tabla 34. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 2 del diseño final	105
Tabla 35. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 3 del diseño final	105
Tabla 36. Mediciones de las propiedades de la espuma de cojín en los prototipos del diseño final	106
Tabla 37. Resumen de las deformaciones de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> de los tres módulos del asiento en el diseño final.....	107
Tabla 38. Resumen de las tensiones de Von Mises de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> de los tres módulos del asiento en el diseño final	109
Imagen 1. Asiento trasero de un vehículo SUV de clase B	12
Imagen 2. Localización del punto-H (en rojo)	14

Imagen 3. Punto-SR definido por el fabricante para los tres módulos del asiento mostrado en la espuma del cojín.....	15
Imagen 4. Volumen de tolerancias para el punto-H según el fabricante alrededor del punto-SR (en rojo)	17
Imagen 5. Superficie de tolerancias para el punto-H según el fabricante (modelo 2-D)	17
Imagen 6. Desviación del cojín del asiento causada por el Maniquí con Punto-H.....	18
Imagen 7. Sistema de referencia 3-D	19
Imagen 8. Carriles del asiento colocados en la carrocería del vehículo – Vista alzado.....	27
Imagen 9. Base de la estructura metálica en el diseño inicial (tubos y refuerzos) – Vista isométrica.....	28
Imagen 10. Respaldo de la estructura metálica en el diseño inicial (placas) – Vista frontal.....	28
Imagen 11. Diseño geométrico inicial de la espuma del cojín con las cavidades para los SBR en amarillo – Vista posterior.....	29
Imagen 12. Diseño geométrico inicial de la espuma del cojín – Vista Isométrica.....	30
Imagen 13. Diseño geométrico inicial de las espumas del respaldo del 60% - Vistas isométricas frontal y posterior.....	30
Imagen 14. Diseño geométrico inicial de las espumas del respaldo del 40% - Vistas isométricas frontal y posterior.....	31
Imagen 15. Diseño geométrico inicial del asiento completo – Vistas (laterales) frontal y trasera	31
Imagen 16. Modelo Neo-Hookean del material <i>PUR 50</i>	38
Imagen 17. Tabla de valores y gráfica del ensayo 1: <i>Uniaxial Test Data</i> del material <i>PUR 50 no lineal</i>	39
Imagen 18. Tabla de valores y gráfica del ensayo 2: <i>Biaxial Test Data</i> del material <i>PUR 50 no lineal</i>	39
Imagen 19. Tabla de valores y gráfica del ensayo 3: <i>Shear Test Data</i> del material <i>PUR 50 no lineal</i>	40
Imagen 20. Dirección y magnitud de la fuerza que el HPM ejerce en el asiento.....	41
Imagen 21. Mapa de presiones de un pasajero de percentil 95 en un asiento general	42
Imagen 22. Contacto del HPM con el cojín del asiento inicial en los tres módulos del mismo	42

Imagen 23. Modelo inicial del asiento completo a simular	43
Imagen 24. Pasos del sistema de análisis “ <i>Static structural</i> ” de <i>ANSYS Workbench</i>	45
Imagen 25. Estructura metálica del diseño inicial simplificado – Vista isométrica.....	49
Imagen 26. Espumas de respaldo del diseño inicial simplificado – Vista isométrica	50
Imagen 27. Espuma del cojín del diseño inicial simplificado – Vista isométrica	50
Imagen 28. Simulación con el material <i>PUR 50 lineal</i> en el punto-H del módulo 1.....	51
Imagen 29. Simulación con el material <i>PUR 50 no lineal</i> en el punto-H del módulo 1.....	51
Imagen 30. Contacto espuma 40% - placa de refuerzo 40%.....	52
Imagen 31. Contacto espuma 60% - placa de refuerzo 60%.....	53
Imagen 32. Contacto espuma 40% - espuma 60%.....	53
Imagen 33. Contacto espumas respaldo – espuma cojín.....	54
Imagen 34. Contacto espuma cojín – refuerzos.....	54
Imagen 35. Contacto refuerzos – tubos.....	55
Imagen 36. Mallado del modelo de asiento inicial	56
Imagen 37. Gráfica del valor de <i>Skewness</i> de medida de calidad del mallado en el modelo inicial.....	56
Imagen 38. Soporte fijo – Perfiles tubulares en el modelo inicial.....	57
Imagen 39. Soportes sin fricción – Espumas de respaldo (a ambos lados) y cojín en la parte posterior y (a ambos lados) en sus laterales en el modelo inicial	59
Imagen 40. Definición de la carga del HPM en el módulo 1 (arriba) y 3 (abajo) del asiento en el modelo inicial.....	60
Imagen 41. Definición de la carga del HPM en el módulo 2 del asiento en el modelo inicial.....	60
Imagen 42. Distancia en <i>OZ</i> del punto-SR lateral a la superficie del cojín del modelo inicial (módulos 1 y 3) – Vista de corte	61
Imagen 43. Distancia en <i>OZ</i> del punto-SR central a la superficie del cojín del modelo inicial (módulo 2) – Vista de corte	62

Imagen 44. Geometría del asiento completo (con respaldo) del modelo inicial utilizada en la simulación con <i>ANSYS Workbench</i>	62
Imagen 45. Resultado numérico de la proyección del punto-H en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 1. Asiento completo inicial (con respaldo).....	63
Imagen 46. Resultado numérico de la proyección del punto-H en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 2. Asiento completo inicial (con respaldo).....	63
Imagen 47- Resultado numérico de la proyección del punto-H en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 3. Asiento completo inicial (con respaldo).....	64
Imagen 48. Geometría del asiento parcial (sin respaldo) del modelo inicial utilizada en la simulación con <i>ANSYS Workbench</i>	65
Imagen 49. Resultado numérico de la proyección del punto-H en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 1. Asiento parcial inicial (sin respaldo).....	65
Imagen 50. Resultado numérico de la proyección del punto-H en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 2. Asiento parcial inicial (sin respaldo).....	66
Imagen 51. Resultado numérico de la proyección del punto-H en <i>ANSYS Workbench</i> del modulo 3. Asiento parcial inicial (sin respaldo).....	66
Imagen 52. Diagrama de Causa-Efecto para las desviaciones del punto-H	74
Imagen 53. Deformación en OZ de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 1 – Diseño inicial	78
Imagen 54. Deformación en OZ de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 2 – Diseño inicial	78
Imagen 55. Deformación en OZ de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 3 – Diseño inicial	79
Imagen 56. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 1 – Diseño inicial	80
Imagen 57. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 2 – Diseño inicial	80

Imagen 58. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 3 – Diseño inicial	81
Imagen 59. Cojín de la espuma con huecos para la posición de los SBR laterales (módulos 1 y 3). Izquierda: sin SBR – Derecha: con SBR).....	83
Imagen 60. Modelo Neo-Hookean del material <i>PUR 60</i>	90
Imagen 61. Tabla de valores y gráfica del ensayo 1: <i>Uniaxial Test Data</i> del material <i>PUR 60 no lineal</i>	91
Imagen 62. Tabla de valores y gráfica del ensayo 2: <i>Biaxial Test Data</i> del material <i>PUR 60 no lineal</i>	91
Imagen 63. Tabla de valores y gráfica del ensayo 3: <i>Shear Test Data</i> del material <i>PUR 60 no lineal</i>	92
Imagen 64. Contacto del HPM con el cojín del asiento final en los tres módulos del mismo.....	92
Imagen 65. Modelo final del asiento parcial a simular	93
Imagen 66. Mallado del modelo de asiento final.....	95
Imagen 67. Gráfica del valor de <i>Skewness</i> de medida de calidad del mallado del modelo final	95
Imagen 68. Soporte fijo – Perfiles tubulares en el modelo final	96
Imagen 69. Definición de la carga del HPM en el módulo 1 (izda.) y 3 (dcha.) del asiento en el modelo final	98
Imagen 70. Definición de la carga del HPM en el módulo 2 del asiento en el modelo final	99
Imagen 71. Distancia en <i>OZ</i> del punto-SR lateral a la superficie del cojín del modelo final (módulos 1 y 3) – Vista de corte	100
Imagen 72. Distancia en <i>OZ</i> del punto-SR central a la superficie del cojín del modelo final (módulo 2) – Vista de corte	100
Imagen 73. Geometría del asiento parcial (sin respaldo) del modelo final utilizada en la simulación con <i>ANSYS Workbench</i>	100
Imagen 74. Resultado numérico de la proyección del punto-H en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 1. Asiento parcial final (sin respaldo).....	101
Imagen 75. Resultado numérico de la proyección del punto-H en <i>ANSYS Workbench</i> del módulo 2. Asiento parcial final (sin respaldo).....	101

Imagen 76. Resultado numérico de la proyección del punto-H en *ANSYS Workbench* del módulo 3.
Asiento parcial final (sin respaldo)..... 102

Imagen 77. Deformación en *OZ* de la estructura metálica en *ANSYS Workbench* del módulo 1 – Diseño
final 107

Imagen 78. Deformación en *OZ* de la estructura metálica en *ANSYS Workbench* del módulo 2 – Diseño
final 108

Imagen 79. Deformación en *OZ* de la estructura metálica en *ANSYS Workbench* del módulo 3 – Diseño
final 108

Imagen 80. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en *ANSYS Workbench* del módulo 1 – Diseño
final 109

Imagen 81. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en *ANSYS Workbench* del módulo 2 – Diseño
final 110

Imagen 82. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en *ANSYS Workbench* del módulo 3 – Diseño
final 110

1. Introducción

La intensa competencia entre las compañías automovilísticas internacionales y las demandas de los clientes de esta industria hacen necesario que todos los fabricantes de vehículos alcancen un nivel de calidad superior para competir y ser atractivos en el mercado del automóvil.

Durante el diseño inicial del vehículo, la posición del ocupante en el asiento se utiliza para determinar las dimensiones interiores principales de la cabina. Una de las referencias más básicas para localizar la colocación de los pasajeros dentro del automóvil, es la zona donde se ubica la cadera de los pasajeros, esto se conoce como el punto de referencia (punto-SR) determinado por el fabricante en la fase primaria del diseño. Cuando este punto se mide en un prototipo de un asiento se distingue como punto-H, es decir, el punto-H es el obtenido en el resultado numérico y en la medición experimental. Más tarde se compara con el punto-SR para su evaluación. El cumplimiento de los requisitos acordados depende de la ubicación del punto-H y, debido a esto, es muy importante asegurar que la posición final de tal punto caiga en el cuadro de tolerancias establecido por el fabricante en el proceso de diseño, es decir, en la posición del punto-SR.

El presente informe analiza la influencia del punto-H en la validación del diseño del asiento trasero de un modelo determinado de automóvil.

2. Planteamiento general

Para comenzar, el estudio del punto-H se realiza sobre el asiento de un nuevo modelo de vehículo automóvil. En este escrito se desarrolla la búsqueda de un diseño del asiento trasero que cumpla con los requisitos del cliente, con intención de encontrar una solución que permita la fabricación en serie del vehículo con dicho producto.

El "Punto de Cadera", conocido como punto-H, es la ubicación teórica de la cadera de un ocupante. Análogamente, es el nombre del resultado obtenido en las simulaciones y mediciones experimentales. Este punto se considera fijo en la posición de diseño del asiento y se mueve con él cuando éste se ajusta. Por otro lado, el punto-SR, o "Punto de referencia del

asiento", es el punto de referencia desde donde parten todos los parámetros de diseño, elegido por el fabricante. Este punto clave es único para cada modelo de automóvil, se define con respecto al sistema de referencia establecido para el vehículo en particular, y está calculado por el resultado de una encuesta antropométrica de la población objetivo. Los investigadores de mercado estudian las características de un país en concreto y luego se centran en la población objetivo para la cual se debe desarrollar el vehículo. Una vez se identifica este conjunto, el siguiente paso es establecer el percentil de población para el cual se debe diseñar el vehículo. Con los resultados de la encuesta mencionada anteriormente, el resultado dictado por la mayoría de la población encuestada (más del 80%) decide el percentil real para el cual se debe crear el vehículo. En este caso, el fabricante trata de ofrecer una posición de conducción óptima para la población objetivo. Estos datos proporcionan la información crítica para establecer un único punto; alrededor del cual, la ergonomía y los interiores del vehículo están diseñados.

Partiendo del conocimiento de estos datos puede comenzar el proceso de diseño inicial. Con el debido análisis de la normativa y del estudio de las restricciones geométricas requeridas, se modela el primer boceto mediante un software de CAD. Posteriormente, utilizando el programa de simulación *ANSYS Workbench* se verifica el modelo por el Método de Elementos Finitos (MEF). Así, una vez confirmado el modelo se procede a la fabricación del prototipo. Sobre éste se realizan mediciones experimentales del punto-H y cuando los resultados sean válidos se especifica el diseño final. Si no lo fuera así, se volvería a la fase de modelado en CAD hasta obtener el resultado deseado.

El estudio sobre el alcance del punto-H en el asiento se lleva a cabo utilizando las máquinas FAROArm, FAROScanArm y el Maniquí con Punto-H (HPM). El brazo de medición, FAROArm, sirve para realizar análisis dimensionales y controles de calidad en el asiento. Por otro lado, el ScanArm genera nubes de puntos con o sin contacto para la comparación con modelo de CAD. Esta tecnología está reconocida como la solución de medición 3-D portátil más innovadora del mundo para metrología industrial.

El punto-H se determina según la norma *ISO 6549*, en particular, atendiendo a las especificaciones del fabricante establecidas en el estándar ECE: ECE-R 17. En último lugar, la norma *SAE J826* ha sido elaborada para lograr el diseño de un maniquí tridimensional de características universales que facilite la evaluación de los asientos de los vehículos. El maniquí reproduce las características de peso y constitución de determinados percentiles de la población.

3. Objeto

El objeto del estudio es, realizar y validar el diseño del asiento trasero de un automóvil SUV de la clase B, mediante diferentes herramientas de cálculo y cumpliendo con la normativa y las restricciones geométricas establecidas. Si el modelo se considera válido, es decir, si cumple con los requisitos de diseño, el siguiente paso es realizar mediciones experimentales en un prototipo utilizando la maquinaria adecuada y valorar los resultados obtenidos en el ensayo. Si el prototipo es apto, especificar el diseño final y fabricar el producto en serie. En caso de que el prototipo no sea apto, realizar un estudio con sus propuestas de modificación en los propios componentes del asiento que lo necesiten y crear un nuevo modelo implementando los cambios en el diseño hasta lograr su validez.

Este vehículo tiene una particularidad, no solamente es el SUV más pequeño de la marca alemana en esta gama; si no que además permite la posibilidad de colocar el asiento trasero en dos posiciones distintas, desplazándolo hacia adelante y hacia atrás, recorriendo una distancia de hasta 15 centímetros. En resumen, se busca el diseño de un asiento trasero de tres plazas de tipo banco, ajuste longitudinal manual con banqueta fija y respaldo abatible asimétrico.

El estudio del punto-H tiene lugar en la empresa *Faurecia Autositze GmbH* en Stadthagen, Alemania. El proyecto es realizado por Ane Herrera de Arteché con la ayuda del cualificado y experimentado equipo de *Faurecia* y dirigido por el profesor Javier Corral Saiz.



Imagen 1. Asiento trasero de un vehículo SUV de clase B

4. Alcance

El presente estudio busca una solución que sea compatible con las especificaciones relativas al alcance del punto-H. Por lo tanto, a partir del diseño modelado, las mediciones realizadas y la valoración de los resultados obtenidos, se define un diseño definitivo y que cumpla con los requisitos establecidos. Por ello, el proyecto se puede organizar en las siguientes fases:

- ❖ Diseño dimensional, geométrico y material del modelo de un asiento trasero de un automóvil de la clase B.
- ❖ Estudio de las deformaciones de los componentes del asiento mediante el Método de Elementos Finitos (MEF).
- ❖ Ejecución de la medida del punto-H siguiendo el estándar ECE: ECE-R 17.
- ❖ Análisis de los parámetros característicos de las piezas del asiento con impacto en el punto-H.
- ❖ Ajuste del diseño y creación del modelo final para la producción en serie.

Las especificaciones que se deben cumplir son:

1. Las tolerancias requeridas para el punto-H.
2. Encontrar una solución económica y viable.
3. Alcanzar los estándares de confort impuestos por el fabricante.

5. Antecedentes

Al tratar con un vehículo nuevo, los datos de partida del estudio están condicionados. Es decir, el vehículo en cuestión utiliza características de uno anterior, ya competente en el mercado, comparte plataforma con ese otro modelo de automóvil. Las bases del diseño inicial del asiento nuevo se fundamentan en las características, ya conocidas, de este modelo anterior.

Por un lado se cuenta con archivos CAD con la definición de las geometrías de componentes de un asiento trasero genérico de un automóvil, con excepción de los componentes que carecen de influencia en el aspecto base de este estudio.

También, los datos pertenecientes a las cargas empleadas para el estudio del punto-H y de los componentes que conforman el asiento son conocidos. De la misma manera, se conocen las características generales de los materiales de dichos componentes. Debido a la confidencialidad del proyecto la especificación de las propiedades de los materiales utilizados es limitada, por lo que se exige un estudio específico para la definición de los mismos, de forma que se alcance la mayor similitud posible a los reales.

Por otro lado, se dispone de la normativa que establece el proceso a seguir para obtener los valores de medición del punto-H, en mediciones experimentales de los asientos traseros del modelo de automóvil en cuestión.

Por último, se conoce la posición del punto-SR definido y exigido por el cliente en sus requerimientos.

El estudio del punto-H se realiza en las instalaciones del fabricante del asiento con la maquinaria y medios que los mismos proporcionan.

5.1. Punto de referencia del asiento y punto de cadera

Primero, el entendimiento del concepto del punto-H (punto de cadera) y el punto-SR (punto de referencia) es esencial para la comprensión de este estudio. Para información adicional, consultar el *Anexo 1*.

El **punto-H** o "*Hip Point*" (punto de cadera), es la ubicación teórica de la cadera de un ocupante en un vehículo. A su vez, es el nombre que se le asigna al resultado de la medición realizada mediante el correspondiente Maniquí con Punto-H. Asimismo, se puede medir respecto a otras características del vehículo. De todas formas, es este caso en particular, se utiliza el mismo sistema de referencia para todos los diseños y mediciones llevadas a cabo en el estudio.

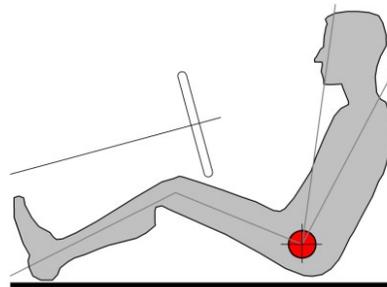


Imagen 2. Localización del punto-H (en rojo)

Además, el asiento trasero de este modelo es ajustable, lo que significa que tiene dos posiciones diferentes. La primera, cuando el asiento está en la posición inicial trasera y la segunda, cuando el asiento se desplaza hasta la posición más adelantada. Es decir, para tener un punto de referencia en la colocación de los pasajeros dentro del coche, el fabricante del vehículo define, para cada posición fija, lo que se conoce como el **punto-SR** o “Seat Reference Point” (Punto de Referencia del Asiento). Este punto es la referencia del creador para la definición del requisito de diseño. A su vez, sirve de referencia para todas las demás necesidades de diseño del vehículo en su totalidad. Se establece un punto-SR para cada posición del pasajero en el asiento y se define con respecto al sistema de referencia 3-D del vehículo. Este punto, normalmente, se determina a partir de los puntos de referencia del vehículo llamados puntos fiduciaros.

En otras palabras, el resultado válido de la prueba del punto-H se alcanza cuando el punto-H medido con el maniquí de prueba coincide con el punto-SR definido por el fabricante.

El punto-SR definido por el fabricante para este modelo en el asiento trasero en su posición inicial trasera es el mostrado en la siguiente imagen. El sistema de referencia utilizado se explica en el siguiente punto.

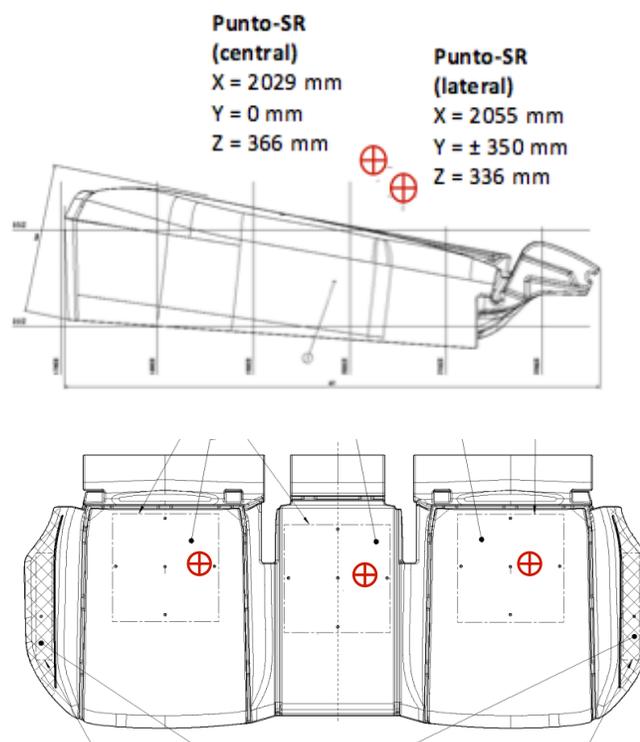


Imagen 3. Punto-SR definido por el fabricante para los tres módulos del asiento mostrado en la espuma del cojín

En la imagen anterior se muestran las tres posiciones posibles de un pasajero en el asiento trasero. La primera, en el modulo de la derecha o modulo del 40%, la segunda, en el modulo central, y la última, en el modulo de la izquierda o modulo del 60%.

Volviendo a lo anterior, el punto-H debe corresponder, teóricamente, con el punto-SR cuando el asiento se ajusta en su posición de diseño. Sin embargo, se establecen tolerancias para las posibles desviaciones del punto-H en los estudios prácticos, como se muestra en la tabla 1. Todas las medidas se expresan en milímetros; a excepción de los ángulos, ya especificados.

Tabla 1. Tolerancias de las medidas del punto-H para el asiento trasero de un modelo determinado

Posición del punto-H	Requisitos
Punto-H (Izquierda) / modulo 60%	$x = 2055 \pm 10$
	$z = 336 \pm 10$
	$y = 350 \pm 10$
Punto-H (Derecha) / modulo 40%	$x = 2055 \pm 10$
	$z = 336 \pm 10$
	$y = -350 \pm 10$
Punto-H (Central) / modulo central	$x = 2029 \pm 10$
	$z = 366 \pm 10$
	$y = 0 \pm 10$
Angulo torso izquierda/modulo 60%	$25^\circ \pm 1$
Angulo torso derecha /modulo 40%	$25^\circ \pm 1$
Angulo torso central	$25^\circ \pm 1$
Distancia desde el respaldo superior a la esquina inferior izquierda del soporte	> 25
Distancia desde el respaldo superior a la esquina inferior derecha del soporte	> 25
Distancia desde el respaldo superior a la esquina inferior central del soporte	> 25

Redundando en la importancia de la posición del punto-H en torno al punto-SR de diseño para el dimensionamiento global del vehículo, se recalca la importancia del cumplimiento de las tolerancias establecidas por el fabricante. Éstas se pueden resumir con la siguiente explicación.

Un fabricante de automóviles normalmente exige una tolerancia de 10mm alrededor del punto-SR. Es decir, el punto-H no debe estar a más de 10mm del punto-SR en todas sus direcciones: OY, OZ y OX. Si se consideran estas distancias respecto de un punto central,

punto-SR, se forma un cuerpo con forma de cubo en cuyo volumen deberá encontrarse la medición del punto-H para que el resultado sea válido.

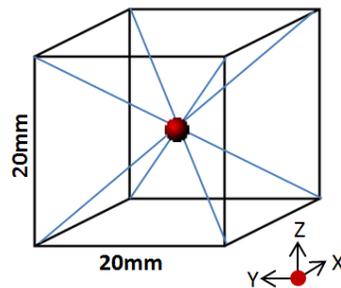


Imagen 4. Volumen de tolerancias para el punto-H según el fabricante alrededor del punto-SR (en rojo)

Simplificando el cuerpo 3-D de la figura anterior a un modelo 2-D queda un marco de desviaciones máximas admitidas como el mostrado en la siguiente figura:

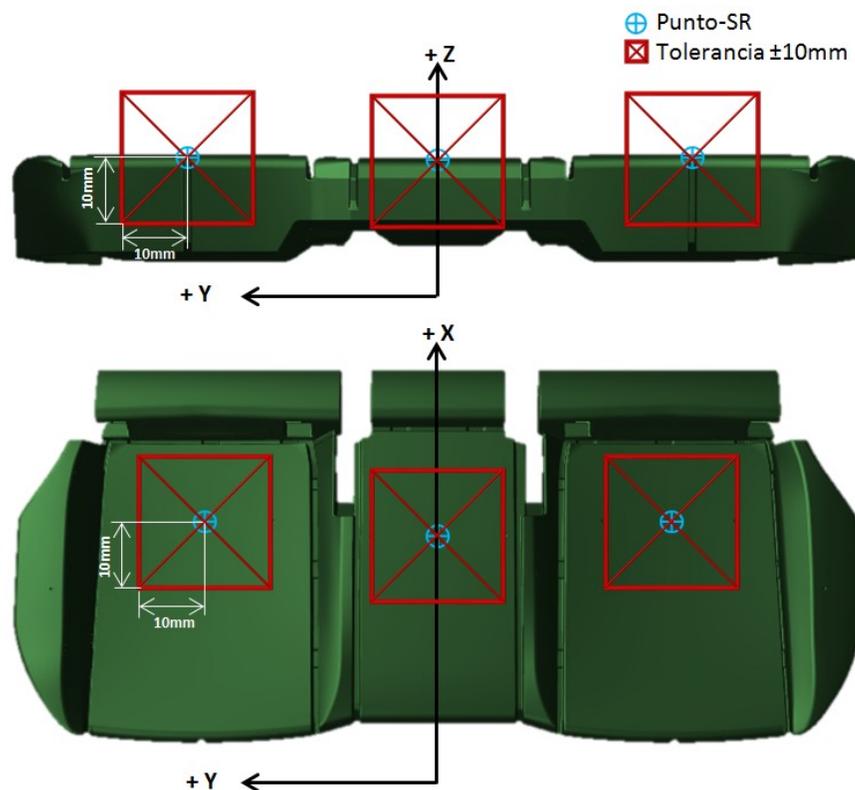


Imagen 5. Superficie de tolerancias para el punto-H según el fabricante (modelo 2-D)

Las tolerancias previamente descritas tienen que respetarse debido a las exigencias establecidas por el fabricante. De todas formas siempre hay unos límites legales (menos exigentes) que directamente se cumplen si se respetan los requisitos del fabricante. En este

caso particular los límites legales para la posición del punto-H, medidos en milímetros, son los siguientes:

Tabla 2. Límites legales del punto-H para el asiento trasero de un modelo determinado

Posición del punto-H	Requisitos
Punto-H (Izquierda) / modulo 60%	$x = 2055 \pm 25$
	$z = 336 \pm 25$
	$y = 350 \pm 25$
Punto-H (Derecha) / modulo 40%	$x = 2055 \pm 25$
	$z = 336 \pm 25$
	$y = -350 \pm 25$
Punto-H (Central) / modulo central	$x = 2029 \pm 25$
	$z = 366 \pm 25$
	$y = 0 \pm 25$

Si las tolerancias no se cumplen, se estudian las posibles causas de la desviación del punto-H y se realizan las modificaciones necesarias para que el resultado de la medición cumpla los requisitos de diseño del punto de referencia del asiento.

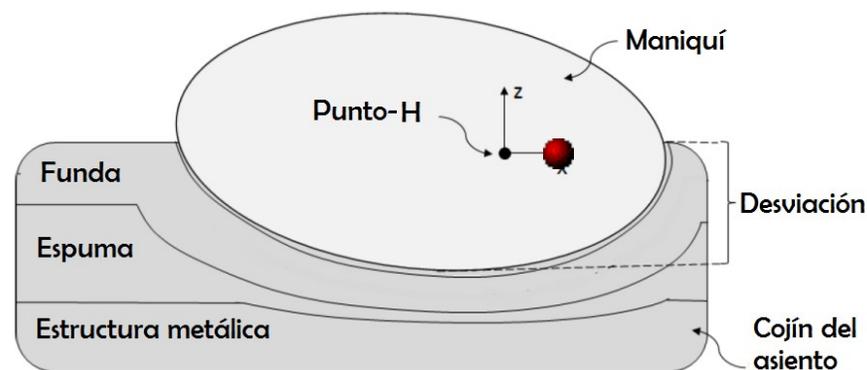


Imagen 6. Desviación del cojín del asiento causada por el Maniquí con Punto-H

5.2. Sistema de referencia 3-D

El sistema de referencia 3-D usado sigue la norma *ISO 4130* y define tres planos ortogonales establecidos por el fabricante del vehículo en el estado inicial del diseño, y el utilizado a lo largo de la evolución del proyecto hasta su etapa final. El plano *OY* es un plano longitudinal (definido en la norma *ISO 612*), el plano *OX* es un plano vertical y normal al plano *OY* y el plano *OZ* es un plano horizontal y normal a los planos *OY* y *OX*.

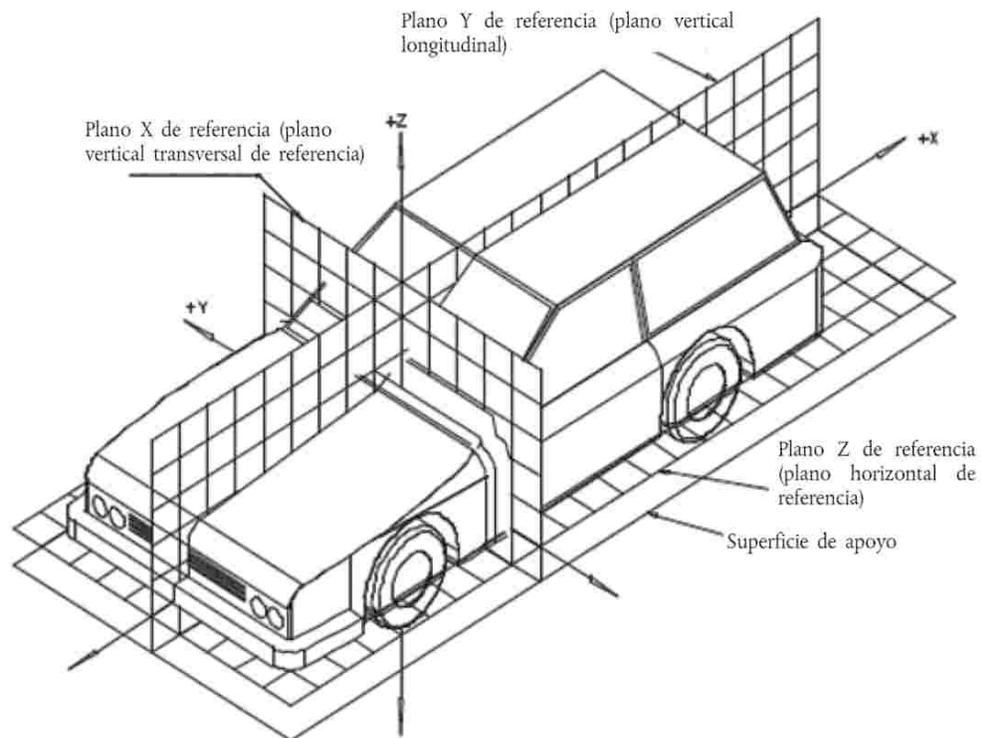


Imagen 7. Sistema de referencia 3-D

Especialmente, el punto-SR definido por el fabricante, en el modelo en particular, se mide en relación al plano OZ correspondiente a la unión de los centros de las cuatro ruedas. También, con relación al plano OY, que divide el coche por la mitad, y al plano OX, que pasa por el salpicadero.

5.3. Método de medición del punto-H

El procedimiento para medir el punto-H sigue la aplicación a la norma *ISO 6549*, en concreto, con atención a los estándares definidos por el fabricante en el *ECE: ECE-R 17*. Este estándar provee especificaciones e instrucciones para la utilización del Maniquí con Punto-H (HPM) en la evaluación de la posición del mismo en los diferentes asientos y módulos del automóvil.

El HPM es una herramienta física que establece puntos clave de referencia y mediciones en un vehículo. La herramienta de Diseño del Punto-H (HPD) es una versión CAD simplificada del HPM que puede usarse en conjunto con éste último para realizar mediciones adicionales o también puede usarse independientemente durante el diseño del producto. Estos

aparatos de medida del punto-H aportan un método que resulta en medidas fiables para la posición de pasajeros en los asientos del automóvil. Aunque no deben ser utilizados como herramientas que miden o indican las capacidades o el confort de los ocupantes. Hoy en día, el HPM está mundialmente regulado para la medición del punto-H.

Los modos de calibración del maniquí no fueron oficialmente escritos hasta que la SAE J826 fue publicada, norma que cumple el HPM. Las variaciones recogidas en este estándar son muy elevadas y permiten el uso, tanto del maniquí con un ancho de espalda de 395mm como el de 338mm. Los fabricantes de coches alemanes solo permiten el maniquí más nuevo con un ancho de espalda de 338mm y siguen el estándar previamente mencionado. La actual calibración del HPM deberá llevarse a cabo por una agencia autorizada por la SAE.

Este procedimiento de medida es delicado y puede afrontar desafíos que deben tenerse en cuenta a la hora de seguir las pautas establecidas por el método. Los principales retos son los siguientes:

- **Precisión:** como todos los puntos están localizados en un espacio abierto dentro del vehículo es importante tener precisión en la medición 3-D. La utilización de instrumentos, como las Máquinas de Medición de Coordenadas (CMM), muy precisos con alto nivel de exactitud ofrecen resultados concisos. En particular, estas mediciones se realizan con la ayuda del *FAROArm* y *FAROScanArm*, instrumentos de medición de contacto y también ópticos. Así, se elimina cualquier tipo de error que pueda ser causado con mediciones manuales.
- **Preparación del HPM:** preparar el maniquí físicamente sobre el asiento del vehículo requiere gran exactitud. El maniquí debe ser colocado siguiendo estrictamente los estándares adecuados. En este caso, la experiencia de los especialistas, de la empresa proveedora, a la hora de usar la HPM es extensa y cubre una amplia variedad de diferentes estilos de vehículos (para diferentes percentiles de población), por lo que se certifica exactitud y precisión en los resultados de las mediciones.
- **Tiempo:** la colocación del maniquí conlleva su tiempo y requiere estricta adherencia a la descripción del proceso en los estándares. La medición manual puede resultar pesada y por ello el uso de CMM para realizar mediciones más fáciles y precisas, una vez colocado el maniquí en su posición. La obtención de datos en CAD, gracias al programa de CMM, es de gran ayuda para la medición de otras dimensiones del vehículo completo.

5.4. Factores influyentes en el punto-H

Los factores con influencia en la posición del punto-H pueden ser numerosos si se tiene en cuenta hasta el mínimo detalle en relación con el diseño global del asiento. Partiendo de la experiencia en otros proyectos sobre los que se ha realizado el test del punto-H, algunos de los parámetros se pueden desconectar del origen del problema.

Así, revisando los estudios previos realizados en los asientos de otros modelos semejantes, se observa que la principal preocupación es el valor de la coordenada OZ en el punto-H adquirido. No obstante, también se observa alguna desviación en la coordenada OX, aunque la proporción es mínima, en comparación. La coordenada OY forma el plano de simetría del asiento y en la mayoría de casos siempre es correcta. Por consiguiente, se listan los factores generales que afectan a un resultado inválido como orientación para la solución de los posibles problemas en las mediciones del modelo en particular.

El valor en OZ del punto-H está mayormente influenciado por:

- El grosor de la espuma del cojín
- La dureza de la espuma del cojín
- La geometría de la espuma del cojín
- Las posibles desviaciones en la estructura metálica
- La posición del *Seat Belt Reminder* (SBR)
- La tensión en la funda del cojín
- El grosor de la espuma de confort en la funda del cojín

El valor en OX del punto-H está principalmente influenciado por:

- La posición de los pedúnculos en el asiento central
- El grosor de la espuma de confort en la funda del respaldo

Como se ha mencionado, estas características son de carácter general y por lo tanto solo sirven de orientación a la hora de estudiar los posibles problemas que surjan en este estudio. Si surgen estos problemas, el impacto que estas influencias tienen en el resultado final del punto-H se clasifica, ordena y prioriza atendiendo a las posibilidades y limitaciones presentes en el proyecto.

5.5. Maniquí con punto-H o HPM

Particularmente, el maniquí descrito en el *Anexo 2* es el usado globalmente para medir el punto-H. La construcción y los requerimientos del maniquí están especificados por estándares SAE. El HPM se utiliza en conjunto con la norma *J826* y actualmente tiene referencia en las regulaciones FMVSS y en los estándares ISO, haciendo de esta máquina la necesaria para la evaluación del punto-H en la fabricación de hoy en día. El maniquí ofrece libertad para localizar físicamente la posición de este punto, con exactitud, en cualquier tipo de asiento.

5.6. Regulaciones del punto-H y del HPM

La regulación *ECE: ECE R17* explica que el punto-H medido en un asiento, previamente ajustado en su posición fija de test, debe estar en un rango cuadrangular de 50mm alrededor del punto-SR. Para ello, todas las regulaciones se basan en el punto-SR. Como el impacto de obtener un resultado fuera de este rango es peligroso, especialmente para asientos delanteros, el cuadrado de 50mm debe respetarse siempre.

De todas formas, como se ha mencionado anteriormente, el fabricante ha reducido la desviación permitida de esta tolerancia, entre el punto-H y el punto-SR, a $\pm 10\text{mm}$ en cada dirección desde el punto-SR. Esto hace que los asientos de la industria del automóvil tengan demandas muy exigentes. La consecuencia de minimizar las tolerancias del punto-H en el plano OZ hace que el compromiso, entre la seguridad del conductor y la probabilidad de que la cabeza del conductor choque contra el techo o la luna del coche antes de que impacte contra el airbag, en caso de accidente, se pueda obviar. A su vez, amplía el conocimiento de los parámetros que afectan a la posición del punto-H, gracias a los estudios previos realizados para cumplir con estas tolerancias. Así, el estándar *FMVSS 208* exige mayores demandas en la posición del conductor, y de este modo en la posición del punto-H.

De la misma manera, esta norma obliga a la realización de la medición del punto-H con el HPM regulado por la *SAE J826* como se menciona en el apartado anterior.

6. Normas y referencias

6.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

Las disposiciones legales y normas consideradas en la realización de este estudio se separan por los diferentes mercados geográficos:

6.1.1. Norma UNE

- UNE 157001:2002 – Criterios generales para la elaboración de proyectos
- UNE 157001:2002 – Normas de los principios generales de representación, cajetines, acotación... etc., indicadas en la norma, en el punto 8.2

6.1.2. ISO Normas

- ISO 612:197, Road vehicles – Dimensions of motor vehicles and towed vehicles – Terms and definitions
- ISO 3833, Road vehicles – Types – Terms and definitions
- ISO 4130:1978, Road vehicles – Three-dimensional reference system and fiducial marks – Definitions
- ISO 6549, Road vehicles – Procedure for H-point and R-point determination
- ISO 20176:2011, Road vehicles – H-point machine (HPM-II) – Specifications and procedure for H-point determination
- ISO 845:2006, Cellular plastics rubbers – Determination of apparent density
- ISO 3386, Polymeric materials, cellular flexible – Determination of stress-strain characteristics in compression

6.1.3. SAE Internacional

- SAE J826, SAE Standard – Mannequins for use in defining vehicle seating accommodation
- SAE J1100, SAE Standard – Motor vehicle dimensions
- SAE J40004, SAE Standard – Positioning the H-Point Design Tool – Seating Reference Point and Seat Track Length

6.1.4. ECE Regulaciones

- ECE:ECE-R 17, Seats – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the seats, their anchorages and any head restraints

6.1.5. Federal Motor Vehicle Safety Standards

- FMVSS 208 – Occupant crash protection

6.2. Bibliografía

- [1] Macey Stacey, Geoff Wardle, Ralph Gilles, Freeman Thomas, Gordon Murray: *H-Point: The Fundamentals of Car Design & Packaging*. California, Design Studio Press, 2017.
- [2] Huei-Huang Lee: *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 17*. SDC Publications, 2017.
- [3] Polyurethane Foam Association, Inc: “Flexible polyurethane foam”. *Intouch*, Volumen 5, Número 2, Mayo 1996
- [4] Arvidson J.M., L.L. Sparks, Chen Guobang: “Tensile, compressive, and properties of a 64-kg/m³ polyurethane foam at low temperatures”. *National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce Boulder, Colorado*, 1983
- [5] Wit Witkiewicz*, Andrzej Zieliński: “Properties of the polyurethane (pu) light foams”. *Advances in materials science*, Volumen 6, Número 2, Octubre 2006
- [6] “Getting to understand moulded polyurethane foam for automotive seating”, disponible en: www.euromoulders.org
- [7] “Workbench user’s guide”, disponible en: sharcnet.ca
- [8] “Online materials resource information”, disponible en: <http://www.matweb.com>

6.3. Otras referencias

Las referencias utilizadas en este documento son las siguientes:

- Modelo general de un fabricante de automóviles y proyecto del proveedor – Documentación y planos del asiento trasero

7. Nomenclatura

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CMM	Máquinas de Medición de Coordenadas (<i>Coordinate Measuring Machines</i>)
ECE	<i>Economic Commission for Europe</i>
FMVSS	<i>Federal Motor Vehicle Safety Standards</i> (EEUU)
HPD	<i>Hip Point Design</i> (Diseño del Punto de Cadera)
HPM	<i>Hip Point Machine</i> (Maniquí con Punto-H)
HSLA	High Strength Low Alloy (Aceros de alta resistencia y baja aleación)
IFD	<i>Indentation Force Deflection</i> (Ensayo de dureza IFD)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
N/A	No Aplicable en el caso
Punto-H	Punto de Cadera
Punto-SR	Punto de Referencia del Asiento
PUR	Poliuretano
SAE	Society of Automotive Engineers
SBR	<i>Seat Belt Reminder</i> (Recordatorio de cinturón de seguridad)
SUV	<i>Sport Utility Vehicle</i> (Vehículo Utilitario Deportivo)
UNE	Una Norma Española
2-D	Dos Dimensiones
3-D	Tres Dimensiones

8. Programas de diseño

El software utilizado a lo largo del desarrollo del estudio tanto en el diseño como en las mediciones, es el siguiente:

- Faro, CAM2 MEASURE 10 (Software), Lake Mary (Florida, USA).
- Geomagic Quality 2012 (Software), Morrisville (North Carolina, USA).
- Siemens, SOLID EDGE ST10 (Software), Berlín (Alemania).
- Swanson Analysis Systems, Inc., ANSYS Workbench 18.2 (Software), Pittsburgh (Pennsylvania, USA).

9. Requisitos de diseño

El cliente, fabricante de automóviles, exige un resultado preciso y válido en la medición del punto-H para un modelo categórico de automóvil. Esto significa que las siguientes especificaciones concretadas por el fabricante tienen que ser alcanzadas:

- ✓ Cumplir las tolerancias requeridas para el punto-H (*Tabla 1*).
- ✓ Encontrar una solución económica y viable.
- ✓ Alcanzar los estándares de confort impuestos por el fabricante.
- ✓ Aplicar la normativa específica.
- ✓ Respetar las limitaciones dimensionales de diseño.

10. Diseño inicial

Para comenzar con el diseño del asiento de un vehículo, primero se estudia la normativa que éste debe cumplir según el modelo, posición del asiento en el automóvil, sistema de referencia definido, etc., sin olvidar los criterios particulares señalados por el fabricante del automóvil. Las normas y referencias seguidas en esta fase del proyecto se mencionan en el apartado: “4. Normas y referencias”.

El proceso de diseño se ha separado en las siguientes partes: diseño geométrico, definición de materiales y definición de cargas. Esto se debe a que el diseño inicial recoge

características del diseño geométrico en CAD, y a su vez de la definición de materiales y cargas, elementos necesarios en la simulación por elementos finitos mediante *ANSYS Workbench*.

10.1. Diseño geométrico

Con las condiciones concretadas por dicha normativa se procede al diseño geométrico inicial del asiento trasero. Las primeras restricciones geométricas son las dimensiones del asiento, al estar delimitadas por el volumen total de la carrocería. Así, las medidas del asiento en el eje *OY* deben estar contenidas en un espacio menor de 1746mm (anchura del vehículo sin retrovisores). En el caso del eje *OX*, su dimensión no puede superar los 850mm, y en el eje *OZ* debe ser menor que 700mm. Segundo, este asiento puede ser accionado mediante una palanca para moverlo en el plano horizontal a la posición adelantada o a la posición inicial trasera, por lo que tiene que ser un diseño que permita semejante mecanismo con la mayor facilidad y efectividad posible. Por último, recordar que el asiento debe ser tipo banco y con un respaldo abatible asimétrico

Para ello, se elige una estructura metálica con una base formada por dos perfiles tubulares contenidos en el plano *XY* y paralelos al *YZ*. Estos tubos se unen, por dos piezas perpendiculares a ellos, a la carrocería del vehículo de tal manera que se acoplan en los carriles ensamblados en la estructura del automóvil. Estas guías fijan el asiento en su posición y a la vez permiten su movimiento en el plano horizontal al accionar la palanca.



Imagen 8. Carriles del asiento colocados en la carrocería del vehículo – Vista alzado

Siguiendo con la base de la estructura metálica, se definen cinco perfiles de refuerzo perpendiculares a los tubos. Estos refuerzos ofrecen mejor soporte y mayor sujeción para los pasajeros. Se dividen de la siguiente manera, se colocan dos refuerzos en cada módulo lateral de forma simétrica, y el quinto se coloca en la mitad de la base de la estructura metálica como soporte del modulo central. Los perfiles de estos refuerzos definen la geometría inferior de la espuma del cojín. Por esta razón, los refuerzos laterales son distintos al refuerzo central.

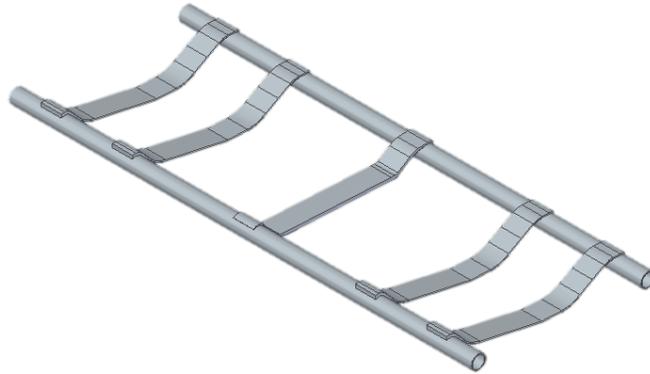


Imagen 9. Base de la estructura metálica en el diseño inicial (tubos y refuerzos) – Vista isométrica

Como respaldo de la estructura metálica del asiento, éste se puede abatir y se divide en dos secciones asimétricas para crear más espacio en el vehículo, si el conductor o pasajero lo precisara. Se elige una placa dividida en dos partes, ocupando el 40 y 60 por ciento, del ancho total del respaldo cada una de ellas. Para facilitar el acople de las espumas a ambas partes de la estructura metálica, base y respaldo, se definen varios elementos auxiliares. En concreto para la base, se añaden las piezas de refuerzo mencionadas con anterioridad. Por otro lado, en el respaldo se añaden perfiles con forma de prismas rectangulares, formando un cuadro o marco de refuerzo en cada respaldo útil, es decir, un marco en la placa del 40 por ciento del asiento y otro en la placa del 60 por ciento.

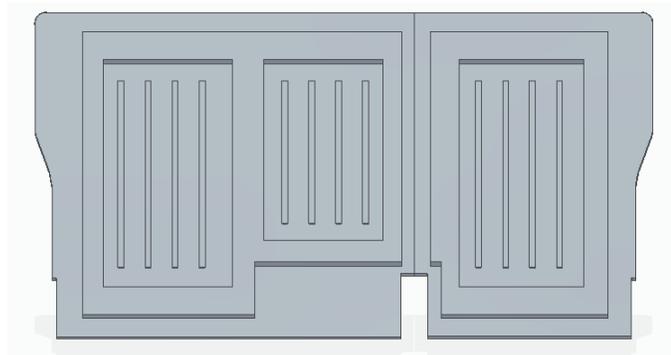


Imagen 10. Respaldo de la estructura metálica en el diseño inicial (placas) – Vista frontal

En el caso de las espumas, a pesar de ser un asiento trasero y de que existen varias combinaciones posibles de cojines y respaldos, éstas están condicionadas directamente por el diseño de la estructura metálica. Como en este caso en concreto el asiento puede arrastrarse horizontalmente y es de tipo banco, se elige un cojín completo, es decir, una única pieza que incluya los tres módulos del asiento trasero (dos laterales y uno central). La geometría del cojín debe adaptar los elementos en contacto con él, como los tres pedúnculos y los tres SBR. Para los pedúnculos de los cinturones de seguridad se crean dos huecos. El primero se sitúa en la separación ficticia entre el módulo 3 (derecho) y el 2 (central), donde se colocan dos pedúnculos correspondientes a los cinturones de seguridad de los pasajeros de dichos módulos. Después, el segundo hueco, se ubica en la separación ficticia del módulo 1 (izquierdo) y el 2 (central), donde se coloca el pedúnculo correspondiente al ocupante del módulo izquierdo. Por otro lado para los SBR, son sensores que se colocan en los refuerzos de la estructura metálica justo debajo del la espuma del cojín. En particular, el SBR de los módulos laterales, se colocan entre los dos refuerzos como si formara un puente entre ambos. Para asegurar la funcionalidad de estos dispositivos se decide crear una pequeña cavidad en la espuma del cojín que adapta al SBR en su colocación de diseño. En el caso del SBR central, no hace falta definir ningún perfil en la espuma del cojín porque el dispositivo va colocado en el propio refuerzo. También, se diferencian entre las zona centrales y las zonas laterales o lóbulos de los módulos 1 y 3 (derecho e izquierdo, respectivamente) del asiento. Se diseñan con diferentes geometrías, haciendo que los lóbulos tengan un mayor volumen para la sujeción y confort del ocupante.

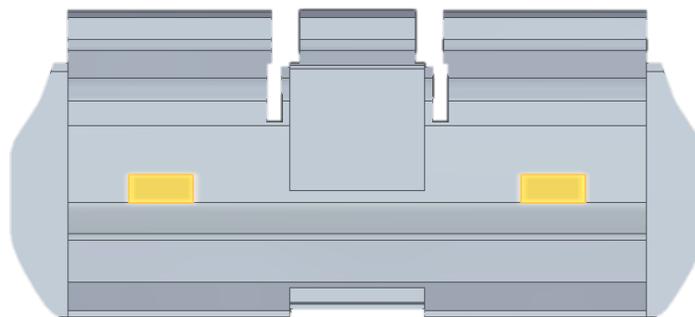


Imagen 11. Diseño geométrico inicial de la espuma del cojín con las cavidades para los SBR en amarillo – Vista posterior

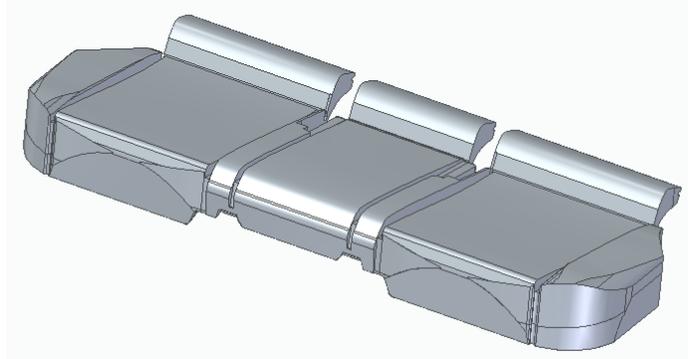


Imagen 12. Diseño geométrico inicial de la espuma del cojín – Vista Isométrica

En el caso de las espumas de respaldo no se puede hacer lo mismo, ya que las propias placas de la estructura metálica nos obligan a crear dos espumas distintas. Así, una espuma ocupa el 40 por ciento, es decir, el modulo del asiento lateral derecho y la segunda espuma el 60 por ciento, completando así el respaldo con los módulos central e izquierdo unidos. De la misma manera que en las placas de la estructura metálica se definen marcos de refuerzo para ayudar al acople entre las placas y las espumas del respaldo, en las espumas se definen los perfiles contrarios de tales marcos, de tal manera que el acople entre ambas piezas sea sencillo y exacto. También, se diferencian entre las zona frontales y las zonas laterales o lóbulos de los módulos 1 y 3 (derecho e izquierdo, respectivamente) del asiento. Se diseñan con diferentes geometrías, haciendo que los lóbulos tengan un mayor volumen para la sujeción y confort del ocupante, de manera similar a lo diseñado para la espuma del cojín.

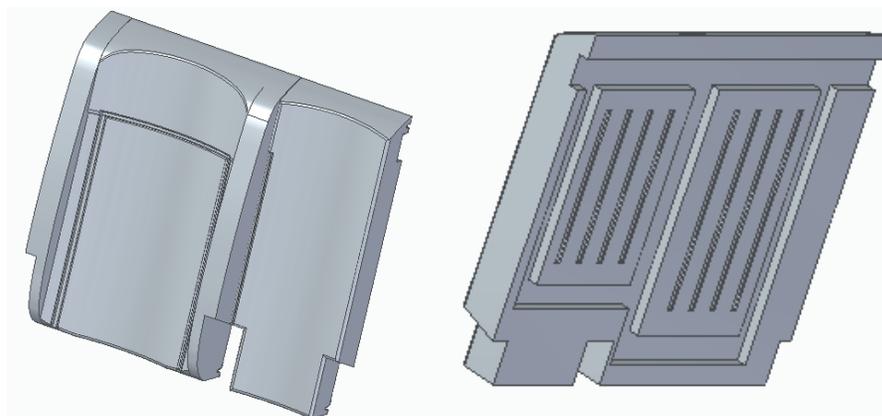


Imagen 13. Diseño geométrico inicial de las espumas del respaldo del 60% - Vistas isométricas frontal y posterior

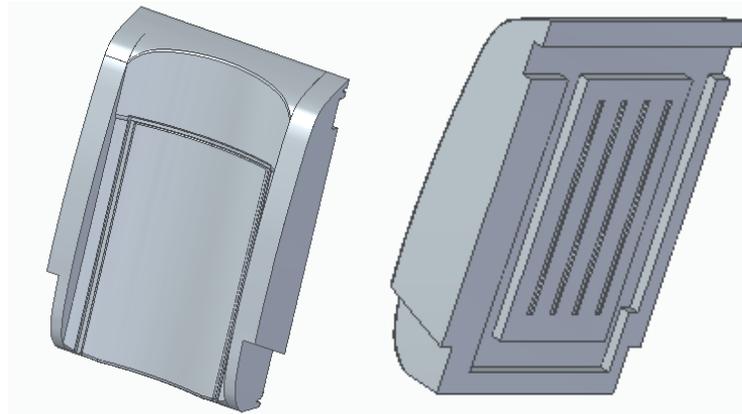


Imagen 14. Diseño geométrico inicial de las espumas del respaldo del 40% - Vistas isométricas frontal y posterior

En conclusión, el diseño geométrico resultante del ensamblaje de la estructura metálica (tubos, refuerzos y placas) y las espumas formando el conjunto del asiento, es el mostrado en la siguiente imagen:

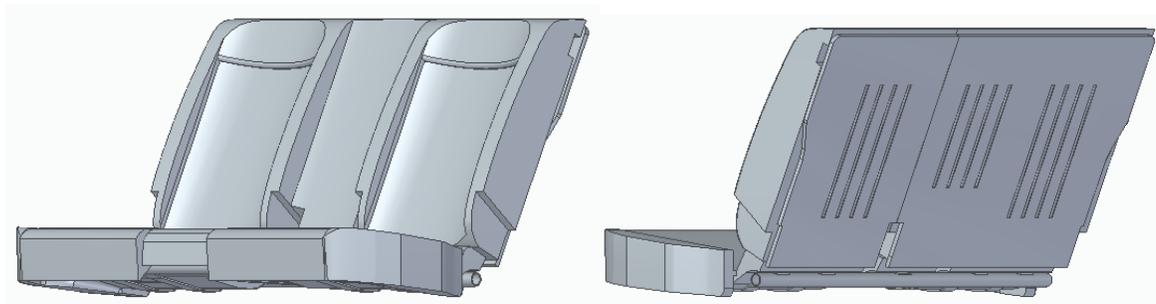


Imagen 15. Diseño geométrico inicial del asiento completo – Vistas (laterales) frontal y trasera

Las dimensiones generales del asiento son las siguientes:

Tabla 3. Dimensiones generales del diseño inicial del asiento

Dimensiones del asiento (mm)	
Ancho	1257
Largo	842
Alto	681

Tales dimensiones se han establecido respetando los requisitos de la carrocería del modelo en concreto y principalmente la *SAE J1100*. Esta práctica recomendada de SAE define un conjunto de medidas y procedimientos estándar para las dimensiones del vehículo. Las dimensiones están destinadas principalmente a medir la intención de diseño de un vehículo dentro de un entorno de diseño (es decir, CAD).

Cabe mencionar que el diseño inicial de CAD no cuenta con los diferentes elementos extras que van acoplados en el asiento, como los pedúnculos de los cinturones de seguridad, los SBR (*Seat Belt Reminder*), los Top Tether, los reposacabezas, etc., pero si se tienen en cuenta de forma analítica en el razonamiento del estudio. Los reposacabezas no se incluyen en la geometría inicial porque el estándar de la realización de la medición del punto-H establece que dicha medición se realiza sin los reposacabezas.

10.2. Definición de materiales

Los materiales elegidos para la estructura metálica y las espumas anteriormente mencionadas son los siguientes:

- *420 HSLA Steel*, para los perfiles tubulares.
- *ASTM A606 HSLA Steel*, para las placas del respaldo y las piezas de refuerzo.
- *PUR 50*, para las espumas.

La razón por la que se han elegido dichos materiales se debe a sus ventajas respecto a otros en sus propiedades físicas y mecánicas, coste y calidad. Se escogen con atención a las especificaciones del proyecto, es decir, estos materiales son los más adecuados para el asiento de este modelo en concreto y, más importante, los definidos en la fase inicial de designación de proveedores con piezas propias con materiales ya fijados.

A pesar de la confidencialidad el proyecto que limita el conocimiento de algunas de las propiedades de los materiales, se realiza una búsqueda intensiva de las características de los mismos para modelizar el asiento de la manera más exacta posible. Según lo señalado, se definen sus propiedades mecánicas:

10.2.1. Estructura metálica

Para la elección del material de la estructura metálica se ha buscado un material resistente, maleable, relativamente dúctil, reciclable y económico. Por ello, para el diseño de la estructura metálica del asiento trasero de este automóvil se eligen dos aceros de alta resistencia y baja aleación. Uno para los perfiles tubulares y otro para las placas del respaldo y los refuerzos, con el objetivo de encontrar un equilibrio que permita reducir el peso total del asiento sin perder las características de resistencia. A la vez que se consigue una reducción del peso total del vehículo.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), o aceros microaleados, están diseñados para proporcionar buenas propiedades mecánicas y una gran resistencia a la corrosión. Este material ofrece un gran desarrollo en el rendimiento de la seguridad de los pasajeros debido a la capacidad de absorción de energía de estas piezas de acero. También, permite la opción de conseguir altas series de producción con una relación prestaciones/precio suficientemente favorable.

- **Piezas de refuerzo y placas del respaldo**

El material, de las piezas de refuerzo y las placas del respaldo del asiento, es el acero *ASTM A606 HSLA Steel*, con las propiedades físicas y mecánicas de la siguiente tabla:

Tabla 4. Propiedades del material *ASTM A606 HSLA Steel* de placas y refuerzos

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7750	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Shear Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	2,048E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,28	
Bulk Modulus	1,5515E+11	Pa
Shear Modulus	80000	MPa
Tensile Yield Strength	345	MPa
Tensile Ultimate Strength	483	MPa

- **Perfiles tubulares**

El material de los perfiles tubulares del asiento es el acero *420 HSLA Steel*, con las propiedades físicas y mecánicas de la siguiente tabla:

Tabla 5. Propiedades del material *420 HSLA Steel* de los tubos

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7750	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Shear Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	2,048E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,28	
Bulk Modulus	1,5515E+11	Pa
Shear Modulus	80000	MPa
Tensile Yield Strength	420	MPa
Tensile Ultimate Strength	490	MPa

La elección de dos materiales distintos para los perfiles tubulares y las placas y refuerzos se debe a las diferentes funciones de cada una de estas piezas en el asiento. Es conveniente, por ejemplo, que los tubos sean capaces de soportar las cargas y deformaciones que sufren, provocadas por el contacto directo con los refuerzos que sujetan la espuma, pieza principal de sujeción del ocupante. Es por esto que el material de los perfiles tubulares ofrece mayor tensión de rotura y también, mayor elasticidad para absorber las cargas y consecuentes deformaciones. Así, se elige este material, con mejores propiedades mecánicas, para los perfiles tubulares.

10.2.2. Espumas

El diseño de las espumas de los asientos de automóviles está atrayendo una mayor atención de los fabricantes de vehículos. Reconocen que el diseño de los asientos, la comodidad y la seguridad contribuyen al atractivo inicial de un vehículo y a garantizar la satisfacción del cliente, mientras que la durabilidad de los asientos se puede reflejar en el valor residual del vehículo.

Para aumentar la velocidad de diseño y mejorar aún más la comodidad de las espumas, también hay técnicas de modelado informático que pueden simular la respuesta estática y dinámica del asiento. Esto ofrece ventajas significativas para los fabricantes de asientos, ya que pueden acelerar el desarrollo desde el diseño y pruebas de laboratorio de bajo costo hasta las pruebas completas en el automóvil.

Los avances realizados recientemente en la tecnología de Poliuretano (PUR) flexible, material de la espuma seleccionado, han llevado a la formulación de nuevos sistemas de PUR de alta y baja densidad para asientos de automóviles. Junto a estos programas de desarrollo, se ha ampliado la comprensión de cómo los componentes químicos clave, de los materiales base utilizados en la producción de espuma PUR, afectan al rendimiento final del asiento. Esto permite una predicción precisa del rendimiento de la espuma en el asiento, así como la obtención de comodidad y durabilidad a corto y largo plazo, a lo largo del tiempo y en un rango de condiciones climáticas, para todo tipo de asientos.

La función básica del asiento es aportar comodidad al pasajero tanto en condiciones estáticas como dinámicas. La sensación estática requiere una alta calidad con la suavidad de la superficie y una buena firmeza para los ocupantes. La habilidad de realizar todas las espumas

de PUR es una ventaja relevante, y por ello es una característica que también se tiene en cuenta a la hora de elegir este material para el diseño inicial.

Las propiedades de las espumas PUR de amortiguación también ayudan a reducir la fatiga y el estrés, a menudo asociada con la conducción. Su durabilidad y peso ligero, combinado con su fuerza tratan no sólo de evitar que el pasajero se hunda, sino de otorgar una mayor protección en caso de impacto y una estabilidad constante para la persona. Para lograr esta propiedad en los asientos de los vehículos, los fabricantes de espumas juegan con distintos componentes poliméricos. En función de si necesitan más o menos dureza, se añadirá un porcentaje distinto de carga, con el fin de mejorar también las propiedades mecánicas de las espumas.

Además, se está avanzando mucho en la reducción de peso de los cojines de este material. Las propiedades mejoradas de la espuma también permiten una reducción en el volumen del asiento, no perdiendo ninguna de las propiedades del material que exigen los fabricantes de coches.

Otro aspecto no menos importante que los anteriores es el hecho de que reducir el volumen de la espuma también contribuye a bajar los costes. Debido a que los poliuretanos son fuertes y ligeros, su uso implica que el peso total de los coches se reduzca, algo que ofrece una mayor eficiencia en el consumo de combustible y en el impacto medioambiental. Por lo que este material permite desarrollar un concepto de asiento con bajo volumen de espuma y bajo coste, pero con altos niveles de confort y durabilidad.

Con relación a las características físicas y mecánicas principales, del material PUR elegido para las espumas de este asiento, se detallan varios conceptos como la densidad, la dureza o la linealidad.

Primero, la densidad define la masa en un litro de espuma (kg/m^3) y describe el peso y no la dureza de la espuma. Cuando la densidad aumenta también lo hacen el peso, el coste y la calidad (confort, durabilidad, propiedades mecánicas) de la espuma. Pero la dureza puede aumentar o disminuir dependiendo de su formulación.

A la hora de medir la densidad de una espuma es importante saber que densidad se va a considerar: densidad del núcleo, densidad total o densidad líquida.

- Densidad del núcleo: es la densidad de las muestras cortadas del núcleo de la espuma. Realmente es una característica del material y está relacionada con la calidad de la espuma.

$$\text{Densidad del núcleo } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Peso de la muestra}}{\text{Volúmen de la muestra}} \quad (1)$$

- Densidad total: es la densidad del cojín/respaldo de la espuma.

$$\text{Densidad total } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Peso de la espuma}}{\text{Volúmen de la espuma}} \quad (2)$$

Como la espuma no tiene una densidad homogénea: la densidad total > densidad del núcleo.

- Densidad líquida: está relacionada con la cantidad de materiales brutos utilizados para moldear la espuma. Es únicamente útil en relación con el coste y la fabricación.

$$\text{Densidad líquida } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Peso de la materia bruta}}{\text{Volúmen de la espuma}} \quad (3)$$

Debido a pérdidas de gas y blurs: la *densidad líquida* > *densidad total*.

En resumen, para caracterizar el material y poderlo comparar con otros cojines/respaldos de espumas se utiliza la densidad del núcleo. Para comprobar el peso se usa la densidad total y para el coste la densidad líquida.

$$\text{Densidad líquida} > \text{Densidad total} > \text{Densidad del núcleo}$$

Por otro lado, es posible tener dos o incluso tres durezas diferentes en la misma espuma: una en la parte central para el confort, otra en los laterales para la sujeción, y otra para las fundas en alguna zona específica de la espuma. Esta característica se puede medir en una muestra o en una parte de la espuma completa. El test más común utilizado para medir esta propiedad, en la industria del automóvil, es el test de compresión.

En particular, la espuma elegida para los asientos de este vehículo es espuma inyectada de poliuretano, PUR, de curado en frío y alta densidad. Es una espuma plástica que apenas libera calor en la reacción. Los dos componentes principales (poliol e isocianato) se mezclan con agua, varios aditivos, materiales auxiliares y luego se someten a un proceso de formación de espuma a temperaturas relativamente bajas. La estructura cerrada resultante ofrece una

buena resistencia a la compresión. Cabe mencionar que normalmente son de mayor duración y mejor calidad que las espumas en caliente, aunque su coste sea mayor. Esta espuma también tiene dureza dual, siendo distinta en la parte central y en los laterales o lóbulos de cada asiento. De nuevo, con esta elección se consigue una rigidez y una reducción de peso ventajosa para el pasajero y el conjunto del automóvil.

En las espumas diferenciamos entre el cojín y el respaldo, y a su vez entre los módulos laterales y el central:

- **Espuma del cojín**

Tabla 6. Densidad y dureza de la espuma del cojín en el diseño inicial

LATERAL	Densidad [kg/m ³]	
		50,0 ± 2,5
	Resistencia a la compresión [kPa]	
	Centro	6,5 ± 0,5
	Lóbulos	10,0 ± 0,7
CENTRAL	Densidad [kg/m ³]	
		50,0 ± 2,5
	Resistencia a la compresión [kPa]	
		6,5 ± 0,5

- **Espumas del respaldo**

Tabla 7. Densidad y dureza de las espumas de respaldo en el diseño inicial

LATERAL	Densidad [kg/m ³]	
		50,0 ± 2,5
	Resistencia a la compresión [kPa]	
	Frontal	4,0 ± 0,5
	Lateral	9,0 ± 0,6
CENTRAL	Densidad [kg/m ³]	
		50,0 ± 2,5
	Resistencia a la compresión [kPa]	
		10,0 ± 0,5

Una vez definidas la densidad y dureza de las espumas se explica el comportamiento no lineal del poliuretano. El modelo de material hiperelástico en *ANSYS Workbench* elegido para este sólido es el *Neo-Hookeano* (Anexo 3), similar a la ley de Hooke, que se puede usar para

predecir el comportamiento no lineal de tensión-deformación de este tipo de material. A diferencia de los materiales elásticos lineales, la curva de tensión-deformación de un material Neo-Hookeano no es lineal. En cambio, la relación entre la tensión aplicada y la deformación es inicialmente lineal, pero en un cierto punto la curva de tensión-deformación se estabilizará. El modelo de Neo-Hookean no tiene en cuenta la liberación disipativa de energía en forma de calor, mientras que la deformación del material y la elasticidad perfecta se asume en todas las etapas de la deformación, ya que ésta no es permanente. Los ensayos generales examinados en una muestra del material PUR, con las mismas propiedades que el utilizado para el asiento, definen el modelo de Neo-Hookean. Para ilustrar este comportamiento se ensayan varias pruebas en una muestra del material, definiendo así su comportamiento no lineal.

Tabla 8. Propiedades del material PUR 50 necesarias para definir el modelo Neo-Hookeano (no lineal)

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	50	kg m ⁻³
Uniaxial Test Data	Tabular	
Biaxial Test Data	Tabular	
Shear Test Data	Tabular	
Neo-Hookean		
Initial Shear Modulus Mu	1,4761	MPa
Incompressibility Parameter D1	0	Pa ⁻¹

El modelo Neo-Hookean de este material detalla la siguiente gráfica Tensión-Deformación:

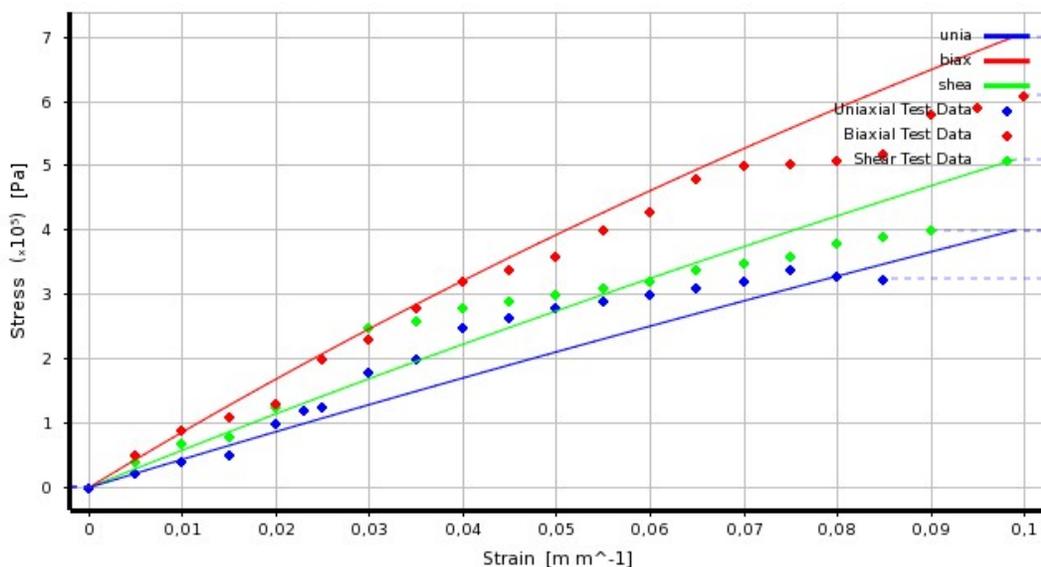


Imagen 16. Modelo Neo-Hookean del material PUR 50

De igual manera, se muestran los datos experimentales de dichos ensayos en las tablas y se visualizan en las gráficas siguientes:

- Ensayo 1: *Uniaxial Test Data*

Strain (m m ⁻¹)	Stress (MPa)
0	0
0,005	0,023
0,01	0,04
0,015	0,05
0,02	0,1
0,023	0,12
0,025	0,125
0,03	0,18
0,035	0,2
0,04	0,25
0,045	0,265
0,05	0,28
0,055	0,29
0,06	0,3
0,065	0,31
0,07	0,32
0,075	0,34
0,08	0,33
0,085	0,325

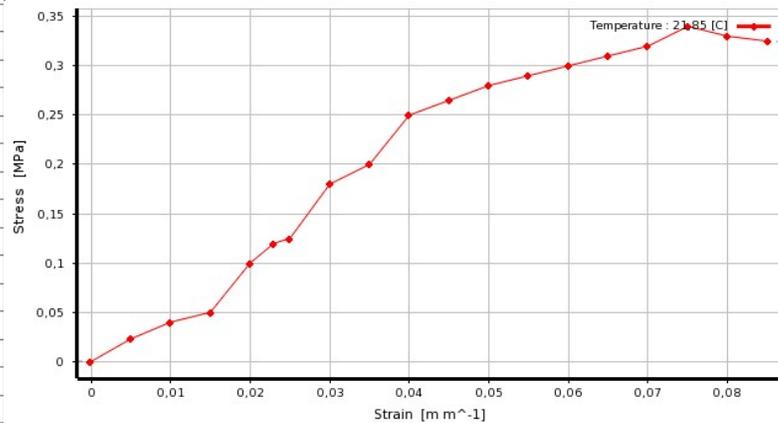


Imagen 17. Tabla de valores y gráfica del ensayo 1: *Uniaxial Test Data* del material PUR 50 no lineal

- Ensayo 2: *Biaxial Test Data*

Strain (m m ⁻¹)	Stress (MPa)
0	0
0,005	0,05
0,01	0,09
0,015	0,11
0,02	0,13
0,025	0,2
0,03	0,23
0,035	0,28
0,04	0,32
0,045	0,34
0,05	0,36
0,055	0,4
0,06	0,43
0,065	0,48
0,07	0,5
0,075	0,505
0,08	0,51
0,085	0,52
0,09	0,58
0,095	0,59
0,1	0,61

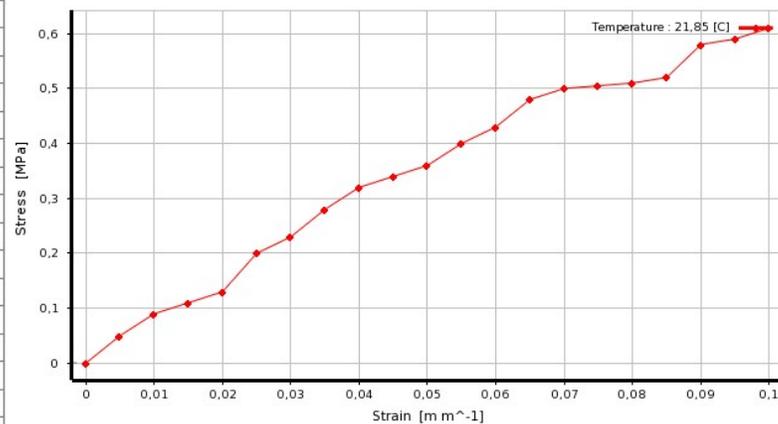


Imagen 18. Tabla de valores y gráfica del ensayo 2: *Biaxial Test Data* del material PUR 50 no lineal

- Ensayo 3: *Shear Test Data*

Strain (m m ⁻¹)	Stress (MPa)
0	0
0,005	0,04
0,01	0,07
0,015	0,08
0,02	0,125
0,025	0,2
0,03	0,25
0,035	0,26
0,04	0,28
0,045	0,29
0,05	0,3
0,055	0,31
0,06	0,32
0,065	0,34
0,07	0,35
0,075	0,36
0,08	0,38
0,085	0,39
0,09	0,4

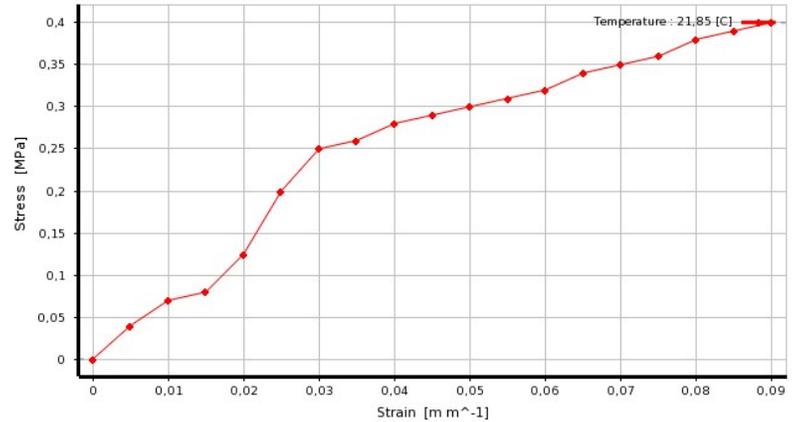


Imagen 19. Tabla de valores y gráfica del ensayo 3: *Shear Test Data* del material PUR 50 no lineal

Como posibilidad de una simplificación en el comportamiento del material, se citan las propiedades de éste considerándolo lineal. Se tiene en cuenta para la comparación de los resultados numéricos definiendo el material de una forma u otra y si así se eligiera, para beneficio del coste computacional de la simulación. Así, las propiedades físicas y mecánicas del PUR como material lineal son las expuestas en la siguiente tabla.

Tabla 9. Propiedades del material PUR 50 lineal

Property	Value	Unit
<input checked="" type="checkbox"/> Material Field Variables	Table	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	50	kg m ⁻³
<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	15	MPa
Poisson's Ratio	0,03	
Bulk Modulus	5,3191E+06	Pa
Shear Modulus	7,2816E+06	Pa

10.2. Definición de cargas

La medición del punto-H se realiza colocando el HPM sobre el asiento, este proceso se hace una vez para cada posición del pasajero en el asiento. Al tratarse de un asiento trasero, con tres módulos (derecho, central e izquierdo), se realizan tres mediciones, una para cada posición del ocupante. Es decir, la única carga que toma partida en la prueba, es el propio peso del HPM específico utilizado en el ensayo. Significa entonces que, la carga sobre el asiento es la de un pasajero de percentil 95, ya que es la principal muestra de población para la que se diseña este vehículo. Según se ha citado, el HPM está regulado por la *SAE J826*, por lo que su peso también viene establecido, siendo este de 74,7kg (con una tolerancia de $\pm 0,3$ kg).

Como resultado, la fuerza que ejerce el HPM sobre el asiento se calcula con un peso de 75kg y una gravedad de 10m/s^2 . Por lo que la fuerza teórica ejercida por el ocupante sobre el asiento y la utilizada para la simulación del punto-H es de -750N en la dirección del eje OZ.

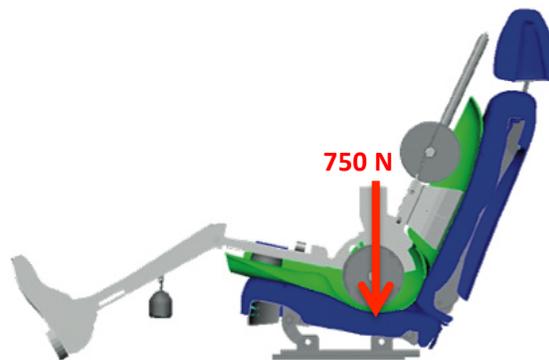


Imagen 20. Dirección y magnitud de la fuerza que el HPM ejerce en el asiento

En consecuencia, se estudia el mapa de presiones entre el cojín de un asiento y un ocupante de percentil 95. El contacto entre los dos se limita a una zona específica en el asiento, de tal manera que se afina la superficie teórica de contacto entre el HPM y el cojín. Para ello, se proyecta el área de contacto en el cojín, ajustando la posición del HPM en el asiento, obteniendo así resultados más exactos. En la siguiente imagen se puede observar el mapa de presiones sobre un asiento general, que sirve como guía para esbozar el área de contacto mencionado. En color rojo se define el área de contacto que sufre la mayor deformación, seguido del área de color verde. El color amarillo indica una deformación leve y el azul es igual a una deformación nula.

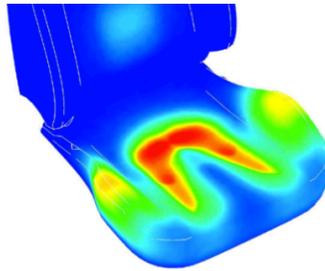


Imagen 21. Mapa de presiones de un pasajero de percentil 95 en un asiento general

Una vez definidos los contactos del HPM con cada módulo del asiento, se obtiene el siguiente resultado mostrado en el cojín. El área de contacto en el módulo central es distinto al establecido en los módulos laterales debido a la geometría específica de dicho módulo.



Imagen 22. Contacto del HPM con el cojín del asiento inicial en los tres módulos del mismo

11. Modelo numérico para el estudio del punto-H

La comprobación del punto-H se realiza sobre el modelo del diseño inicial. Para éste, como se ha mencionado antes, se ha elegido una estructura metálica compuesta por dos perfiles tubulares, cinco piezas de refuerzo y dos placas de respaldo. Los tubos son del material *420 HSLA Steel* y los refuerzos y placas del material *ASTM A606 HSLA Steel*. Para las espumas se ha elegido un cojín completo y dos respaldos, uno del 40 por ciento y otro del 60 por ciento. El material elegido para todas ellas es el poliuretano de densidad 50 kg/m^3 .

Formada la observación anterior, a partir de ahora se describe al asiento en tres partes:

- 40%, compuesta por la placa y la espuma del 40% del respaldo.
- 60%, compuesta por la placa y la espuma del 60% del respaldo.
- 100%, compuesta por los tubos, refuerzos y espuma del cojín.

Como ya se ha explicado, el asiento trasero tiene tres módulos para un total de tres ocupantes. Sin embargo, la medición del punto-H se ensaya para un único pasajero en cada posición, como obliga la normativa. Así, se realizan tres simulaciones: con el ocupante situado en el módulo 1 (lateral derecho), después en el módulo 2 (centro) y por último en el módulo 3 (lateral izquierdo). La única diferencia en cada simulación es la colocación de la carga, teniendo que ser coincidente con la posición del HPM y el módulo correspondiente en cada medida específica.

Geometry

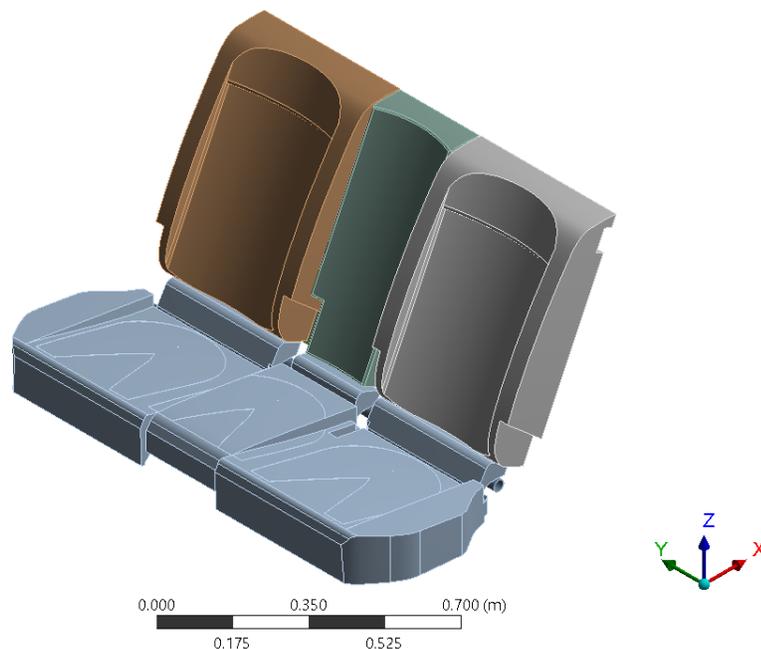


Imagen 23. Modelo inicial del asiento completo a simular

11.1. Análisis de elementos finitos

El análisis de elementos finitos (FEA) es un método numérico para resolver problemas de ingeniería y física matemática. Es útil para problemas con geometrías complicadas, cargas y propiedades de materiales donde no se pueden obtener soluciones analíticas.

El método se basa en dividir las piezas del conjunto geométrico, en una serie de cuerpos minúsculos denominados elementos finitos. Dentro de cada elemento se distinguen una serie

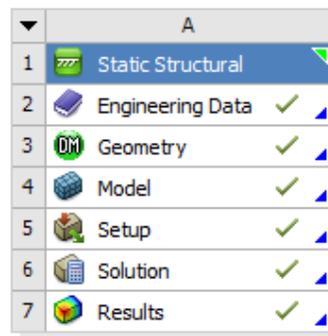
de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se denomina malla.

Los cálculos necesarios se realizan sobre una malla creada a partir del dominio, con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una variable determinada y los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas, las deformaciones y tensiones, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos.

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular, las tareas necesarias para realizar un cálculo utilizando un programa de elementos finitos se dividen en: pre-proceso, cálculo y post-proceso. La primera fase, el pre-proceso, es donde se especifica la geometría, materiales, contactos, mallado, fijaciones y cargas. La segunda y tercera fase, cálculo y post-proceso, son automáticas, es decir, el programa realiza todos los cálculos y después muestra los resultados a interpretar por la persona responsable de la simulación. Significa entonces que, en este apartado, se centra la atención en el desarrollo de la etapa del pre-proceso, para después valorar los resultados obtenidos a través del cálculo y post-proceso del programa.

El programa elegido para realizar el estudio de elementos finitos es *ANSYS Workbench*. Para explicar de manera ordenada los pasos del pre-proceso se siguen las pautas establecidas por dicho programa en su mismo orden. Antes de empezar, se elige un sistema de análisis de estática estructural (*Static structural*) con el siguiente menú:



Asiento completo DISEÑO INICIAL

Imagen 24. Pasos del sistema de análisis "Static structural" de ANSYS Workbench

El *Static structural* es un análisis estructural estático que determina los desplazamientos, tensiones, deformaciones y fuerzas en estructuras o componentes causados por cargas que no inducen inercia significativa y efectos de amortiguación. Se suponen condiciones de carga y respuesta constantes; es decir, se supone que las cargas y la respuesta de la estructura varían lentamente con respecto al tiempo. Los tipos de carga que se pueden aplicar en un análisis estático incluyen:

- Fuerzas y presiones aplicadas externamente.
- Fuerzas inerciales en estado estacionario.
- Desplazamientos impuestos.
- Temperaturas (por deformación térmica).

Añadir, que un análisis de este tipo puede ser lineal o no lineal. Se permiten todos los tipos de no linealidades: grandes deformaciones, plasticidad, rigidez por tensión, elementos de contacto, hiperelasticidad, etc.

Dicho esto, se explica la etapa de pre-proceso. Primero, se define el material en la pestaña de *Engineering Data*. En este caso, hay que definir cuatro materiales:

- *420 HSLA Steel*, para los perfiles tubulares.
- *ASTM A606 HSLA Steel*, para las placas del respaldo y las piezas de refuerzo.
- *PUR 50* lineal, para las espumas.
- *PUR 50* no lineal, para las espumas.

En cuanto a las espumas, se define el material *PUR 50* de dos maneras. Una, considerando el comportamiento no lineal del hiperelástico, y otra, como una posible

simplificación del modelo, considerando el material lineal, que se explicará posteriormente.

Una vez definidos correctamente los materiales anteriores, se importa la geometría del modelo del diseño inicial en la pestaña de *Geometry*. Después, en el *DesignModeler*, se comprueba que el programa distinga cada pieza del asiento como un único sólido, teniendo así, en este caso concreto, doce cuerpos sólidos (dos placas, tres espumas, dos tubos y cinco refuerzos). Además, se comprueba que el sistema de referencia coincida con el establecido por el fabricante, para que las mediciones obtenidas de la simulación sean válidas. Ya que una disconformidad entre ambos sistemas de referencia repercutiría en la validez del resultado.

Seguidamente, se especifica el material de cada cuerpo sólido en el *Mechanical*, dentro de la pestaña de *Model*. Una vez hecho esto, se definen los contactos entre los diferentes elementos del asiento. Es esencial diferenciar el contacto entre dos cuerpos rígido-rígido, flexible-flexible o un contacto rígido-flexible. De la misma manera, es importante que el cuerpo que esté fijo o sea de un material más rígido se defina como el “*Target*” y que el otro se defina como “*Contact*”. Dadas las condiciones que anteceden, se determinan los siguientes contactos en el asiento:

- Contacto placa de refuerzo-espuma del 40%
- Contacto placa de refuerzo-espuma del 60%
- Contacto espuma 40%-espuma 60%
- Contacto espuma respaldo-espuma cojín
- Contacto espuma cojín-refuerzos
- Contacto refuerzos-tubos

Para continuar, se define la malla. Como consecuencia de que los componentes del asiento tengan diferentes geometrías, materiales y funciones, se utilizan diferentes tipos de mallado según sea conveniente para cada pieza particular del conjunto. Es lógico pensar que la zona donde la malla debe estar más refinada, es allá donde se necesite obtener una mayor exactitud en los resultados. Es decir, cuando la simulación se produzca sobre el asiento lateral en el módulo 1, el mallado de la superficie de contacto entre el HPM y el cojín será lo más refinado posible, dejando el resto de cuerpos accesorios con una malla con menor grado de refinado, sin desatender la calidad total del mallado del conjunto.

Existen varios tipos de mallado, por ello, se elige el método de *Sweep* (barrer) para los

cuerpos que lo permiten. Si se reconoce que la topología de un cuerpo es *Sweepable* (capacidad de ser barrida), el cuerpo se puede combinar de manera muy eficiente con elementos hexaédricos y de cuña usando esta técnica. El número de nodos y elementos para un cuerpo barrido suele ser mucho más pequeño que los que se combinan con el generador de malla libre. Además, el tiempo para crear estos elementos es mucho menor, consumiendo así menos coste computacional. *ANSYS Workbench* verifica automáticamente si el cuerpo cumple con los requisitos topológicos para el barrido. Luego elige dos caras que están topológicamente en los lados opuestos del cuerpo. Estas caras se denominan caras de origen y destino. El propio programa combina la cara de origen con elementos cuadriláteros y triangulares y luego copia esa malla en la cara de destino. Después, genera elementos hexaédricos o de cuña que conectan las dos caras y siguen la topología exterior del cuerpo.

Para el resto de cuerpos se utiliza el generador de malla *Body sizing*. Este método de mallado puede considerarse de cómo uno de malla libre, ya que permite al usuario modificar varias de sus propiedades de manera que la malla definida se ajuste lo mayor posible a lo deseado por el simulador.

Por último, como se ha mencionado antes, se refina la cara de contacto entre el HPM y el cojín, según donde se produzca la medición (en uno de los dos laterales o en el centro). Para ello se utiliza el método de *Face sizing*. Con esto se consigue una mayor precisión en los resultados de la zona de mayor interés para la simulación designada.

Una vez determinada la malla de cada uno de los componentes del asiento, se comprueba que su definición sea correcta. Dentro del análisis de la calidad de la malla existen diferentes formas de valorarla, se elige la medición de la calidad de la malla por *Skewness* (asimetría), por razones que se explican más adelante en el apartado de resultados numéricos. La asimetría es una de las principales medidas de calidad para una malla ya que determina como de cerca del ideal (es decir, equilátero) está una cara o una célula. De acuerdo con la definición de asimetría, un valor de 0 indica una celda equilátera (mejor) y un valor de 1 indica una celda completamente degenerada (la peor). Las células degeneradas se caracterizan por nodos que son casi coplanarias. Las caras y las células muy sesgadas son inaceptables porque las ecuaciones que se resuelven suponen que las células son relativamente equiláteras.

Dos métodos utilizados para medir la asimetría son:

- Basado en el volumen equilátero (se aplica solo a los triángulos y tetraedros).
- Basado en la desviación de un ángulo equilátero normalizado. Este método se aplica a todas las formas de celdas y caras, por ejemplo, pirámides y prismas.

En conclusión, se evalúa la malla según su valor de *Skewness* detallado en la siguiente imagen.

Tabla 10. Valores y calidad del parámetro *Skewness*

Valor de <i>Skewness</i>	Calidad de malla
1	Degenerada (muy mala)
0,9 – < 1	Mala
0,75 – 0,9	Pobre
0,5 – 0,75	Justa
0,25 – 0,5	Buena
> 0 – 0,25	Excelente
0	Equilátera (perfecta)

De la tabla anterior se determina que un valor aceptable para continuar con la simulación sería un valor incluido en el intervalo entre 0,5 y 0, buscando así, como mínimo, un resultado de calidad de malla calificado como “bueno”.

El siguiente paso es definir los soportes que fijan el asiento en su posición de estudio. En este caso en concreto se puede diferenciar entre dos tipos de soportes: *Fixed support* (soporte fijo) y *Frictionless support* (soporte sin fricción).

- *Fixed support*: el soporte fijo proporciona soporte en la dirección normal y tangencial, de manera que el cuerpo no puede moverse o girar o deformarse en ninguna de las direcciones.
- *Frictionless support*: El soporte sin fricción proporciona soporte en dirección normal a la cara o el borde seleccionado. El cuerpo no puede moverse o girar o deformarse en dirección normal. Pero libre para moverse o rotar o rotar en dirección tangencial.

Para concluir, se definen las cargas. Como se ha mencionado anteriormente, la única carga aplicable en este ensayo es la de un HPM de percentil 95, que resulta en una fuerza en la dirección OZ de -750N. Simplemente, se define semejante fuerza en cada posición del HPM en los módulos del asiento, en cada uno de los tres ensayos (posición izquierda, central y derecha).

Definido así, de forma general, el pre-proceso de un estudio estructural estático, se procede a las especificaciones y simplificaciones propias del asiento trasero sometido a este estudio. Para ello, se definen dichas particularidades en el mismo orden recientemente mencionado, pero en el siguiente apartado.

11.2. Resultados numéricos

Una vez elegido el método de análisis estructural estático (*Static structural*), se importa la geometría del diseño inicial. Como el asiento cuenta con formas, redondeos, y cavidades con geometrías difíciles, todo esto exige un coste computacional muy alto a la hora de crear la malla y más tarde para resolver la medición. La versión académica del programa de elementos finitos dispuesta no permite realizar la simulación debido a un exceso en el número de elementos del conjunto. Por esta razón se simplifican las piezas que forman el asiento. Se han realizado varios diseños simplificados con geometrías más sencillas, perfiles definidos de forma más rectilínea y reduciendo los redondeos. Todo esto sin perder ninguna relación de conjunto. Dicho esto, el modelo de diseño inicial simplificado, y utilizado para la simulación de la medición numérica del punto-H, es el mismo que el definido en el diseño geométrico con pequeñas modificaciones en las placas de respaldo, en la parte trasera de las espumas del respaldo y en la parte posterior de la espuma del cojín mostradas en las siguientes imágenes. Los tubos y refuerzos se mantienen con la geometría inicial sin simplificaciones.

Geometry

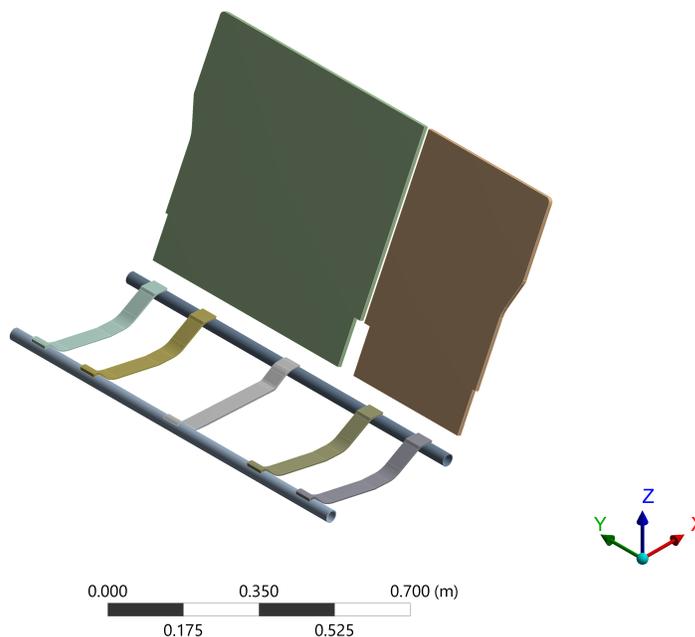


Imagen 25. Estructura metálica del diseño inicial simplificado – Vista isométrica

Geometry

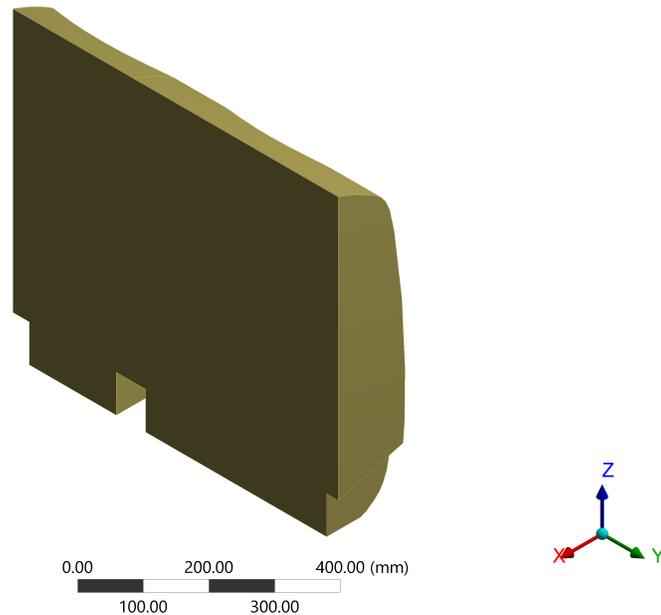


Imagen 26. Espumas de respaldo del diseño inicial simplificado – Vista isométrica

Geometry

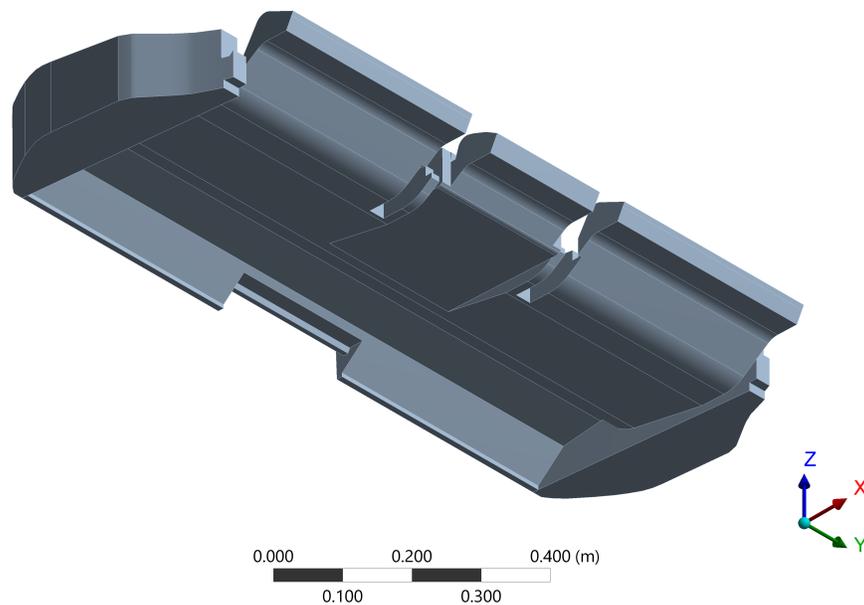


Imagen 27. Espuma del cojín del diseño inicial simplificado – Vista isométrica

Después, se definen los materiales siguiendo las pautas mencionadas anteriormente. Como se ha mencionado antes, el material *PUR 50* de las espumas, se especifica de dos maneras, como material lineal y como no lineal. Antes de seguir con el siguiente paso en la

etapa del pre-proceso, se hace una prueba con cada tipo de material para elegir como definir el material de forma real y correcta. Se comprueba que los resultados obtenidos de dos simulaciones, cada una de ellas con un material de espuma distinto (lineal y no lineal) se diferencian de tal manera que se descarta la potencial simplificación del material a uno de propiedades lineales. Esto se debe a que los resultados de la simulación lineal no son tan exactos como los de la simulación no lineal.

- Simulación con el material *PUR 50 lineal*, con un hundimiento de 0,17mm.

A: Asiento completo DISEÑO INICIAL

Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Custom
Max: -0.17803
Min: -0.17803

-0.17803
-0.17803

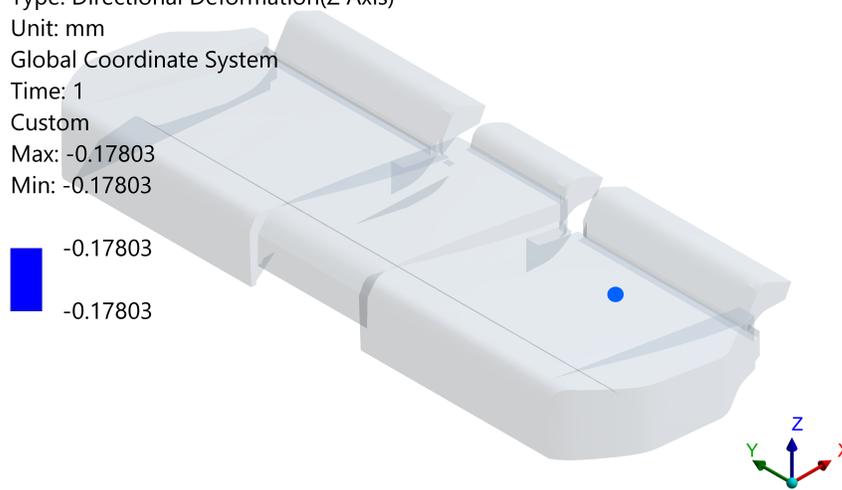


Imagen 28. Simulación con el material *PUR 50 lineal* en el punto-H del módulo 1

- Simulación con el material *PUR 50 no lineal*, con un hundimiento de 0,35mm.

B: Asiento completo DISEÑO INICIAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 40%

Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Custom
Max: -0.35334
Min: -0.35334

-0.35334
-0.35334

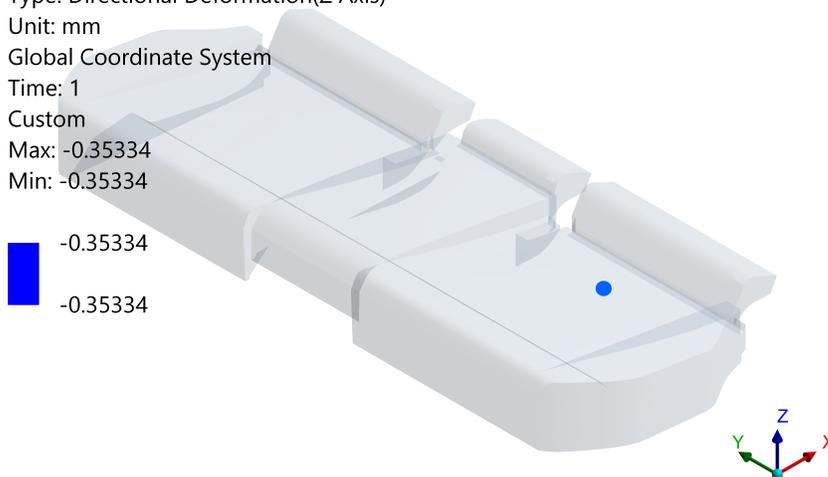


Imagen 29. Simulación con el material *PUR 50 no lineal* en el punto-H del módulo 1

La diferencia entre ambas simulaciones no es grande si se atiende solo a los valores de las deformaciones, pero teniendo en cuenta que la deformación es tan pequeña en los dos casos, una variación mínima en los valores tiene un gran efecto en el resultado real y correcto que se busca. Además, es importante recordar que se trata de un elemento hiperelástico y anisotrópico, por lo que, simplificarlo a un material elástico y lineal perdería sus propiedades específicas. Aunque el coste computacional sea menor y la malla permita un mayor refinado en todo el asiento, el resultado sigue siendo de menor calidad. De nuevo, se descarta el material *PUR 50 lineal*, y se utiliza exclusivamente el *PUR 50 no lineal* para todas las espumas.

A modo de resumen, se ajustan modelos del material basados en las necesidades de la simulación, las capacidades del software del elemento que se está utilizando y el comportamiento del material.

El siguiente paso, establecer los contactos. Se listan de nuevo los contactos necesarios y se añade una muestra visual de cada uno de ellos para mayor claridad.

- Contacto: espuma 40% - placa de refuerzo 40%

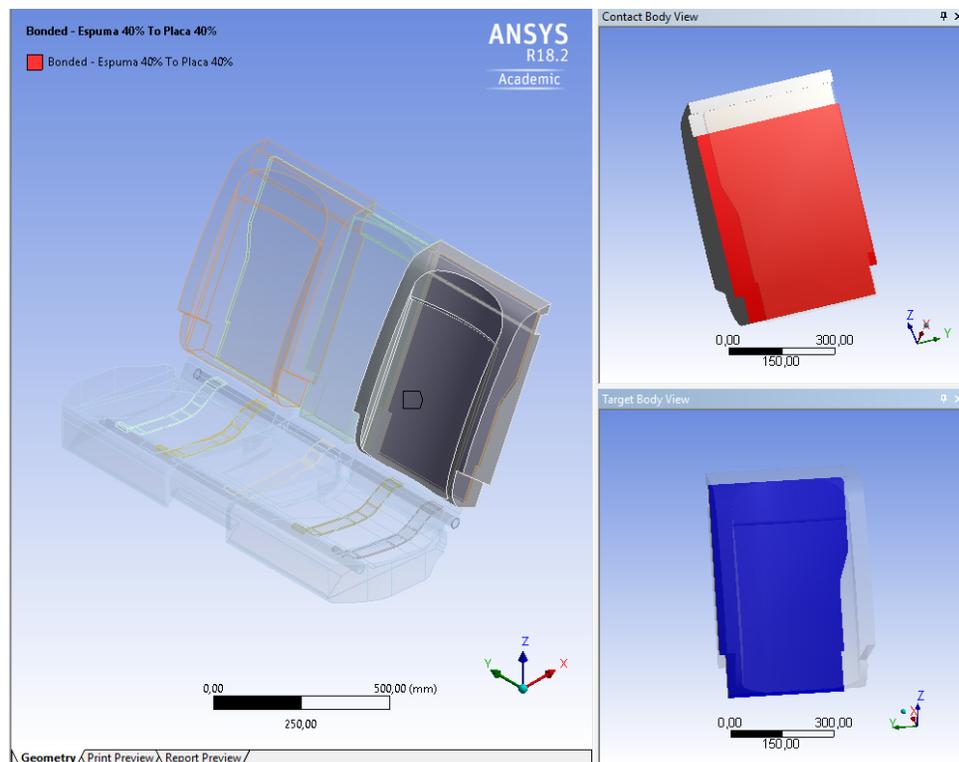


Imagen 30. Contacto espuma 40% - placa de refuerzo 40%

- Contacto: espuma 60% - placa de refuerzo 60%

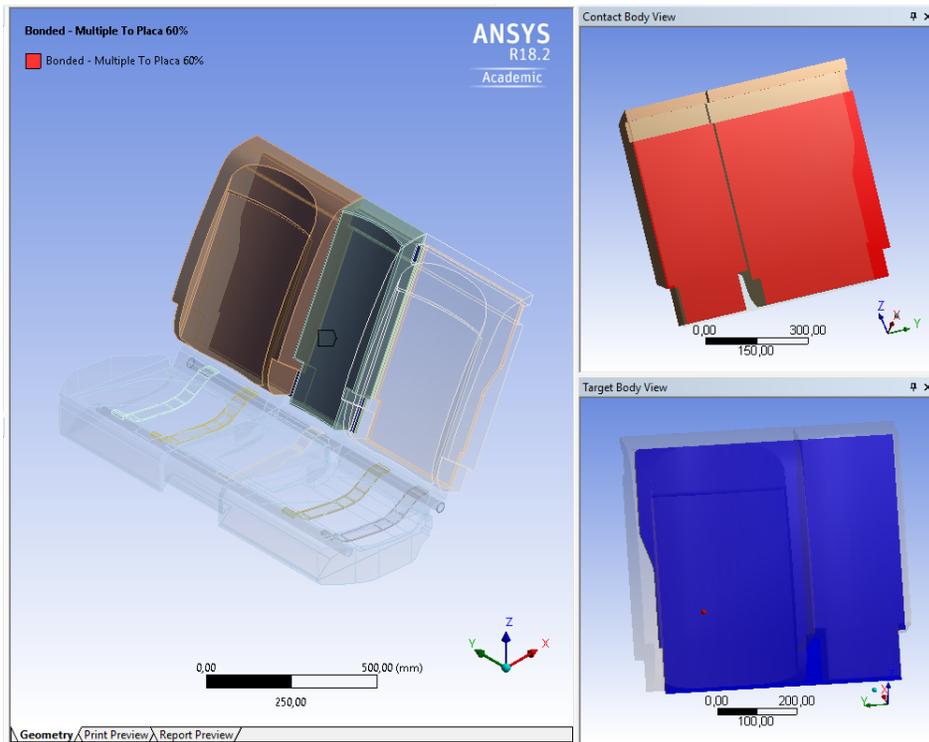


Imagen 31. Contacto espuma 60% - placa de refuerzo 60%

- Contacto espuma 40%-espuma 60%

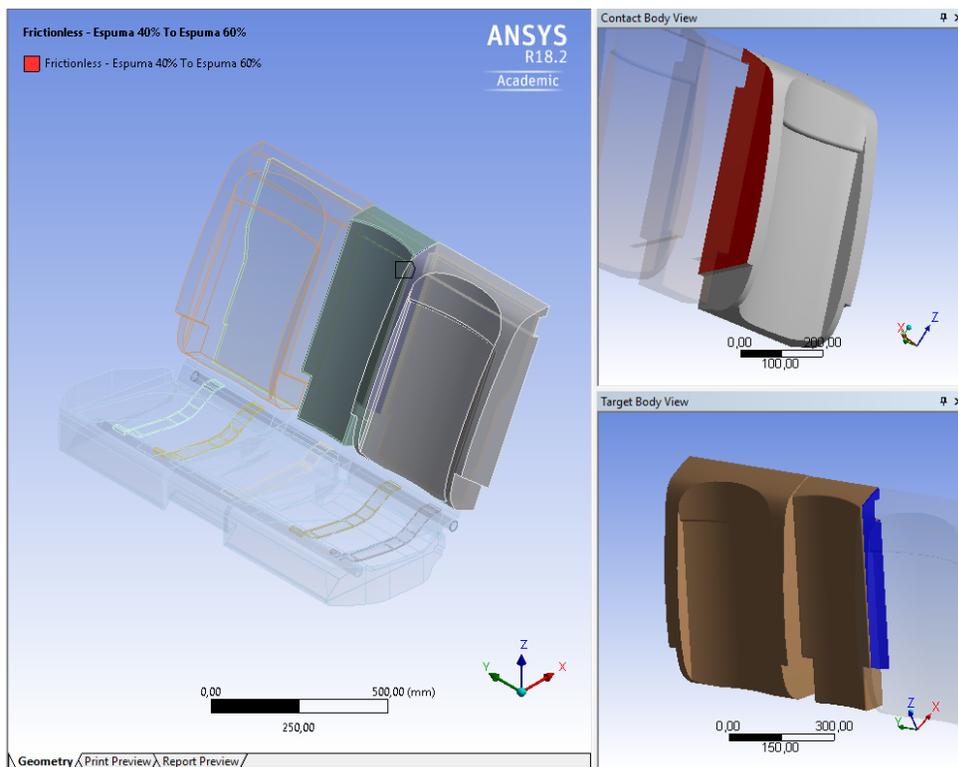


Imagen 32. Contacto espuma 40% - espuma 60%

- Contacto espumas respaldo-espuma cojín

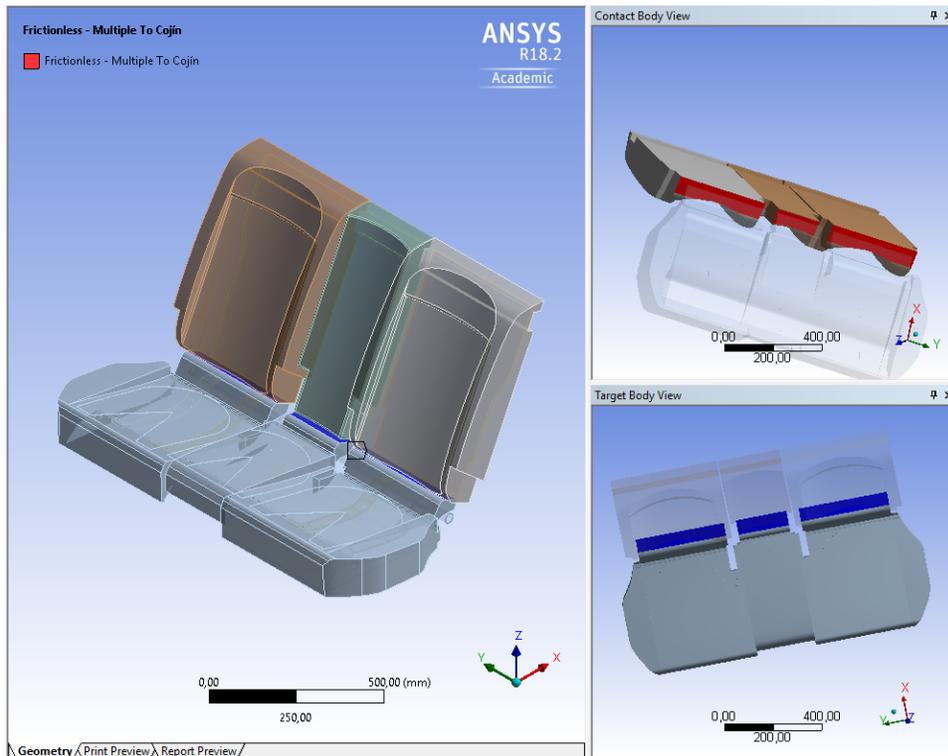


Imagen 33. Contacto espumas respaldo – espuma cojín

- Contacto espuma cojín-refuerzos

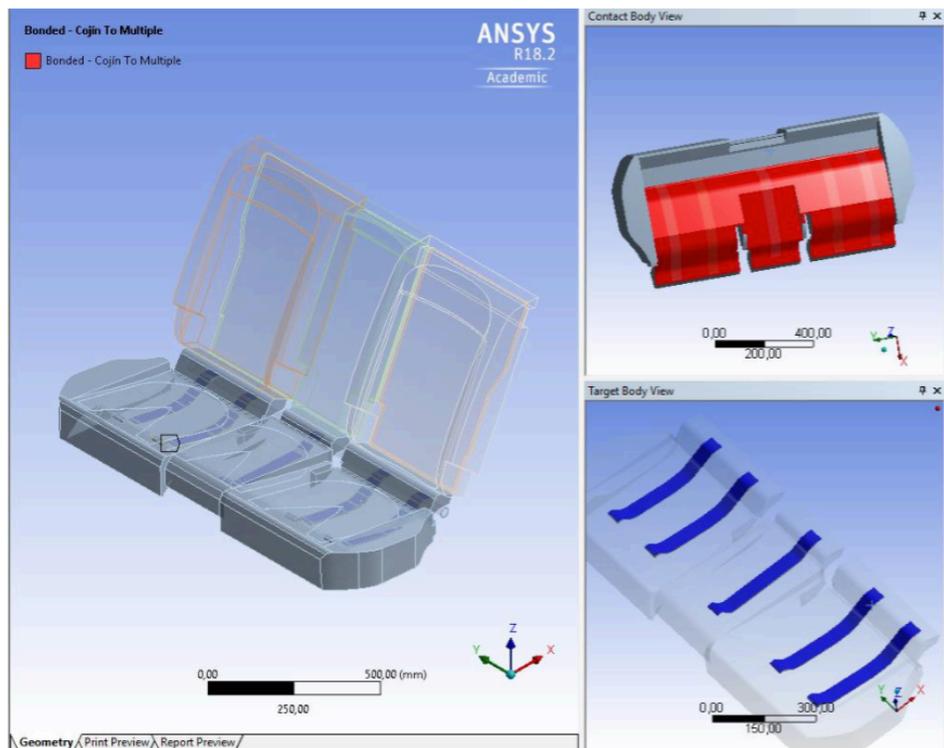


Imagen 34. Contacto espuma cojín – refuerzos

- Contacto refuerzos-tubos

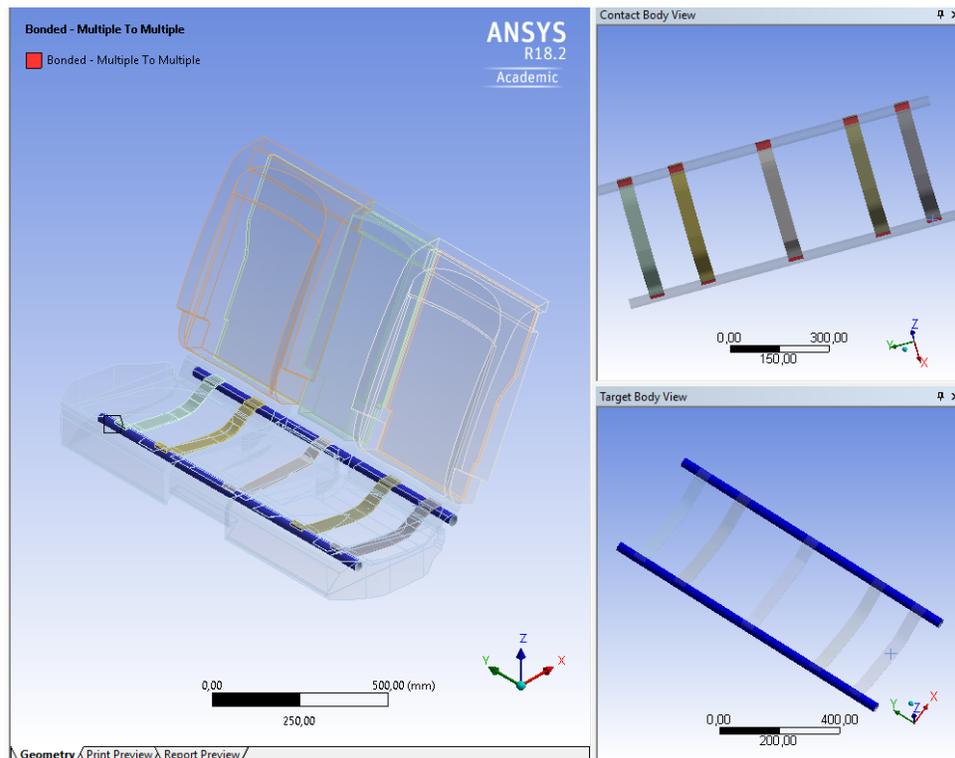


Imagen 35. Contacto refuerzos – tubos

Con respecto al mallado, como se ha mencionado antes, el material de las espumas no lineales dificulta el refinado de la malla. Cuanto mayor es éste, mayor coste computacional se necesita para realizar la simulación, y el programa tiene sus límites. Por ello, se priorizan los cuerpos con mayor importancia en el estudio, refinando las mallas de las espumas y en concreto la cara del módulo en contacto con el HPM. Asimismo, se utiliza el mallado automático para cuerpos *Sweepable* en placas, refuerzos y tubos. Por otro lado, se modifica el refinado del mallado de las espumas de respaldo, ya que necesitan un refinado menor que la espuma del propio cojín. Por último, en la cara de contacto mencionada previamente, se refina su mallado lo máximo permitido para que la simulación pueda realizarse, es decir, que no exceda el límite de nodos y elementos admitidos por el software de simulación y que tenga un coste computacional aceptable. Una vez más, teniendo que cambiar esta zona de refinado dependiendo del módulo del asiento que se vaya a simular.

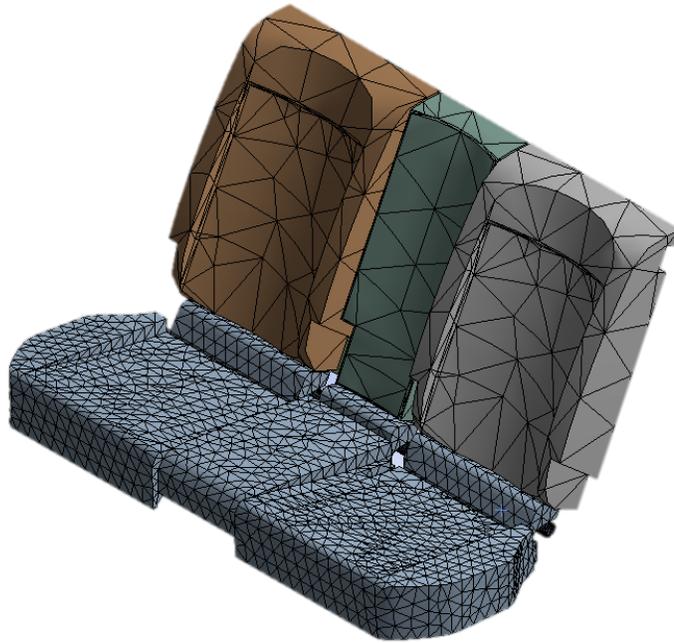


Imagen 36. Mallado del modelo de asiento inicial

Para comprobar que el mallado es correcto, es decir, que los cuerpos del conjunto estén suficientemente simplificados a elementos y nodos que permitan un resultado coherente y válido, se realiza un análisis de sensibilidad de la malla (Anexo 4). Se realizan simulaciones con distintos tamaños de malla en los diferentes cuerpos del asiento y se observa qué influencia tienen en los resultados. Paralelamente, para evaluar la calidad de la malla se distinguen distintos métodos en el software, eligiendo la que se ha considerado más visual y sencilla para su entendimiento. En este caso se evalúa la calidad de la malla por *Skewness* (termino definido en el apartado anterior).

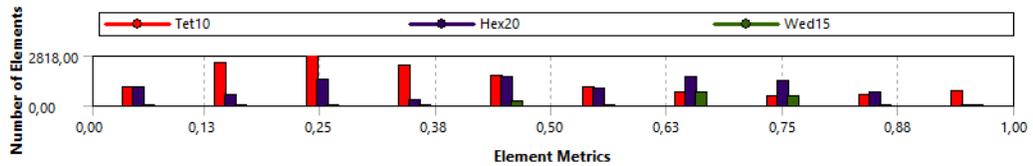


Imagen 37. Gráfica del valor de *Skewness* de medida de calidad del mallado en el modelo inicial

En la gráfica anterior, se relaciona el número y tipo de elementos de la malla con la calidad de dichos elementos, calificada del 0 al 1, siendo el 0 lo mejor. Se distinguen principalmente los elementos formados por tetraedros (en rojo) de los formados por hexaedros (en morado), y también se muestran los elementos cuña o piramidales (en verde) que son minoritarios. La mitad izquierda de la gráfica indica que hay un número mayor de elementos

mallados con formas tetraédricas que hexaédricas, y aunque los elementos formados por tetraedros son menos eficientes que los formados por hexaedros, esta depende de cómo de equiláteros sean los tetraedros. Ésta resulta en una calidad de malla buena con un valor medio de *Skewness* igual a 0,44. De la *Tabla 10* el valor queda en el rango determinado como buen resultado. Repitiendo lo anterior, no se persigue obtener un valor de calidad de malla mejor, ya que, si se refina todavía más la malla, se ve claro, que el valor de *Skewness* será menor, pero el coste computacional será excesivo para el valor del resultado obtenido. Es decir, el aumento del valor medio de *Skewness* no es tanto para el aumento de número de elementos que disparan el coste computacional de la simulación.

El siguiente paso es más sencillo, ahora se definen los soportes del asiento. A modo de recordatorio, el asiento va fijado sobre dos carriles que encarrilan con la carrocería del coche. Estos carriles van unidos a los perfiles tubulares descritos en la geometría del asiento, por esta razón, los tubos son los soportes fijos del asiento. Así, se restringen los posibles desplazamientos y giros de ambos cuerpos (los dos tubos).

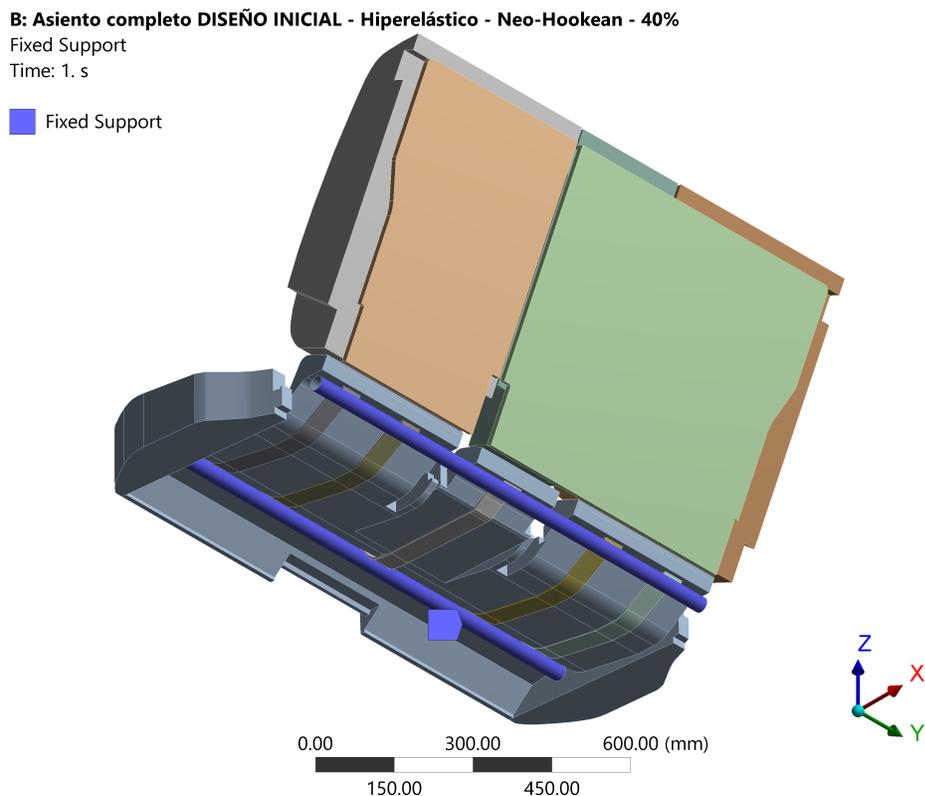
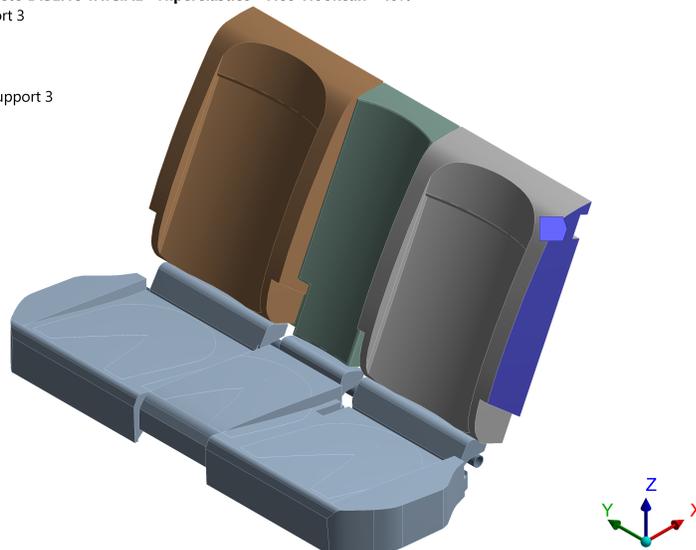


Imagen 38. Soporte fijo – Perfiles tubulares en el modelo inicial

Por otro lado, el asiento en particular, es trasero. Esto quiere decir que va encajado en la carrocería del coche, por una parte, en los laterales del respaldo y por otra, en la parte posterior y laterales del cojín. De modo que, el soporte elegido ya no puede ser un soporte fijo si no que debe ser un soporte sin fricción. Se definen entonces dos soportes sin fricción que impiden el movimiento o giro en la dirección normal de las espumas en cuestión. El primero de ellos se establece en las caras laterales de las espumas del respaldo, que están en contacto con la carrocería del coche en la zona donde empieza el maletero. El segundo, se define por el contacto del cojín con el banco incrustado en la carrocería y de la parte del interior de las puertas del vehículo. Para mayor información se incluyen imágenes de dichos soportes en orden de aparición en la explicación.

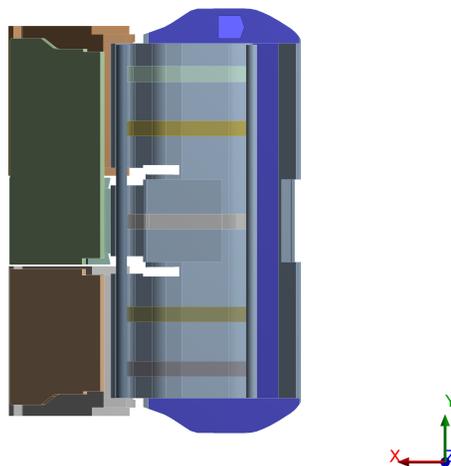
E: Asiento completo DISEÑO INICIAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 40%
Frictionless Support 3
Time: 1. s
12/06/2019 17:07

■ Frictionless Support 3



B: Asiento completo DISEÑO INICIAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 40%
Frictionless Support
Time: 1. s

■ Frictionless Support



B: Asiento completo DISEÑO INICIAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 40%
Frictionless Support 2
Time: 1. s

Frictionless Support 2

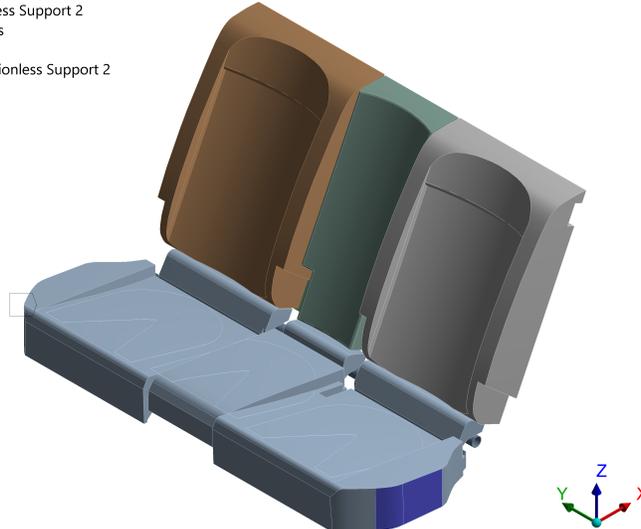
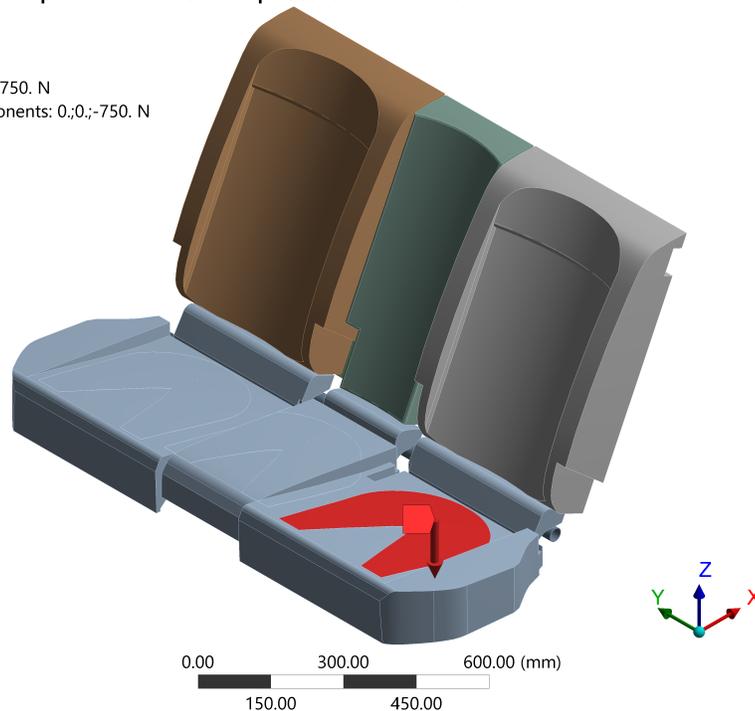


Imagen 39. Soportes sin fricción – Espumas de respaldo (a ambos lados) y cojín en la parte posterior y (a ambos lados) en sus laterales en el modelo inicial

Para terminar, se definen las cargas. Como se ha mencionado en repetidas ocasiones, la única carga aplicable en este ensayo es la de un HPM de percentil 95, que resulta en una fuerza en la dirección OZ de -750N. Simplemente, se define semejante fuerza en cada posición del HPM en el asiento, en cada uno de los tres módulos (posición izquierda, central y derecha).

B: Asiento completo DISEÑO INICIAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 40%
Force
Time: 1. s

Force: 750. N
Components: 0,0,-750. N



D: Asiento completo DISEÑO INICIAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 60%
Force
Time: 1. s

Force: 750. N
Components: 0.;0.;-750. N

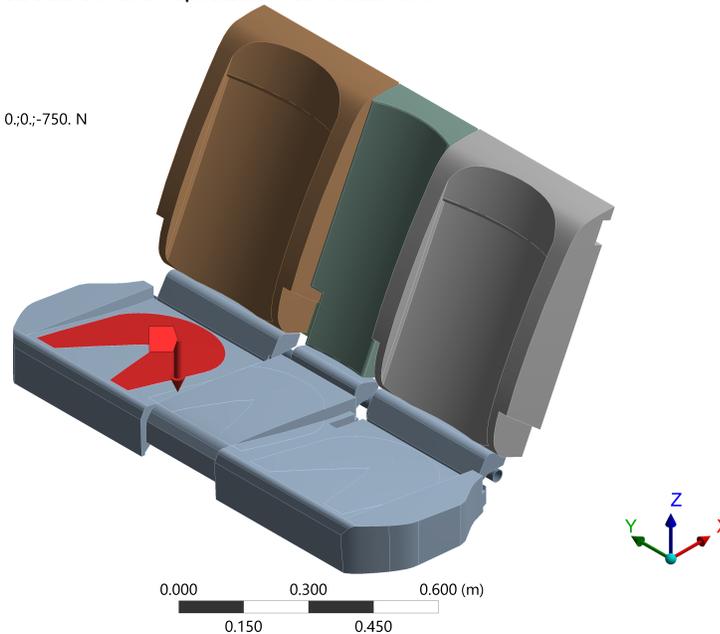


Imagen 40. Definición de la carga del HPM en el módulo 1 (arriba) y 3 (abajo) del asiento en el modelo inicial

C: Asiento completo DISEÑO INICIAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - Centro
Force
Time: 1. s

Force: 750. N
Components: 0.;0.;-750. N

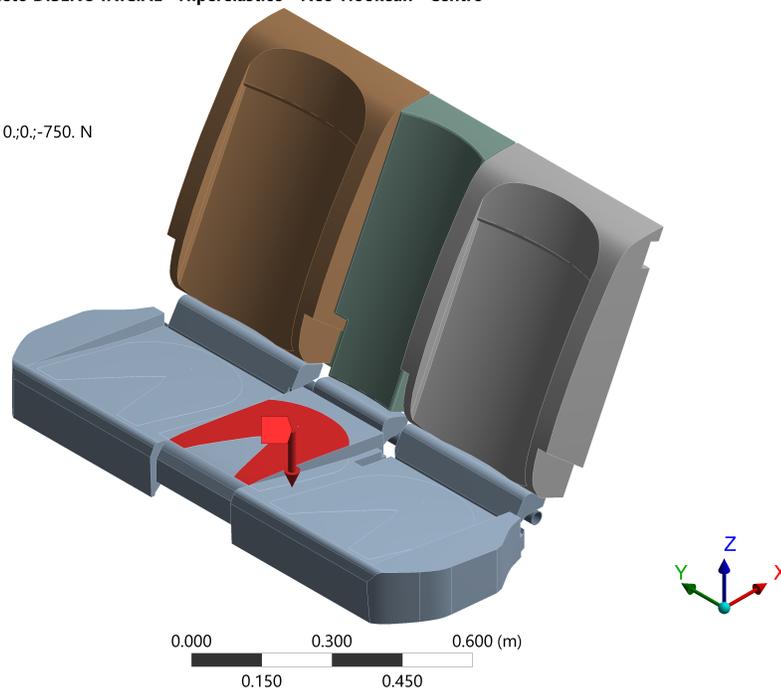


Imagen 41. Definición de la carga del HPM en el módulo 2 del asiento en el modelo inicial

Definido así, con las características específicas del estudio, el pre-proceso del estudio estructural estático en concreto, se procede a la explicación de las simplificaciones propias de este asiento. Como es lógico, cuanto menor sea el coste computacional de la simulación, más

beneficioso será para el desarrollo del estudio. Por ello, una vez simulado el asiento completo, se ha realizado la misma simulación suprimiendo el respaldo completo del asiento (espumas y placas) (ya que en la primera simulación se observa que no interesan en la solución y/o resultados). Esta decisión se hace con la intención de simplificar el conjunto completo a únicamente la espuma del cojín y su correspondiente estructura metálica (refuerzos y tubos) para principalmente, reducir el coste computacional, siempre y cuando los resultados obtenidos sigan siendo aptos.

Dicho esto, se resumen los resultados obtenidos de nombradas simulaciones en las tablas que se muestran a continuación, donde se comparan los valores establecidos del punto-SR con los resultados de la simulación a los que se denomina como punto-H.

Para entender los resultados, se explica como se determinan los resultados numéricos finales del punto-H. Primero, el punto-SR, establecido por el fabricante, se ha proyectado sobre el cojín del asiento, facilitando así un punto concreto sobre el que realizar la medida. El punto-SR se ubica por encima del cojín del asiento y delante de las espumas del respaldo, en un espacio donde no hay contacto con ningún elemento del asiento, ya que es el lugar que ocupa el pasajero. El programa *ANSYS Workbench* calcula automáticamente la coordenada, según el sistema de referencia 3-D del vehículo establecido, del punto concreto definido. Se obtiene como resultado los tres valores para coordenada (x, y, z) del punto-H proyectado. Con las coordenadas OX y OY no hay ningún problema, ya que la proyección del punto-SR solo afecta a la coordenada OZ del punto-H medido por el programa. Es decir, para obtener la coordenada OZ real del punto-H medido en la simulación, es necesario sumar a este valor la distancia que existe entre el punto-SR y la superficie del cojín en vertical. Estas distancias se miden en el CAD del modelo del diseño inicial, teniendo en cuenta que el punto de referencia es distinto en los módulos laterales que en el modulo central, se requieren las dos distancias.

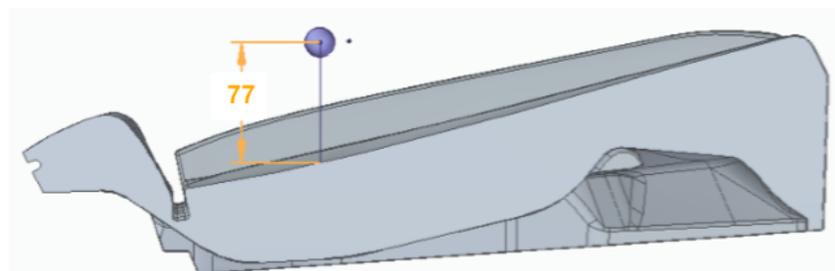


Imagen 42. Distancia en OZ del punto-SR lateral a la superficie del cojín del modelo inicial (módulos 1 y 3) – Vista de corte

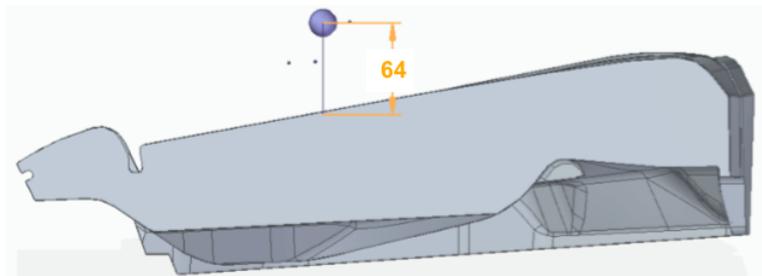


Imagen 43. Distancia en OZ del punto-SR central a la superficie del cojín del modelo inicial (módulo 2) – Vista de corte

En resumen, es necesario sumar a la coordenada OZ calculada por *ANSYS Workbench*, el valor de la distancia vertical entre el punto-SR y la superficie del cojín específica para cada módulo del asiento. En el caso de los módulos laterales se suman 77mm y el módulo central 64mm.

- **Resultados del asiento completo (con respaldo)**

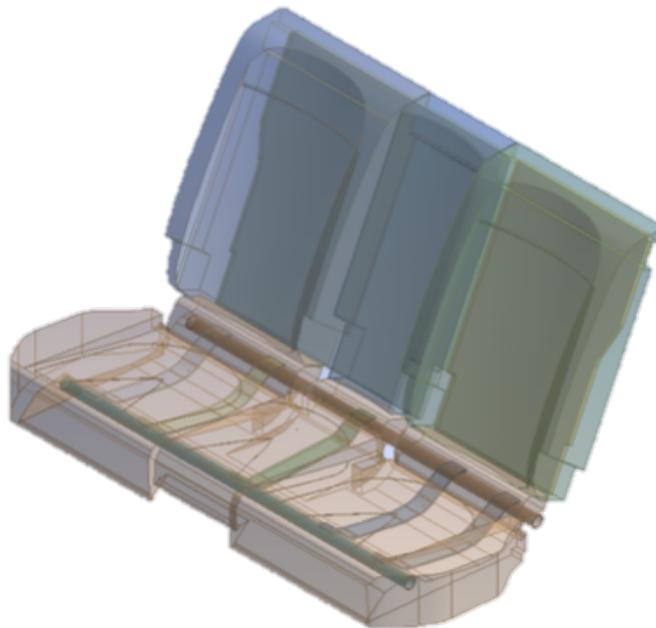


Imagen 44. Geometría del asiento completo (con respaldo) del modelo inicial utilizada en la simulación con *ANSYS Workbench*

Se realizan las tres simulaciones, una en cada módulo, obteniendo los resultados medidos por el programa de la proyección del punto-H indicados en las siguientes imágenes. Como añadido a las imágenes, se plasman los resultados numéricos en una tabla de forma más clara. Seguidamente, se muestra otra tabla con todos los resultados reales del punto-H después

de sumarles los valores correspondientes, previamente mencionados y señalados en las imágenes 42 y 43.

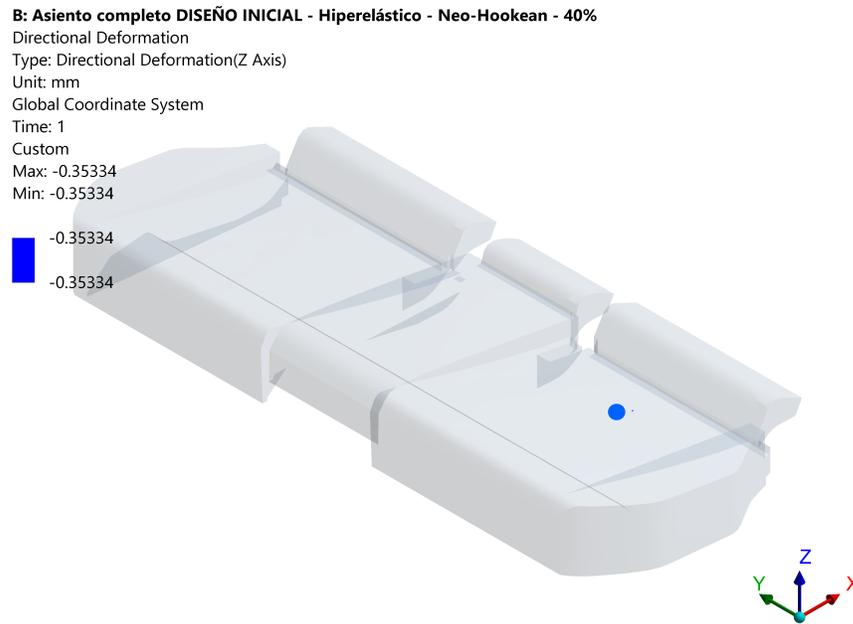


Imagen 45. Resultado numérico de la proyección del punto-H en ANSYS Workbench del módulo 1. Asiento completo inicial (con respaldo)

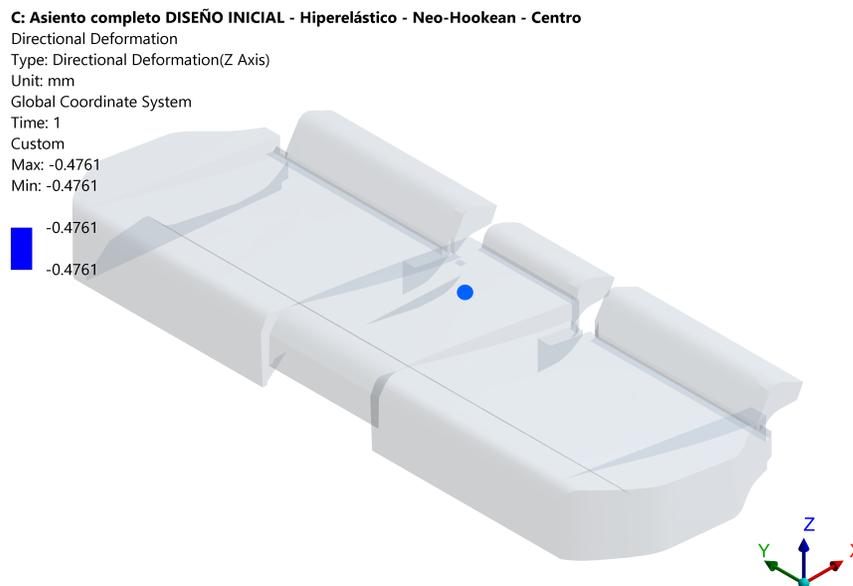


Imagen 46. Resultado numérico de la proyección del punto-H en ANSYS Workbench del módulo 2. Asiento completo inicial (con respaldo)

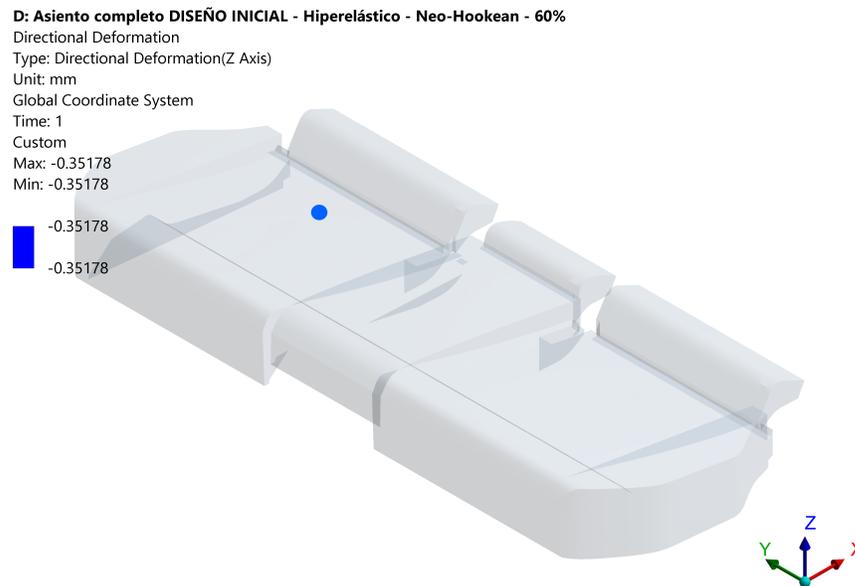


Imagen 47- Resultado numérico de la proyección del punto-H en ANSYS Workbench del módulo 3. Asiento completo inicial (con respaldo)

Las coordenadas de la proyección del punto-H mostradas en las imágenes anteriores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 11. Resultados numéricos de la proyección del punto-H en el asiento completo inicial (con respaldo)

Módulo	Valor (mm)	Posición X	Posición Y	Posición Z
1 (40%)	0,35594	2053,57	-347,24	259,01
2 (Centro)	0,47887	2029,50	1,63	296,78
3 (60%)	0,35389	2054,38	35,22	258,93

Entonces, los resultados numéricos del punto-H real en el asiento completo (con respaldo) son las expuestas en la siguiente tabla. Si las mediciones están de color verde significa que cumplen los requisitos de tolerancia. Por el contrario, si están de color rojo significa que no cumplen con los requisitos establecidos por el fabricante.

Tabla 12. Resultados numéricos del punto-H real en el asiento completo inicial (con respaldo)

		Punto-SR (mm)	Punto-H (mm)	Desviación
Módulo 1 (Derecha)	X	2055	2054,3	-0,7
	Z	336	341,9	+5,9
	Y	-350	-348,2	+1,8
Módulo 2 (Centro)	X	2029	2029,5	+0,5
	Z	366	365,8	-0,2
	Y	0	1,6	+1,6
Módulo 3 (Izquierda)	X	2055	2054,4	-0,6
	Z	336	341,9	+5,9
	Y	350	352,2	+2,2

- **Resultados del asiento parcial (sin respaldo)**

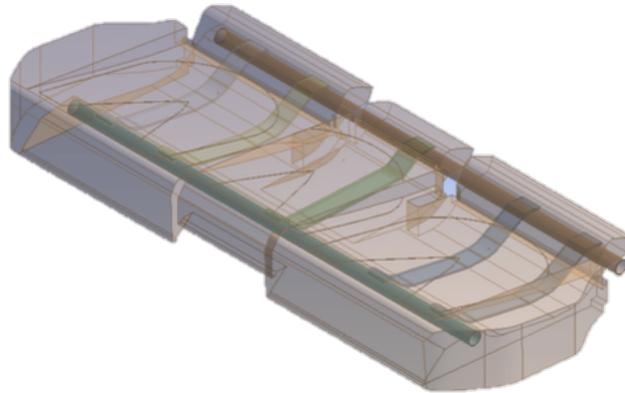


Imagen 48. Geometría del asiento parcial (sin respaldo) del modelo inicial utilizada en la simulación con ANSYS Workbench

Se realizan las tres simulaciones, una en cada modulo, obteniendo los resultados medidos por el programa de la proyección del punto-H indicados en las siguientes imágenes. Como añadido a las imágenes, se plasman los resultados numéricos en una tabla de forma más clara. Seguidamente, se muestra otra tabla con todos los resultados reales del punto-H después de sumarlos los valores correspondientes, previamente mencionados y señalados en las imágenes 42 y 43.

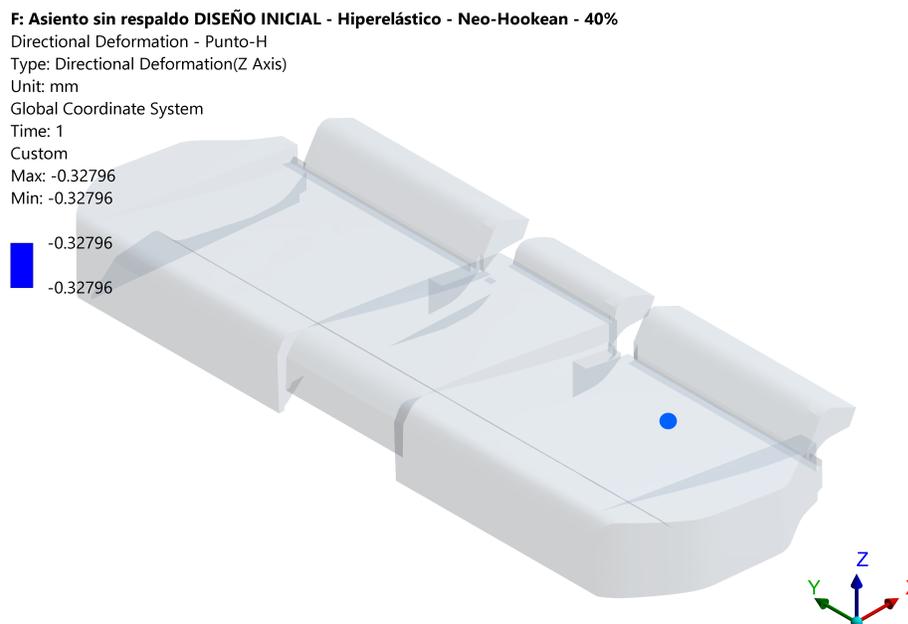


Imagen 49. Resultado numérico de la proyección del punto-H en ANSYS Workbench del módulo 1. Asiento parcial inicial (sin respaldo)

J: Asiento sin respaldo DISEÑO INICIAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - Centro

Directional Deformation - Punto-H
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Custom
Max: -0.43732
Min: -0.43732

-0.43732
-0.43732

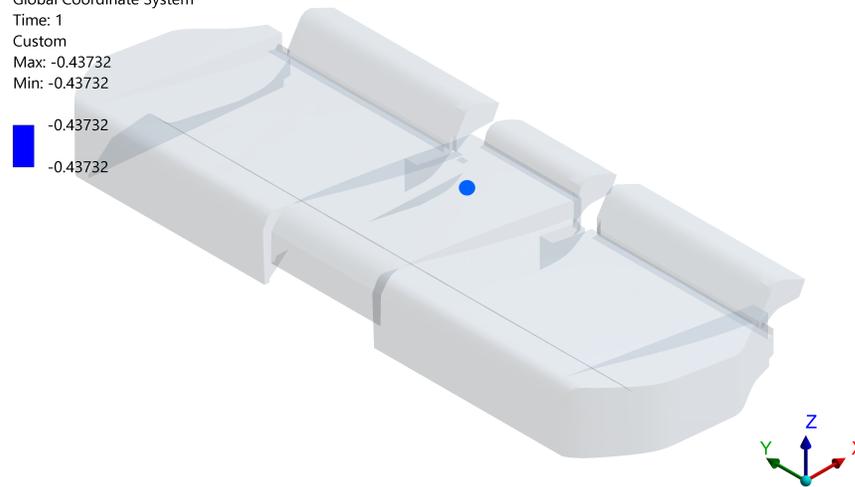


Imagen 50. Resultado numérico de la proyección del punto-H en ANSYS Workbench del módulo 2. Asiento parcial inicial (sin respaldo)

H: Asiento sin respaldo DISEÑO INICIAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 60%

Directional Deformation - Punto-H
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
Custom
Max: -0.32828
Min: -0.32828

-0.32828
-0.32828

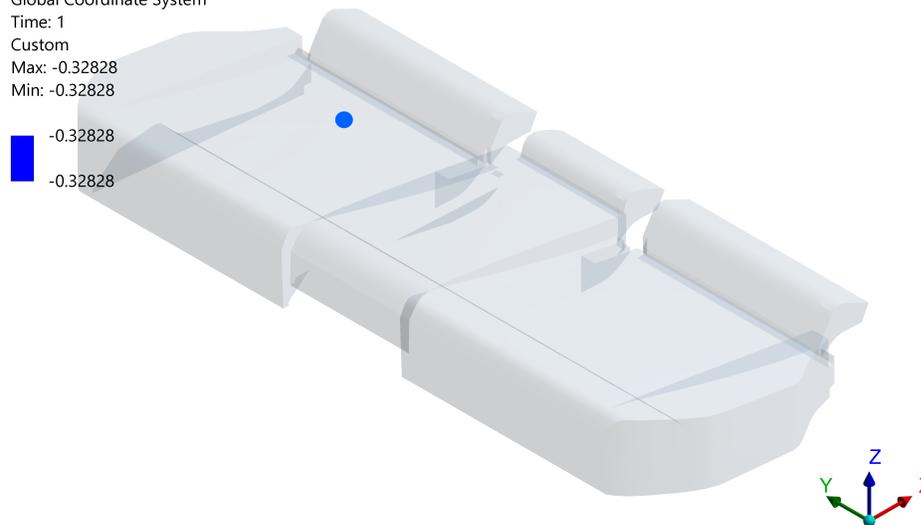


Imagen 51. Resultado numérico de la proyección del punto-H en ANSYS Workbench del modulo 3. Asiento parcial inicial (sin respaldo)

Las coordenadas de la proyección del punto-H mostradas en las imágenes anteriores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 13. Resultados numéricos de la proyección del punto-H en el asiento parcial inicial (sin respaldo)

Módulo	Valor (mm)	Posición X	Posición Y	Posición Z
1 (40%)	0,33015	2054,30	-347,64	259,29
2 (Centro)	0,43917	2028,14	1,37	296,78
3 (60%)	0,33033	2054,53	352,15	259,29

Entonces, los resultados numéricos del punto-H real en el asiento parcial (sin respaldo) son las expuestas en la siguiente tabla:

Tabla 14. Resultados numéricos del punto-H real en el asiento parcial inicial (sin respaldo)

		Punto-SR (mm)	Punto-H (mm)	Desviación
Módulo 1 (Derecha)	X	2055	2054,3	-0,7
	Z	336	342,3	+6,3
	Y	-350	-347,4	+2,6
Módulo 2 (Centro)	X	2029	2028,1	-0,9
	Z	366	365,8	-0,2
	Y	0	1,4	+1,4
Módulo 3 (Izquierda)	X	2055	2054,1	-0,9
	Z	336	342	+6
	Y	350	351,6	+1,6

- **Comparación de resultados del asiento con y sin respaldo**

En la siguiente tabla se comparan los valores de los resultados del punto-H real de los asientos simulados con y sin respaldo. Es importante fijar la atención en las desviaciones de cada coordenada y compararla en las dos columnas (con respaldo y sin respaldo) de cada modulo.

Tabla 15. Comparación de resultados del punto-H real del asiento inicial con y sin respaldo

		Punto-SR (mm)	CON RESPALDO		SIN RESPALDO	
			Punto-H (mm)	Desviación	Punto-H (mm)	Desviación
Módulo 1 (Derecha)	X	2055	2054,3	-0,7	2054,3	-0,7
	Z	336	341,9	+5,9	342,3	+6,3
	Y	-350	-348,2	+1,8	-347,4	+2,6
Módulo 2 (Centro)	X	2029	2029,5	+0,5	2028,1	-0,9
	Z	366	365,8	-0,2	365,8	-0,2
	Y	0	1,6	+1,6	1,4	+1,4
Módulo 3 (Izquierda)	X	2055	2054,4	-0,6	2054,1	-0,9
	Z	336	341,9	+5,9	342	+6
	Y	350	352,2	+2,2	351,6	+1,6

Se observa que en la coordenada OX la máxima diferencia es de 1,4mm en el modulo 2, en la coordenada OZ la máxima diferencia es de 0,4mm en el modulo 1 y en la coordenada OY la máxima diferencia es de 0,8mm en el modulo 1. Teniendo una tolerancia máxima permitida de 20mm (± 10 mm), se calcula que la máxima diferencia, entre las desviaciones de las mediciones de los asientos con y sin respaldo, tiene un porcentaje del 7% sobre el total del requisito de tolerancias.

Igualmente, cabe resaltar la diferencia de elementos (en *ANSYS Workbench*) necesarios entre las diferentes simulaciones:

Tabla 16. Comparación del número de elementos en *ANSYS Workbench* de las simulación del asiento con y sin respaldo

Nº de elementos en <i>ANSYS Workbench</i>		
	Con respaldo	Sin respaldo
40%	26000	23000
Centro	26000	23000
60%	26000	23000

La diferencia entre los resultados de la simulación con o sin respaldo es prácticamente nula, por lo que se elige el modelo sin respaldo por tener menor coste computacional.

Obteniendo así un resultado que cumple los criterios establecidos, se procede a la fabricación de prototipos para la medida del punto-H experimental.

12. Mediciones experimentales del punto-H

La muestra elegida para el análisis experimental, con el modelo inicial constituido, es de diez prototipos. Todos ellos contruidos con la misma serie de piezas, obtenidas de los mismos proveedores y ensamblados en la planta por el equipo responsable del proyecto. Una vez formados los prototipos se llevan a la sala del punto-H para realizar las mediciones correspondientes. Como se ha comentado con anterioridad, el método de medición del punto-H sigue la aplicación a la norma *ISO 6549*, en concreto, con atención a los estándares definidos por el fabricante en el *ECE: ECE-R 17*. Este estándar provee especificaciones e instrucciones para la utilización del HPM para realizar la medición adecuadamente. El maniquí utilizado es de percentil 95 y esta regulado por la *SAE J826*. Además, el software de medición específico para

este tipo de controles, y por ello el utilizado, es el *FAROArm* y *FAROScanArm* (instrumentos de medición de contacto y ópticos).

Con todo el equipo preparado se realiza la medición de los prototipos siguiendo minuciosamente las siguientes pautas:

1. Calibración del *Carbuck* (plataforma que simula la carrocería del vehículo donde se coloca el prototipo del asiento para su medición experimental del punto-H). Con los equipos de *FAROArm* mencionados se miden seis puntos clave repartidos en la plataforma del *Carbuck*:
 - Punto medio de referencia frontal
 - Punto medio de referencia trasero
 - Punto lateral izquierdo
 - Punto lateral derecho
 - Punto de bloqueo del respaldo izquierdo
 - Punto de bloqueo del respaldo derecho

Una vez verificadas las coordenadas de todos los puntos de referencia de la plataforma de medición se coloca el asiento en el *Carbuck*.

2. Fijación de la posición del asiento. Se fija la posición establecida por el estándar para la medición del punto-H, que en este caso es la correspondiente al asiento en su posición longitudinal trasera, para realizar las mediciones de los puntos de control del asiento.
3. Amoldamiento de la espuma. El operario debe sentarse en el asiento durante un minuto aproximadamente.
4. Protección del asiento. Se coloca una tela que cubre el módulo del asiento sometido a estudio.
5. Colocación del HPM. Se posiciona el HPM, se ajusta a con la "Barra-T" al percentil 95 y se le añaden las piernas correspondientes al mismo percentil.
6. Colocación de los pesos. Primero se colocan las pesas de los muslos, cintura y piernas, después, se colocan las del torso y se ajusta un ángulo de 25°. Si fuera necesario se ajusta manualmente el HPM hasta conseguir dicho ángulo.
7. Medición de los puntos de control del asiento. Con el equipo de *FAROArm* se miden los del HPM y el programa los compara con los puntos de referencia del *Carbuck* y el asiento para determinar la posición del punto-H.

8. Realizar un escáner 3-D del asiento. Con el equipo de FAROScanArm realizar un escáner del asiento completo que modeliza el asiento en un diseño CAD para una segunda medición y así, asegurar los valores resultantes.
9. Ficha de resultados. Registrar la medición del punto-H con su número de prototipo y con la especificación del módulo estudiado para su posterior comparación con el punto-SR de referencia.

Una vez realizadas las mediciones en los tres módulos de los diez prototipos, se recogen los resultados del punto-H en una tabla. El color verde indica que el valor medido del punto-H entra dentro del rango de tolerancias del punto-SR. Por otro lado, el color rojo indica lo contrario, indica que el valor medido del punto-H no cumple con las tolerancias del punto-SR establecido.

Tabla 17. Mediciones experimentales del punto-H en los prototipos del diseño inicial

		Punto-SR (mm)	PROTOTIPOS										Desviac. máx.
			Punto-H (mm)										
			Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	Nº 6	Nº 7	Nº 8	Nº 9	Nº 10	
Módulo 1 (Derecha)	X	2055	2058,7	2054	2051	2053,3	2055,6	2053,5	2053,7	2055,6	2056	2052,3	+3,7
	Z	336	325,7	324,6	321,8	323,5	325,2	324,4	322,2	323,2	323,3	322,6	-14,2
	Y	-350	-354,2	-353,8	-353,4	-352,7	-353,8	-352,4	-351,6	-354,2	-353,6	-351,1	+4,2
Módulo 2 (Centro)	X	2029	2021,5	2024,5	2026,1	2024,5	2023,1	2019,5	2027,6	2028,6	2019,7	2034,9	-9,5
	Z	366	370,9	375,7	375,5	373,2	374,8	375,6	375,4	375,2	373,9	372,6	+9,3
	Y	0	-4,7	-3,6	-0,6	-1,2	-2	-1,8	0,5	-2,2	-0,9	1,6	-4,7
Módulo 3 (Izquierda)	X	2055	2057,6	2058,1	2055,2	2054,7	2057,7	2056	2054,6	2055,5	2056,8	2057	+3,1
	Z	336	324,7	322,6	320,7	323,9	322,2	322,3	321,5	322,4	321	319,6	-16,4
	Y	350	350,1	352	354,6	352,6	350,8	352,1	352,4	351,5	350,3	354,6	+4,6

Como se puede observar en los resultados anteriores todas las coordenadas de las mediciones del punto-H son válidas, a excepción de la coordenada OZ en los módulos laterales del asiento. La máxima desviación que se distingue es de -16,4mm, es decir, un 132% del requisito de tolerancias. Ahora, se evalúan y comparan en conjunto, los resultados de las

mediciones analíticas y las experimentales para buscar una solución y alcanzar en las mediciones del punto-H, el punto-SR señalado.

13. Análisis de resultados

Para analizar los resultados obtenidos de las simulaciones llevadas a cabo con el software de *ANSYS Workbench* y las mediciones físicas del punto-H realizadas en la planta, se comparan ambas tablas para crear una visualización clara y global de las discrepancias.

13.1. Comparación de resultados numéricos y mediciones experimentales

Se separan los resultados en los tres módulos del asiento, lateral derecho, centro y lateral izquierdo, o lo que es lo mismo, 40%, centro y 60%, de forma más simple, modulo 1, 2, y 3, respectivamente. Después, se comparan paralelamente los resultados obtenidos numéricamente del asiento sin respaldo, con los medidos experimentalmente y ambos se contrastan con el punto-SR de diseño.

➤ Módulo 1 (asiento lateral derecho / módulo 40%)

Tabla 18. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 1 del diseño inicial

Módulo	Punto-SR (mm)	RESULTADOS NUMÉRICOS	MEDICIONES EXPERIMENTALES										
			PROTOTIPOS										
			Punto-H (mm)	Punto-H (mm)									
				Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	Nº 6	Nº 7	Nº 8	Nº 9	Nº 10
1	X	2055	2054,3	2058,7	2054	2051	2053,3	2055,6	2053,5	2053,7	2055,6	2056	2052,3
	Z	336	342,3	325,7	324,6	321,8	323,5	325,2	324,4	322,2	323,2	323,3	322,6
	Y	-350	-347,4	-354,2	-353,8	-353,4	-352,7	-353,8	-352,4	-351,6	-354,2	-353,6	-351,1

En este caso la simulación por ordenador muestra que las coordenadas OX y OY quedan por debajo de la coordenada del punto-SR pero, casi igualan su valor. Esto significa que el ocupante se posiciona más cerca del conductor y más hacia el centro del asiento trasero de lo inicialmente diseñado según el sistema de referencia 3-D del vehículo establecido. No es este el caso de la coordenada OZ, ya que ésta queda un poco por encima de lo establecido, lo que indica que el pasajero está a una altura mayor de la diseñada.

Nada se parecen estos valores a las mediciones experimentales de los prototipos, que aún cumpliendo las tolerancias en las coordenadas OX y OY, quedan por encima del punto de referencia. Esto indica lo opuesto al caso numérico, el ocupante queda más alejado del

conductor y más pegado a la puerta del vehículo. Y, en el caso puntual de la coordenada OZ, es un valor muy bajo y no válido ya que sobrepasa las tolerancias definidas por el fabricante, aunque por lo menos quedan dentro del límite legal.

➤ Módulo 2 (asiento central / módulo central)

Tabla 19. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 2 del diseño inicial

Módulo	Punto-SR (mm)	RESULTADOS NUMÉRICOS	MEDICIONES EXPERIMENTALES										
			PROTOTIPOS										
			Punto-H (mm)	Punto-H (mm)									
				Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	Nº 6	Nº 7	Nº 8	Nº 9	Nº 10
2	X	2029	2028,1	2021,5	2024,5	2026,1	2024,5	2023,1	2019,5	2027,6	2028,6	2019,7	2034,9
	Z	366	365,8	370,9	375,7	375,5	373,2	374,8	375,6	375,4	375,2	373,9	372,6
	Y	0	1,4	-4,7	-3,6	-0,6	-1,2	-2	-1,8	0,5	-2,2	-0,9	1,6

En el caso del asiento central, en el resultado del punto-H numérico se obtienen casi los mismos valores que los del punto de referencia diseñado, por lo que se podría decir que el diseño es casi perfecto en este módulo del asiento. Sólo tiene una pequeña desviación de un milímetro, casi despreciable, del pasajero hacia la derecha.

Las mediciones experimentales no se parecen a las analíticas, principalmente en la coordenada OX. En el caso real, el pasajero se posiciona más cercano al conductor que en lo determinado por la simulación computacional. En el caso de las otras dos coordenadas, OZ y OY, los valores se asemejan considerablemente. De todas formas, todos los prototipos cumplen con las tolerancias establecidas y por esta razón no debería ser necesario realizar ningún cambio sobre el diseño inicial de este módulo.

➤ Módulo 3 (asiento lateral izquierdo / módulo 60%)

Tabla 20. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 3 del diseño inicial

Módulo	Punto-SR (mm)	RESULTADOS NUMÉRICOS	MEDICIONES EXPERIMENTALES										
			PROTOTIPOS										
			Punto-H (mm)	Punto-H (mm)									
				Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	Nº 6	Nº 7	Nº 8	Nº 9	Nº 10
3	X	2055	2054,1	2057,6	2058,1	2055,2	2054,7	2057,7	2056	2054,6	2055,5	2056,8	2057
	Z	336	342	324,7	322,6	320,7	323,9	322,2	322,3	321,5	322,4	321	319,6
	Y	350	351,6	350,1	352	354,6	352,6	350,8	352,1	352,4	351,5	350,3	354,6

En este último caso, se pueden repetir las conclusiones expuestas en el caso del asiento del módulo 1. Con la única excepción de que en este módulo, en la coordenada OY, se obtienen mejores resultados, ya que ambos (numéricos y experimentales) son prácticamente iguales.

13.2. Valoraciones iniciales

Se observa que el principal problema se encuentra en la coordenada OZ de los módulos laterales (1 y 3) del asiento. En el resto de coordenadas se observan discrepancias pero son mínimas, y todas ellas están dentro de los límites permisibles.

Una de las posibles causas de estas pequeñas variaciones podría ser una desviación entre el sistema de origen de coordenadas elegido en el diseño inicial del CAD, y el establecido a la hora de realizar las mediciones experimentales con el asiento físico ensamblado en el *Carbuck* (estructura de la carrocería del vehículo en particular). Esto podría comprobarse con una nueva calibración de los aparatos de medición, según el reglamento específico, y una comprobación de la definición del sistema de referencia en el CAD. Otra cuestión, podría ser la correcta fabricación de las piezas, es decir, si la pieza física es igual o por lo menos similar (dentro de tolerancias) al modelo diseñado en CAD. También, si los materiales están definidos con las propiedades y características establecidas o no cumple con sus propias tolerancias. Otro error, podría ser el método seguido en el montaje del asiento. Para evitar seguir con casos hipotéticos de posibles errores, se elabora un análisis de alternativas con la meta de encontrar la solución a los problemas encontrados.

14. Análisis de alternativas

En este apartado se analizan las alternativas de diseño de cualquier aspecto (geométrico o material) para un nuevo diseño que cumpla los requisitos. Primero, se estudian las causas de que el punto-H no cumpla con el valor deseado, se clasifican y después se evalúan en una tabla de resumen. Finalmente, se propone un diseño alternativo y se repite el proceso llevado a cabo con el asiento del diseño inicial. Primero, buscando que cumpla de forma numérica, y seguidamente, que se verifique experimentalmente la posición del punto-H, dando por válida la nueva propuesta de asiento.

Como se ha podido observar en la comparación de los resultados numéricos con los experimentales existe una gran discrepancia. Las mediciones del punto-H realizadas sobre los diferentes prototipos tienen los resultados descritos en la *Tabla 17*. Estos resultados implican que el punto-H es muy bajo, hasta 16,4mm en los asientos laterales. Es decir, no se cumple con las tolerancias exigidas por el fabricante por lo que no se alcanza el punto-H deseado. Para ordenar las posibles causas de ésta diferencia, se agrupan en una tabla de resumen a modo de conclusión. Se listan las posibles causas del problema y se evalúan una a una para llegar al diseño que logre como resultado una medición del punto-H dentro de las exigencias y tolerancias establecidas por el fabricante.

Primero, se estudian los parámetros con potencial influencia en el resultado de la medición. Considerando que las variables son múltiples, los focos principales se centran en las características en dependencia con: las espumas, la estructura metálica y las fundas. Sin embargo, para aclarar las posibles causas que afectan al resultado del estudio del punto-H, se realiza el siguiente diagrama de Causa-Efecto:

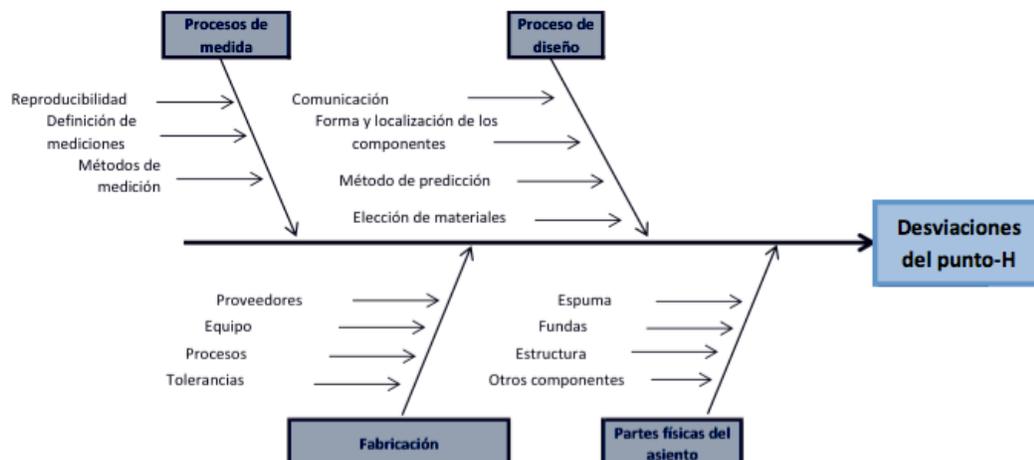


Imagen 52. Diagrama de Causa-Efecto para las desviaciones del punto-H

Analizando cada bloque del diagrama anterior por separado y en profundidad, el campo del problema principal se hace claramente visible.

- **Procesos de medida:** los diferentes procesos que se utilizan en la medición del punto-H tienen un claro impacto en el resultado final. El factor humano es la principal preocupación en este aspecto. La preparación, experiencia y habilidades del operador puede variar de un trabajador a otro y como consecuencia, también lo puede hacer el

resultado medido. El HPM, la precisión de las herramientas, el soporte sobre el que se coloca el asiento e incluso la temperatura ambiente pueden tener impacto sobre el resultado.

- **Proceso de diseño:** estos son los primeros pasos en la creación del asiento y por ello, definitivamente afectan al punto-H. Los diferentes materiales, las formas y las posiciones de los componentes elegidos pueden tener impacto sobre el resultado final.
- **Fabricación:** la fabricación tiene un gran efecto en las desviaciones del punto-H. Puede ser en cuanto a tolerancias en el asiento, procedimiento utilizado, buena funcionabilidad del equipo y en general, la eficiencia del proveedor.
- **Partes físicas del asiento (Anexo 5):** los componentes físicos del asiento como la estructura metálica, las espumas, las fundas, el SBR, etc. afectan a la localización del punto-H ya que, sobre éstas se coloca el HPM para realizar la medición.

Entonces, confiando en la cualificación, maquinaria y metodología de los trabajadores responsables de la realización de las mediciones del punto-H, los métodos de medida se descartan como causantes del problema. En adición, el posible fallo de las máquinas de medición utilizadas también se descarta, ya que éstas han sido calibradas y comprobadas antes de realizar el estudio. Por otro lado, el proceso de diseño, la fabricación y las partes físicas del asiento son bloques que van ligados entre sí. Dado que las partes físicas del asiento son el resultado final del diseño y fabricación del mismo, éstas son las responsables de la inadmisibilidad de los asientos de este modelo determinado de automóvil. En otras palabras, si ha habido un error en el diseño o en la fabricación, éste se verá reflejado en el componente físico resultante, en este caso, en los prototipos.

En definitiva, la causa es originada por las partes físicas del asiento, que aunque hayan podido arrastrar una equivocación a lo largo de su proceso de creación, son las que van a ofrecer datos reales y físicos con los que poder trabajar y llevar a cabo el estudio deseado. Con esta información, se esboza la primera lista de los parámetros con impacto en el punto-H y se describen individualmente en la siguiente tabla:

Tabla 21. Propiedades principales de los diferentes componentes con impacto en el punto-H

ESTRUCTURA METÁLICA	PROPIEDADES	FLEXIBILIDAD	El área del marco metálico que soporta la mayor parte del peso del maniquí tendrá una desviación que deberá ser calculada para predecir la localización del punto-H.	
		TENACIDAD	Es el concepto que denota la capacidad que tiene el acero de resistir la aplicación de una fuerza externa sin romperse.	
		PLASTICIDAD	Es la capacidad que tiene el acero de conservar su forma después de ser sometido a un esfuerzo. Se observará si la estructura mantiene su forma después de aplicada la fuerza.	
	ESTILOS	MANUAL	Los mecanismos para ajustar la posición del asiento no deberían afectar la localización del punto-H. De todos modos, los componentes requeridos para el ajuste manual tienen que ser controlados para asegurar que no afectan a otras partes.	
		EXTENSION DE LA PIERNA	La extensión de la pierna, permitida por el marco metálico no debería afectar a la localización del punto-H directamente. Aún y todo, su modificación incluye diferentes características de varios componentes y por ello debería controlarse.	
ESPUMA	PROPIEDADES	GEOMETRIA	La forma de la espuma es uno de los mayores contribuyentes en la localización del punto-H. El perfil determinará la superficie de contacto entre el maniquí y el asiento.	
		IFD	La relación entre la carga aplicada y la desviación de la espuma es uno de los mayores contribuyentes en la localización del punto-H. Determinará cuanto se hunde el maniquí en el cojín del asiento.	
		BARRA INSERTADA	La barra insertada dentro de la espuma puede afectar su comportamiento con carga aplicada.	
		GROSOR	Las posibles desviaciones durante el moldeo pueden variar el grosor en algunas partes específicas que pueden influenciar en la localización del punto-H.	
		DUREZA	La mezcla de diferentes espumas, para crear diferentes durezas en las distintas partes del asiento, puede fluir entre ellas creando un comportamiento diferente al deseado.	
		CAPA PROTECTORA	La capa protectora puede influenciar el comportamiento cuando existe carga aplicada. A su vez añade altura a la espuma que de resume en la localización del punto-H.	
	ESTILOS	MATERIAL	La forma y el valor de IFD de la espuma necesitan estar en equilibrio para obtener la misma localización para el punto-H que en los demás estilos.	
		EXTENSION DE LA PIERNA	La extensión de la pierna, permitida por el marco metálico no debería afectar a la localización del punto-H directamente. Aún y todo, su modificación incluye diferentes características de varios componentes y por ello debería controlarse.	
FUNDAS	PROPIEDADES	GEOMETRIA	La forma de las costuras debe seguir la geometría de la espuma tanto como sea posible para prevenir sobre estrechamientos en el material o mayores desviaciones en la espuma que las esperadas.	
		ELASTICIDAD	La elasticidad del material de la funda completa afecta a la forma y desviación de la espuma, por lo que tiene que tenerse en cuenta y estar bajo control.	
		GROSOR	El grosor de la funda acumulará altura que resulta en una desviación en el punto-H, aunque será comprimida con carga aplicada.	
		MONTAJE	La estrategia de montaje en relación con el tipo, número y posición de las grapas afectará a la forma y desviación de la espuma, así como al proceso de montaje.	
		ESPUMA DE COMFORT	La lámina unida a la funda podría crear variaciones en el grosor total y en la dureza así como impacto en el comportamiento debido a la forma en la que está unida a la funda (pegada, cosida o laminada).	
	ESTILOS	TEXTIL	Las propiedades de la tela varían de acuerdo con su proceso de fabricación (cosido, tejido...) y se diferencian para cada uno de los estilos. Y la elasticidad del hilo.	
SBR	PROPIEDADES	GROSOR	Lateral	El grosor del SBR será parte de la altura acumulada que afecta al punto-H, además de ser comprimido cuando el asiento tiene carga aplicada.
			Central	

Para evaluar la categoría de las propiedades mencionadas, los estudios previos llevados a cabo por el fabricante de asientos y la experiencia en este entorno, ayudan a clasificar y eliminar algunos de los factores. Dicho esto, se busca reducir la lista de la tabla anterior. No obstante, para filtrar las características anteriores, se empieza por analizar las limitaciones que puedan surgir a la hora de realizar modificaciones en los componentes citados.

Dicho de otra manera, la restricción principal es el propio estado del proyecto. La fase actual en la que se encuentra tiene ya fijados proveedores y componentes. Por ello, se trabaja con modificaciones en los componentes ya existentes y se elimina la posibilidad del cambio completo de piezas (estructura metálica, espumas, fundas, SBR, etc.). Del mismo modo, se trata de un proyecto nuevo con un número reducido de prototipos que limita el estudio a los datos ofrecidos por éstos.

❖ **Estructura metálica:**

Primero cabe mencionar que, en general, la estructura metálica no suele ser única para un solo proyecto o un solo fabricante y por ello, realizar un cambio en su diseño no es tan sencillo ya que afectaría a varios modelos distintos del mismo o de diferentes fabricantes. Así, se descarta inicialmente una posible alteración en la estructura como posible modificación para el diseño alternativo de este modelo en particular, ya que carece de utilidad práctica para el fabricante.

No obstante, se comprueba que cumpla los requisitos y tolerancias establecidas para que el resto de parámetros, correspondientes a las piezas colocadas sobre la estructura, puedan ser evaluados con validez. En adición, se realiza un estudio mediante el MEF sobre la estructura, para el interés de este proyecto, aunque no sea relevante para el fabricante del producto, en este caso, un proveedor particular. Se evalúan las posibles deformaciones de la estructura metálica y las tensiones que resiste, comprobando que no se produzca el fallo. La simulación a realizar consiste en estudiar la influencia del HPM sobre el marco metálico. Se pretenden observar las deformaciones y las tensiones cuando se aplica una fuerza equivalente al peso de un maniquí de percentil 95.

Para mayor facilidad de visualización, se resumen los datos de las deformaciones de las siguientes tres imágenes en una tabla:

Tabla 22. Resumen de las deformaciones de la estructura metálica en ANSYS Workbench de los tres módulos del asiento en el diseño inicial

	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3
Deformación en OZ (mm)	0,14461	0,23127	0,14208

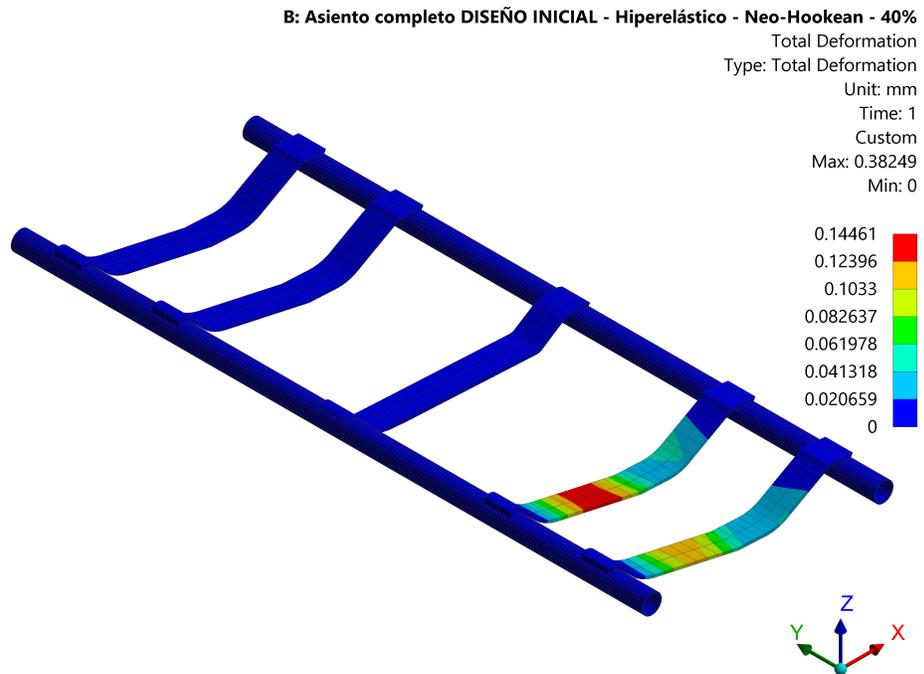


Imagen 53. Deformación en OZ de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 1 – Diseño inicial

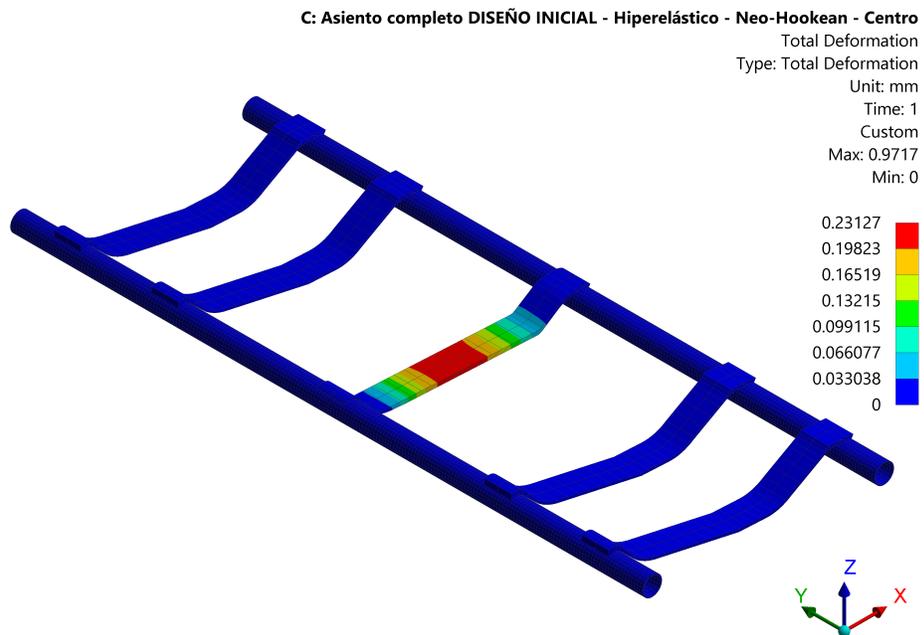


Imagen 54. Deformación en OZ de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 2 – Diseño inicial

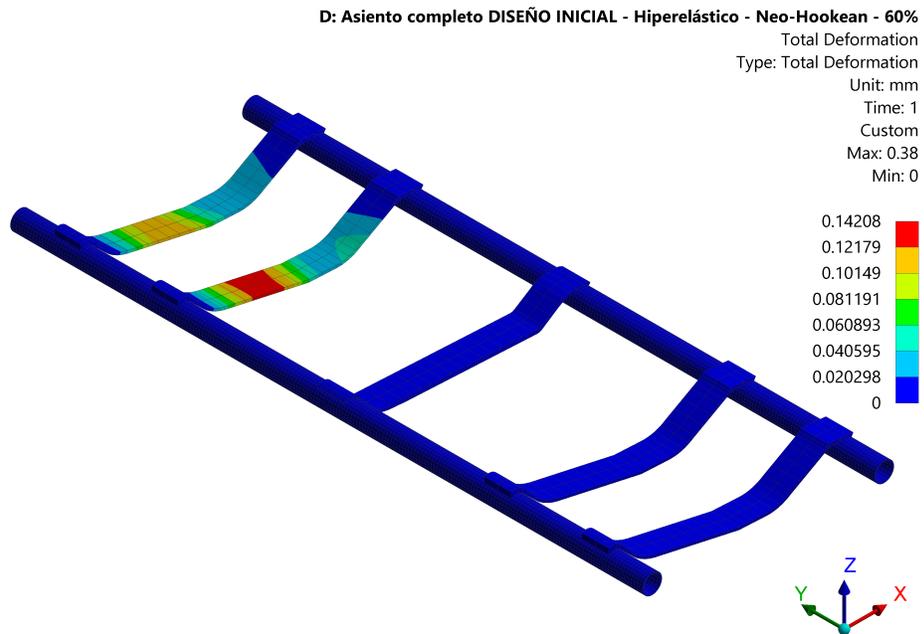


Imagen 55. Deformación en OZ de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 3 – Diseño inicial

Las deformaciones de los tres módulos se concentran en los refuerzos, se consideran despreciables ya que sus valores son casi nulos, e igualmente, se ajustan a las características de alta resistencia correspondientes a este material para soportar las cargas. Demostrada que la deformación de la estructura metálica es intrascendente, se comprueba el estado tensional de la estructura.

Para mayor facilidad de visualización, se resumen los datos de las tensiones de Von Mises de las siguientes tres imágenes en una tabla:

Tabla 23. Resumen de las tensiones de Von Mises de la estructura metálica en ANSYS Workbench de los tres módulos del asiento en el diseño inicial

	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3
Tensión de Von Mises (MPa)	20,576	53,103	25,944

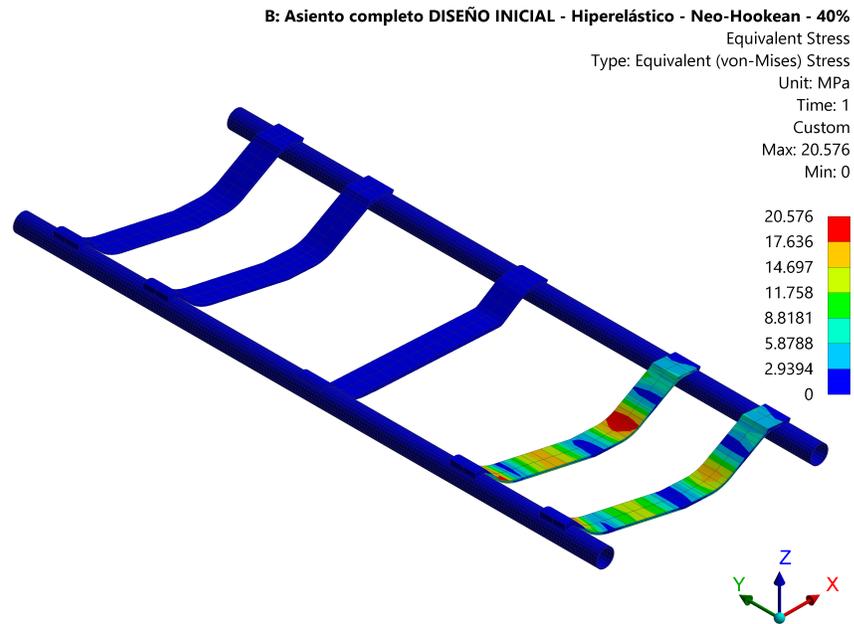


Imagen 56. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 1 – Diseño inicial

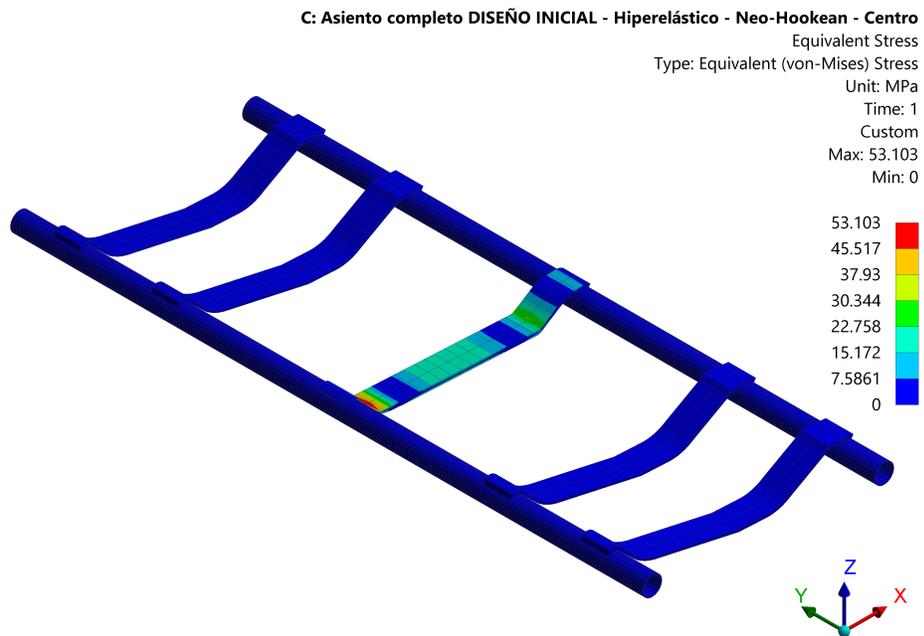


Imagen 57. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 2 – Diseño inicial

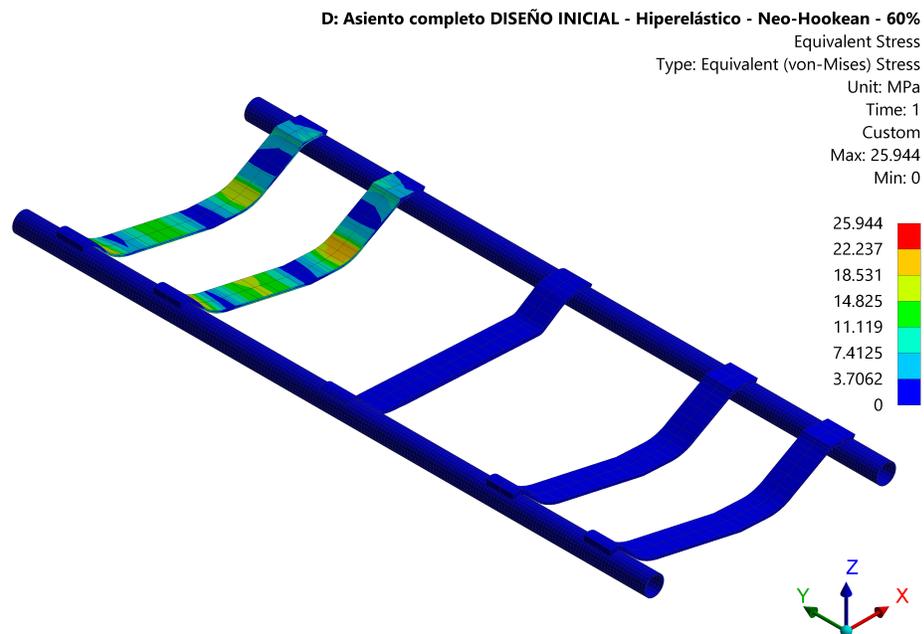


Imagen 58. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 3 – Diseño inicial

Se observa que el estado tensional de los tres módulos queda muy por debajo del valor de la tensión última de estos aceros HSLA, por lo que claramente no se produce el fallo. Entonces, se confirma el descarte de esta parte del asiento como posible causa de los resultados obtenidos en las mediciones experimentales.

❖ Fundas

Con respecto a las fundas, se observa que en los estudios realizados, sobre cada uno de los diferentes estilos de los prototipos construidos hasta la fecha, se obtienen resultados no válidos en su coordenada correspondiente OZ. Las fundas añaden altura al asiento, su grosor está definido por la propia tela y la espuma de confort, presente en los estilos puntuales. Esta espuma tiene un grosor de 2mm y forma parte de todos los estilos de los prototipos ensamblados en el proyecto.

El efecto que, las fundas, pueden tener sobre la medición del punto-H es difícil de aislar del resto de componentes que forman el asiento. La influencia de las fundas no se considera primordial en el resultado inadmisibles obtenido. Por ello, su estudio se detiene en un segundo

plano, lo que no indica que no se vaya a valorar su efecto con una pequeña prueba. Para valorar la influencia de las coberturas en el punto-H se realizan mediciones con y sin ellas. El caso de realizar la medición del punto-H sin fundas es exclusivo para evaluar su resultado en comparación con la medición del punto-H sobre un asiento con fundas, ya que el hecho de realizar la medición sin fundas no cumple con las pautas establecidas en la instrucción utilizada para la realización de la medida del punto-H. Se trata de un trabajo laborioso, ya que hay que desmontar todo el asiento para quitarle las fundas y volver a ensamblarlo. Por esta razón, se evalúan cuatro prototipos distintos con el HPM en la posición central y los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 24. Mediciones del punto-H de prototipos con y sin fundas

Punto-H (mm)	FUNDAS	PROTOTIPOS											
		Nº 1			Nº 3			Nº 4			Nº 10		
		CON	SIN	Desviac.	CON	SIN	Desviac.	CON	SIN	Desviac.	CON	SIN	Desviac.
X		2021,5	2020,4	1,1	2026,1	2025,2	0,9	2024,5	2023,4	0,9	2034,9	2033,9	1,0
Z		370,9	370,3	0,6	375,5	374,6	0,9	373,2	372,8	0,4	372,6	372,0	0,6
Y		-4,7	-4,1	0,6	-0,6	-0,3	0,3	-1,2	-0,8	0,4	1,6	2,0	0,4

Como muestra la tabla anterior, las diferencias entre las mediciones del punto-H con o sin fundas de los prototipos es mínima. La desviación máxima en cualquier dirección encontrada es de 1,1mm, es decir, solamente un 5,5% de la tolerancia total permitida. Con interés puntual en la coordenada OZ, la desviación se reduce al 4,5%, y por esta razón, se decide que la influencia de las fundas, con respecto al resultado de la medición del punto-H, es despreciable y por ello se descarta inicialmente como posible causa del resultado obtenido en las mediciones experimentales de los prototipos.

❖ Seat Belt Reminder (SBR)

Siguiendo con el SBR, este elemento se coloca sobre los refuerzos de la estructura metálica, de tal manera que habrá tres dispositivos, uno para módulo o posición del ocupante en el asiento, una vez más, diferenciando entre los laterales (izquierdo y derecho) y el centro. De todos modos, como estos aparatos se sitúan debajo de la espuma, aparte de analizar su influencia sobre el punto-H siempre hay que tener en cuenta su funcionalidad, ya que se trata de dispositivos de seguridad. En el caso particular de los módulos exteriores, la propia espuma, tiene definido en su perfil dos cavidades (figura 59) que lo “absorben”.



Imagen 59. Cojín de la espuma con huecos para la posición de los SBR laterales (módulos 1 y 3). Izquierda: sin SBR – Derecha: con SBR)

Por el contrario, el SBR central no tiene definido ningún perfil en la espuma. Esto se debe a que el refuerzo para el dispositivo central y los refuerzos laterales se colocan de forma diferente. Uno se sitúa dentro de el propio refuerzo de la estructura metálica (el central) y los otros dos se asientan sobre dos sujeciones (los refuerzos del módulo lateral) que forman parte del marco metálico del asiento. En este último caso, el volumen del SBR que sobresale por encima de la cara superior de los refuerzos, queda recogido por la cavidad de la espuma del cojín en su disposición.

Cabe mencionar que estos elementos no se han incluido en la definición del diseño inicial por falta de datos y por el tamaño de los mismos, que en comparación con el resto de elementos, incluidos en el diseño del conjunto, son prescindibles.

En resumen, la altura de estos dispositivos es menor de un centímetro y su diámetro no llega a los tres centímetros. Son piezas muy pequeñas que a primera vista parecen tener influencia en la coordenada de la altura del punto-H del HPM, pero, debido a su colocación en los refuerzos, su localización debajo de la espuma y el bajo nivel de deformación en la simulación de elementos finitos en la zona correspondiente a la posición del SBR, también se descarta inicialmente como causa principal. Además, como se observa en las mediciones experimentales de los prototipos, la coordenada correspondiente a la altura tiene unos valores muy bajos que en ningún caso se solucionarían con la inclusión de este dispositivo en la simulación.

❖ Pedúnculos

Los pedúnculos son los elementos situados en el cojín del asiento donde se abrocha el cinturón de seguridad. Por obligación del estándar de medición del punto-H todas las medidas se deben realizar con la presencia de los mismos. Aunque, sí, se debe tener en cuenta el efecto

de los pedúnculos (principalmente en la coordenada *OX*), el factor influyente no es ninguna propiedad del componente, si no la propia posición de éstos en el asiento. Por esta razón no se han incluido como parámetro en la *Tabla 21*.

Las exigencias del fabricante indican que la medición debe realizarse con presencia de los pedúnculos. El problema de incluir los efectos que éstos provocan en una simulación (como la de elementos finitos que se ha llevado a cabo en el asiento inicial) es, que no sería una situación real. Es decir, la única influencia de estos elementos es sobre la colocación del HPM en el asiento. Por ello, el responsable de la medición es quien asegura que el HPM esté estacionado correctamente.

Así, la evaluación de los pedúnculos se realiza visualmente. Dicho de otra manera, se analiza observando la posición del HPM en cada una de los tres módulos del asiento. Se presta atención, a la hora de realizar la medición, si influyen de una manera negativa o positiva. Si lo es, de manera negativa, significa que se verá “rebotar” al HPM cuando es colocado sobre el asiento. Es decir, una vez posicionado correctamente, éste rectifica dejando espacio entre su propio contorno y el respaldo del asiento para dejar hueco al pedúnculo. Si no se observa este “rebote” en el HPM, no existe influencia en la medida. La forma de conseguir que el HPM no “rebote” es manipulando la posición física de los pedúnculos hasta que el HPM esté en la colocación correcta. No obstante, para garantizar que todas las mediciones se lleven a cabo sin influencia alguna de los pedúnculos, se remodela su establecimiento en el asiento de la nueva propuesta. Por supuesto, sin olvidar el cumplimiento de las normas de seguridad. Por todo lo anterior, se mantienen en el punto de mira de cara al nuevo diseño, pero se descartan como causa del valor inadmisibles del punto-H medido.

❖ **Espumas**

Por último, las espumas del cojín y respaldos son los componentes con más influencia debido a sus propiedades físicas, geometría, volumen y por supuesto, de ser la pieza principal que sujeta al HPM. Las espumas son el principal objeto de estudio puesto que, modificando una o alguna de sus características, el resultado final del punto-H puede verse drásticamente influenciado. También, contrario a lo mencionado previamente sobre la estructura metálica, las espumas hacen posible simples y rápidas modificaciones en su diseño, resultando en transformaciones en el conjunto final, que permiten una solución viable. El HPM se asienta

sobre estos elementos, encargados principalmente de la comodidad, sujeción y de facilitar una posición correcta para la seguridad del ocupante, primordialmente.

Para evaluar las espumas, se lleva a cabo un análisis de las propiedades principales, como la dureza, densidad y elasticidad, de las espumas utilizadas en los prototipos fabricados y empleadas en las mediciones experimentales. Una vez concluidos los análisis, se evalúan los resultados recogidos en las siguientes tablas:

Tabla 25. Mediciones de las propiedades de la espuma de cojín en los prototipos del diseño inicial

COJÍN		Resistencia a la compresión [kPa]		Densidad [kg/m ³]		Elasticidad [%]	
		Debería	Es	Debería	Es	Debería	Es
MÓDULO 1 (Derecha)	Central Zona 1	6,5 ±0,5	6,5	50,0 ±2,5	55,3	< 22	23,2
	Lateral Zona 2	10,0 ±0,7	9,9	50,0 ±2,5	55,1		
MÓDULO 2 (Centro)	Central Zona 1	6,5 ±0,5	6,4	50,0 ±2,5	57,9	< 22	23,2
MÓDULO 3 (Izquierda)	Central Zona 1	6,5 ±0,5	6,5	50,0 ±2,5	55,7	< 22	23,2
	Lateral Zona 2	10,0 ±0,7	10	50,0 ±2,5	55,1		

Tabla 26. Mediciones de las propiedades de las espumas de respaldo en los prototipos del diseño inicial

RESPALDO		Resistencia a la compresión [kPa]		Densidad [kg/m ³]	
		Debería	Es	Debería	Es
MÓDULO 1 (Derecha)	Frontal Zona 1	4,0 ±0,5	4,1	50,0 ±2,5	48
	Lateral Zona 2	9,0 ±0,6	9,1	50,0 ±2,5	47,7
MÓDULO 2 (Centro)	Frontal Zona 1	10,0 ±0,7	-	50,0 ±2,5	48
MÓDULO 3 (Izquierda)	Frontal Zona 1	4,0 ±0,5	-	50,0 ±2,5	48
	Lateral Zona 2	9,0 ±0,6	9	50,0 ±2,5	48

Primero, se observa que las durezas de las espumas, tanto en el cojín como en los respaldos, cumplen con los requisitos de diseño. Por otro lado, se observa que las densidades de las espumas cumplen las tolerancias en las de respaldo, no siendo así en el caso de la espuma del cojín. La densidad que, en realidad, tiene el elemento es mayor que la definida para el diseño no obstante la coordenada OZ resultante de las mediciones del punto-H sigue siendo muy baja. Por este motivo, habrá que estudiar las posibles modificaciones que contribuyan a la validación de las espumas y de los resultados de las mediciones numéricas que posteriormente deberán ser verificadas por las experimentales.

Por todo esto, se descarta el efecto de las espumas de respaldo pero no el de la espuma del cojín. Se estudian principalmente sus propiedades mecánicas. Asimismo, se tiene en cuenta la modificación geométrica del cojín para la posición de los pedúnculos y se barajan posibles mejoras con respecto al diseño inicial.

14.1. Tabla de resumen

Teniendo en cuenta estos análisis sobre los diferentes componentes y su posible influencia en la medición del punto-H, la realización de los estudios mencionados y los correspondientes resultados, se elabora una tabla de resumen para valorar las alternativas a crear. Para la elaboración de dicha tabla, primero se definen una serie de criterios y después, se evalúan afirmativa (con un ✓) o negativamente (con una X). En caso de que el efecto producido sea nulo se considera una evaluación positiva para simplificar la tabla. Los criterios utilizados son los siguientes:

- Criterio 1: dificultad de cualquier tipo de modificación en la pieza según fabricante y proveedor (geometría y material).
- Criterio 2: resultados en el estudio del elemento, con atención a las especificaciones de sus propiedades mecánicas.
- Criterio 3: geometría y/o posición del elemento en el diseño inicial.
- Criterio 4: influencia/deformación del elemento en los prototipos (con ayuda de la simulación de elementos finitos para mayor precisión). Si la deformación es considerable (en la escala con la que se trabaja) se evalúa como influencia negativa, de lo contrario, si la deformación es mínima o nula se evalúa como positiva.

En conclusión, se muestran los distintos elementos del asiento con sus posibles efectos en la medición del punto-H en la siguiente matriz de decisión:

Tabla 27. Tabla de resumen del análisis de alternativas para el diseño final

ELEMENTOS	Estructura metálica	Fundas	SBR	Pedúnculos	Espuma cojín	Espumas respaldo
Criterio 1	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Criterio 2	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Criterio 3	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Criterio 4	✓	✓	✓	✓	✗	✓
TOTAL (✗)	0	0	0	1	3	1

De esta manera se descartan por completo la estructura metálica, las fundas y los SBR. Por otro lado, se estudian los pedúnculos y las espumas, prestando una mayor atención a la espuma del cojín. Se proponen las modificaciones en la definición del nuevo diseño alternativo.

15. Diseño final

Para establecer el diseño final, se realizan modificaciones sobre el diseño inicial respetando la normativa y estándares mencionados con anterioridad.

El proceso de diseño se ha separado en las siguientes partes: diseño geométrico, definición de materiales y definición de cargas. Esto se debe a que el diseño final recoge características del diseño geométrico en CAD, y a su vez de la definición de materiales y cargas, elementos necesarios en la simulación por elementos finitos mediante ANSYS Workbench.

15.1. Diseño geométrico

En esta etapa del proceso de diseño se parte de la geometría del modelo inicial determinado previamente. Como se ha mencionado con anterioridad, las siguientes partes del asiento mantienen su geometría inicial: estructura metálica en su totalidad (tubos, refuerzos y placas), fundas, SBR, pedúnculos, y las espumas del respaldo. Entonces, la espuma del cojín es la pieza principal sobre la que realizar modificaciones. Se ha comentado que la geometría de los refuerzos no cambia, aunque, es cierto que si la geometría inferior del cojín se modifica, los

refuerzos deberán ajustarse al nuevo perfil del cojín ya que están en contacto directo y la función de dichos refuerzos es la de sujetar al cojín en la posición adecuada de diseño.

Dicho esto, las modificaciones establecidas en el cojín del diseño final y sus explicaciones son las siguientes:

- Reducir el espesor de la espuma en 6mm en la zona central/frontal de los módulos laterales y, en proporción, de la zona lateral de los lóbulos de sujeción del pasajero. Esta modificación se produce debido a que el resultado numérico de la coordenada OZ tiene un valor de ~6mm por encima del valor definido para el requisito del punto-SR en esta coordenada.
- Aumentar el espacio entre los módulos 1 y 2 (derecho y central) dedicado para la ubicación de los dos pedúnculos correspondientes a los dos cinturones de seguridad de dichos módulos. Esta modificación se produce para evitar que el HPM rebote en la medición del punto-H y así, evitar una medida errónea o no válida.
- Ajustar la cavidad definida en la parte inferior para adaptar la ubicación de los dispositivos SBR. Esta modificación se produce debido a los cambios de espesor de la espuma, para recolocar estos dispositivos en una posición correcta para garantizar su funcionalidad.

Es importante aclarar que el punto-SR no se modifica, de hecho sigue siendo punto de referencia para realizar las modificaciones correspondientes.

15.2. Definición de materiales

Los materiales elegidos para la estructura metálica y las espumas en el diseño final son los siguientes:

- *420 HSLA Steel*, para los perfiles tubulares.
- *ASTM A606 HSLA Steel*, para las placas del respaldo y las piezas de refuerzo.
- *PUR 50 no lineal*, para las espumas de respaldo.
- *PUR 60 no lineal*, para la espuma del cojín.

Se mantienen los materiales de la estructura metálica, ya que su geometría no ha necesitado modificaciones y se ha elegido seguir con el proveedor de dicha estructura metálica

del modelo de diseño inicial, por lo que, los materiales se mantienen como los definidos en la explicación del modelo inicial. Del mismo modo, las espumas de respaldo no sufren modificaciones y siguen siendo de *PUR 50*, con las mismas propiedades a las definidas inicialmente.

Por otro lado, se decide mantener el poliuretano para la espuma del cojín pero con distintas propiedades a las definidas originalmente. Las nuevas propiedades del material de la espuma del cojín, *PUR 60* no lineal, y sus explicaciones son las siguientes:

- Se aumenta la densidad de núcleo igual a 60 kg/m^3 . Esta modificación se debe a que las espumas del cojín de los prototipos tienen una densidad menor a 60 kg/m^3 y sus mediciones resultan en valores muy por debajo de los requisitos de diseño en la coordenada OZ. Es decir, aumentando la densidad se consigue mayor consistencia y menor deformación en el elemento, resultando en un valor de la coordenada OZ mas cercano a los requisitos de fabricante.
- Se define una mayor dureza en la parte central de los tres módulos modificando la formulación del material de poliuretano. La razón de esta modificación es la misma que en el caso anterior, se busca mayor consistencia en la parte central de los módulos para que el pasajero se posicione en la posición de diseño, es decir, con el punto de referencia establecido.

Se muestran los valores de las propiedades del material para la espuma del cojín del diseño final en la siguiente tabla:

- **Espuma del cojín**

Tabla 28. Densidad y dureza de la espuma del cojín en el diseño inicial

LATERAL	Densidad [kg/m ³]	
		60,0 ± 3,5
	Resistencia a la compresión [kPa]	
	Centro	7,5 ± 0,5
	Lóbulos	10,0 ± 0,7
CENTRAL	Densidad [kg/m ³]	
		60,0 ± 3,5
	Resistencia a la compresión [kPa]	
		7,5 ± 0,5

Es verdad que, al aumentar la densidad de la espuma, su peso también lo hace. Esto hace que el peso total del vehículo también aumente. Para buscar una manera de equilibrar esto, se ha elegido reducir el volumen de la misma con la reducción de espesor previamente comentada. Todo esto respetando los niveles de confort y durabilidad.

Una vez definidas la densidad y dureza de la espuma del cojín, se define el modelo Neo-Hookeano para este sólido de material hiperelástico con comportamiento no lineal de tensión-deformación. Los ensayos generales realizados en una muestra del material PUR, con las mismas propiedades que el utilizado para el asiento, definen el modelo de Neo-Hookean. Para ilustrar este comportamiento se ensayan varias pruebas en una muestra del material, definiendo así su comportamiento no lineal.

Tabla 29. Propiedades del material PUR 60 necesarias para definir el modelo Neo-Hookeano (no lineal)

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	60	kg m ⁻³
Uniaxial Test Data	Tabular	
Biaxial Test Data	Tabular	
Shear Test Data	Tabular	
Neo-Hookean		
Initial Shear Modulus Mu	2,6609E+06	Pa
Incompressibility Parameter D1	0	Pa ⁻¹

El modelo Neo-Hookean de este material detalla la siguiente gráfica Tensión-Deformación:

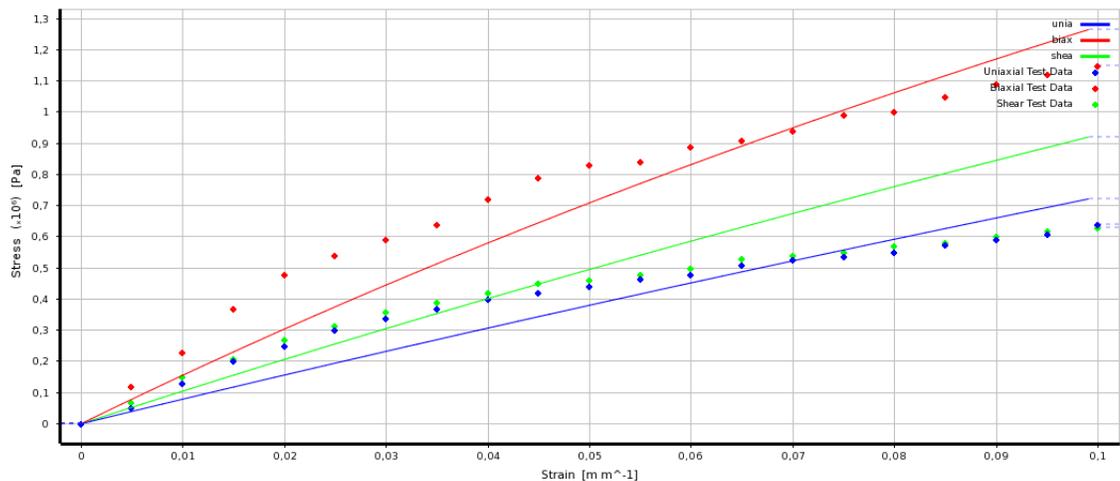


Imagen 60. Modelo Neo-Hookean del material PUR 60

De igual manera, se muestran los datos experimentales de dichos ensayos en las tablas y se visualizan en las gráficas siguientes:

- Ensayo 1: *Uniaxial Test Data*

Strain (m m ⁻¹)	Stress (MPa)
0	0
0,005	0,05
0,01	0,13
0,015	0,2
0,02	0,25
0,025	0,3
0,03	0,34
0,035	0,37
0,04	0,4
0,045	0,42
0,05	0,44
0,055	0,465
0,06	0,48
0,065	0,51
0,07	0,525
0,075	0,535
0,08	0,55
0,085	0,575
0,09	0,59
0,095	0,61
0,1	0,64

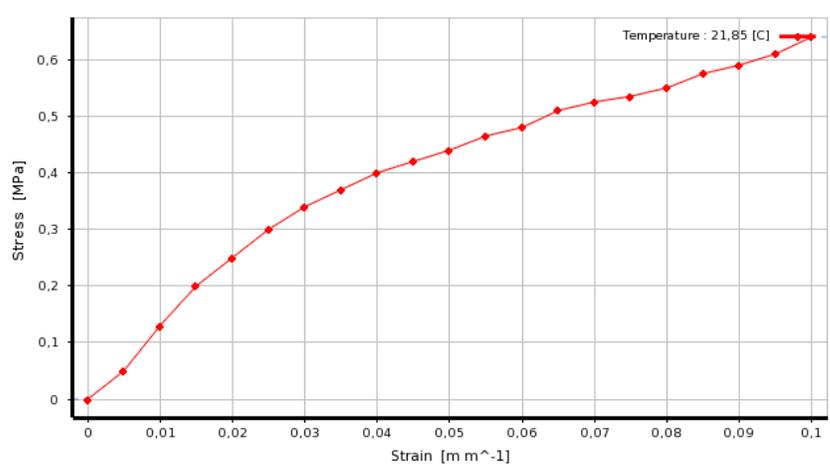


Imagen 61. Tabla de valores y gráfica del ensayo 1: *Uniaxial Test Data* del material PUR 60 no lineal

- Ensayo 2: *Biaxial Test Data*

Strain (m m ⁻¹)	Stress (MPa)
0	0
0,005	0,12
0,01	0,23
0,015	0,37
0,02	0,48
0,025	0,54
0,03	0,59
0,035	0,64
0,04	0,72
0,045	0,79
0,05	0,83
0,055	0,84
0,06	0,89
0,065	0,91
0,07	0,94
0,075	0,99
0,08	1
0,085	1,05
0,09	1,09
0,095	1,12
0,1	1,15

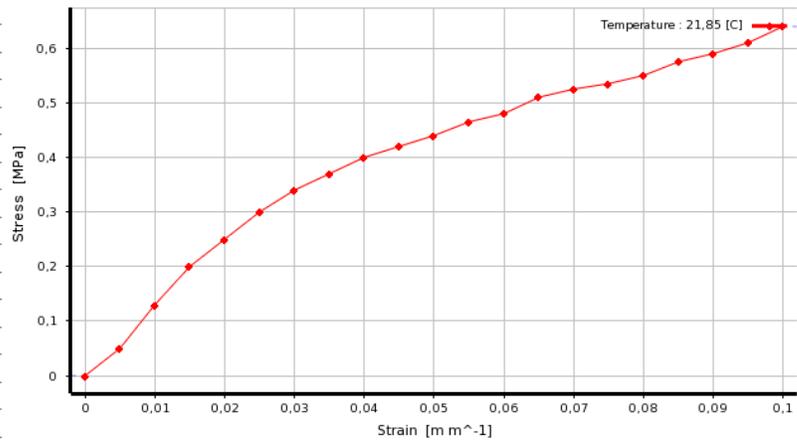


Imagen 62. Tabla de valores y gráfica del ensayo 2: *Biaxial Test Data* del material PUR 60 no lineal

- Ensayo 3: *Shear Test Data*

Strain (m m ⁻¹)	Stress (MPa)
0	0
0,005	0,07
0,01	0,15
0,015	0,21
0,02	0,27
0,025	0,315
0,03	0,36
0,035	0,39
0,04	0,42
0,045	0,45
0,05	0,46
0,055	0,48
0,06	0,5
0,065	0,53
0,07	0,54
0,075	0,55
0,08	0,57
0,085	0,58
0,09	0,6
0,095	0,62
0,1	0,63

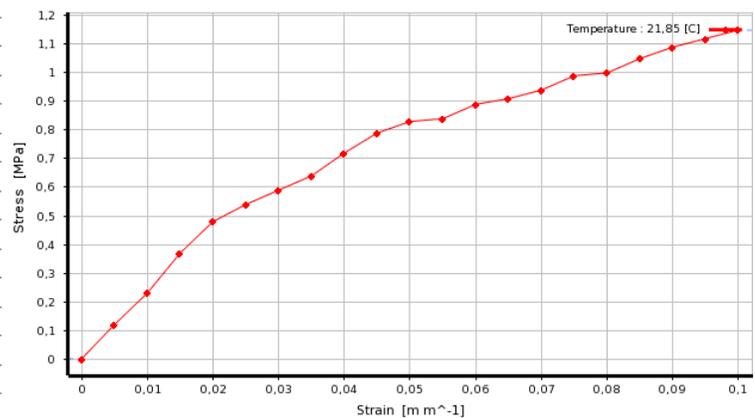


Imagen 63. Tabla de valores y gráfica del ensayo 3: *Shear Test Data* del material *PUR 60 no lineal*

15.3. Definición de cargas

En este apartado no se realiza ningún cambio con respecto a lo establecido en el modelo inicial. Por ello la carga sigue siendo de -750N en la dirección vertical, como la indicada inicialmente en la imagen 20.

Al modificar la espuma del cojín se definen de nuevo los contactos del HPM con cada módulo del asiento en el modelo final, obteniendo el siguiente resultado mostrado en el cojín. El área de contacto en el módulo central es distinto al establecido en los módulos laterales debido a la geometría específica de dicho módulo.



Imagen 64. Contacto del HPM con el cojín del asiento final en los tres módulos del mismo

15.4. Resultados numéricos

La medición del punto-H se realiza ahora sobre el modelo del diseño final. Para éste, como se ha mencionado antes, se ha elegido la estructura metálica definida en el modelo inicial compuesta por dos perfiles tubulares, cinco piezas de refuerzo y dos placas de respaldo. Los tubos son del material *420 HSLA Steel* y los refuerzos y placas del material *ASTM A606 HSLA Steel*. Para las espumas se ha elegido un cojín completo y dos respaldos, uno del 40 por ciento y otro del 60 por ciento. El material elegido para todas ellas es el poliuretano, para las espumas de respaldo con densidad 50 kg/m^3 y para la espuma del cojín con densidad 60 kg/m^3 .

Como ya se ha explicado, el asiento trasero tiene tres módulos para un total de tres ocupantes. De nuevo, la medición del punto-H se ensaya para un único pasajero en cada posición, como obliga la normativa. Así, se realizan tres simulaciones: con el ocupante situado en el módulo 1 (lateral derecho), después en el módulo 2 (centro) y por último en el módulo 3 (lateral izquierdo). La única diferencia en cada simulación es la colocación de la carga, teniendo que ser coincidente con la posición del HPM y el módulo correspondiente en cada medida específica. Con la experiencia de las simulaciones anteriores, para la realización de las mediciones numéricas del modelo final se importan únicamente las partes del asiento del grupo del 100% (tubos, refuerzos y espuma del cojín) mostradas en la siguiente figura.

Geometry

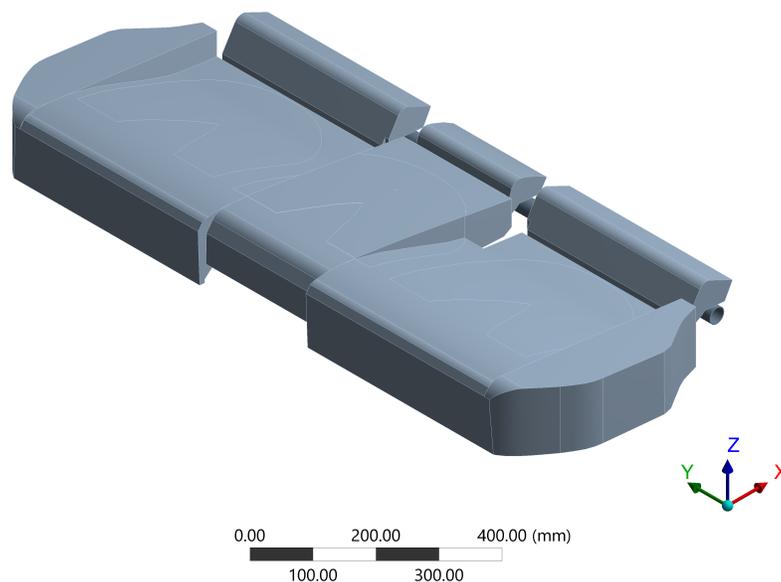


Imagen 65. Modelo final del asiento parcial a simular

Una vez elegido el método de análisis estructural estático (*Static structural*), se importa la geometría del diseño final. De nuevo, como el asiento cuenta con formas, redondeos, y cavidades con geometrías difíciles, éstas se simplifican para no exigir un coste computacional excesivo al programa. En este caso, solo hace falta simplificar la espuma del cojín, ya que el resto de elementos se mantienen iguales que la simplificación realizada en el diseño inicial previo. Dicho esto, el modelo de diseño final simplificado, y utilizado para la simulación de la medición numérica del punto-H tiene las siguientes características en su etapa de pre-proceso en la simulación de *ANSYS Workbench*.

Después, se definen los materiales siguiendo las pautas mencionadas inicialmente. En la simulación del asiento parcial, éste se compone únicamente por los tubos, refuerzos, y el cojín de la espuma. Así, los materiales necesarios a definir en el programa son los tres siguientes:

- *420 HSLA Steel*, para los perfiles tubulares.
- *ASTM A606 HSLA Steel*, para las placas del respaldo y las piezas de refuerzo.
- *PUR 60 no lineal*, para la espuma del cojín.

El siguiente paso, establecer los contactos. Se listan de nuevo los contactos necesarios, aunque no varían de los ya señalados en las mediciones numéricas del modelo inicial. La única diferencia con el modelo inicial es que en el modelo final no hace falta definir los contactos con referencia al respaldo ya que no está incluido en el conjunto de la simulación. Así, los contactos a definir son los siguientes:

- Contacto espuma cojín-refuerzos (como el mostrado en la imagen 34)
- Contacto refuerzos-tubos (como el mostrado en la imagen 35)

Con respecto al mallado del modelo final se sigue el mismo proceso antepuesto. Aunque en este caso, al contar solo con una parte del asiento, es decir, con el cojín (tubos, refuerzos y espuma), se permite afinar la malla. Con la finalidad de obtener mejores resultados en las mediciones realizadas sobre el modelo sin aumentar exageradamente el coste computacional de la simulación. Asimismo, se utiliza el mallado automático para cuerpos *Sweepable* en refuerzos y tubos. Por otro lado, se modifica el refinado del mallado de la espuma del cojín a uno mayor que el definido en el modelo inicial. Por último, en la cara de contacto teórica del HPM con el cojín, se refina su mallado lo máximo permitido para que la simulación pueda realizarse, es decir, que no exceda el límite de nodos y elementos admitidos por el software de

simulación. Una vez más, teniendo que cambiar esta zona de refinado dependiendo del módulo del asiento que se vaya a simular.



Imagen 66. Mallado del modelo de asiento final

Para comprobar que el mallado es correcto, es decir, que los cuerpos del conjunto estén suficientemente simplificados a elementos y nodos que permitan un resultado coherente y válido, se evalúa la calidad de la malla por *Skewness*. Este método se elige para el estudio de la calidad de malla por los motivos explicados en la definición del diseño inicial.

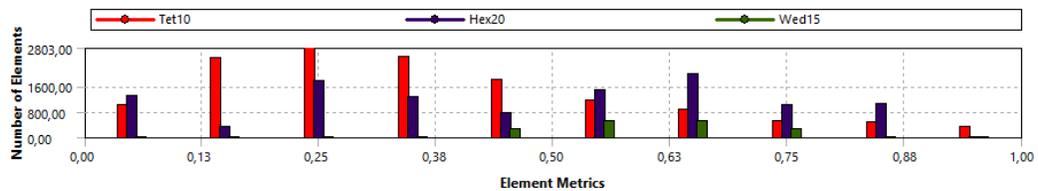


Imagen 67. Gráfica del valor de *Skewness* de medida de calidad del mallado del modelo final

En la gráfica anterior, se relaciona el numero y tipo de elementos de la malla con la calidad de dichos elementos, calificada del 0 al 1, siendo el 0 lo mejor. Se distinguen principalmente los elementos formados por tetraedros (en rojo) de los formados por hexaedros (en morado), y también se muestran los elementos cuña o piramidales (en verde) que son minoritarios. La mitad izquierda de la gráfica indica que hay un número mayor de elementos mallados con formas tetraédricas que hexaédricas, y aunque los elementos formados por tetraedros son menos eficientes que los formados por hexaedros, resulta en una calidad de malla buena con un valor medio de *Skewness* igual a 0,38. De la tabla 10 el valor queda en el rango determinado como buen resultado. Cabe observar que el resultado de la calidad de malla en este modelo es levemente mejor al obtenido en el inicial, lo que seguramente queda reflejado positivamente en los resultados. Repitiendo lo anterior, no es posible obtener un valor

de calidad de malla mejor, ya que, si se refina todavía más la malla, se ve claro, que el valor de *Skewness* será menor, pero el coste computacional será mayor del permitido por el programa para realizar la simulación.

El siguiente paso es la definición de los soportes del asiento. A modo de recordatorio, el asiento va fijado sobre dos carriles que encarrilan con la carrocería del coche. Estos carriles van unidos a los perfiles tubulares descritos en la geometría del asiento, por esta razón, los tubos son los soportes fijos del asiento. Así, se restringen los posibles desplazamientos y giros de ambos cuerpos (los dos tubos). Como la geometría del cojín se ha modificado se muestran los nuevos contactos, que por enunciación son iguales a los establecidos en el modelo inicial, en las siguientes ilustraciones:

A: Asiento parcial DISEÑO FINAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 40%
Fixed Support
Time: 1. s

■ Fixed Support

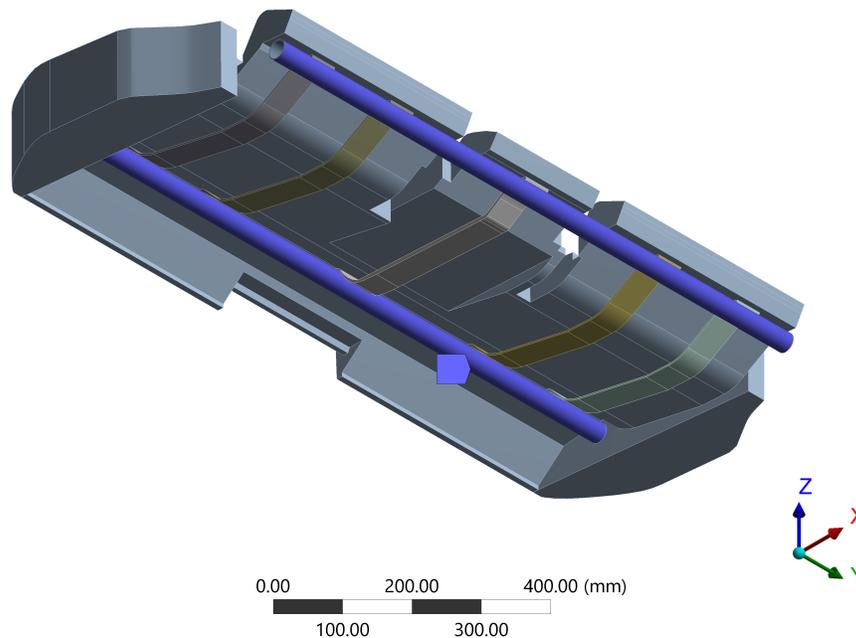


Imagen 68. Soporte fijo – Perfiles tubulares en el modelo final

Por otro lado, el cojín del asiento va encajado en sus laterales. De modo que, el soporte elegido ya no puede ser un soporte fijo si no que debe ser un soporte sin fricción. Se definen entonces dos soportes sin fricción que impiden el movimiento o giro en la dirección normal del elemento en cuestión. El primero de ellos se establece en las caras que tienen contacto con el banco incrustado en la carrocería del vehículo. El segundo, se define por el contacto del cojín

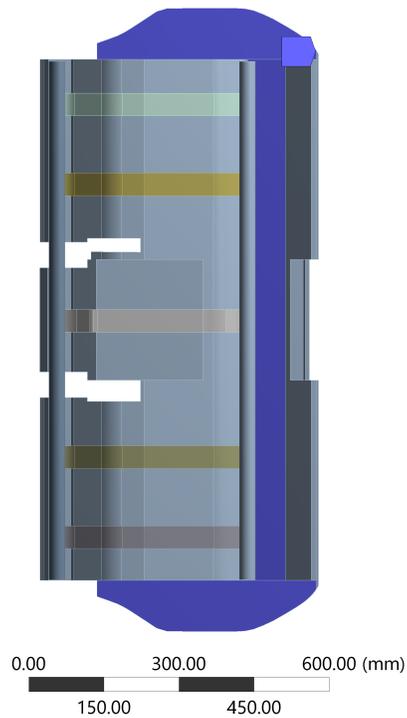
con parte del interior de las puertas del vehículo. Para mayor información se incluyen imágenes de dichos soportes en orden de aparición en la explicación.

A: Asiento parcial DISEÑO FINAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 40%

Frictionless Support

Time: 1. s

Frictionless Support

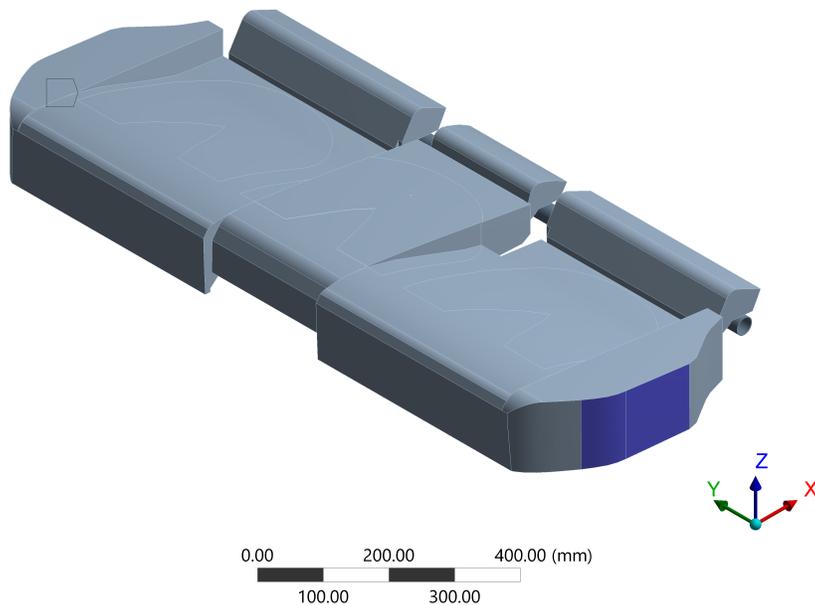


A: Asiento parcial DISEÑO FINAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 40%

Frictionless Support 2

Time: 1. s

Frictionless Support 2



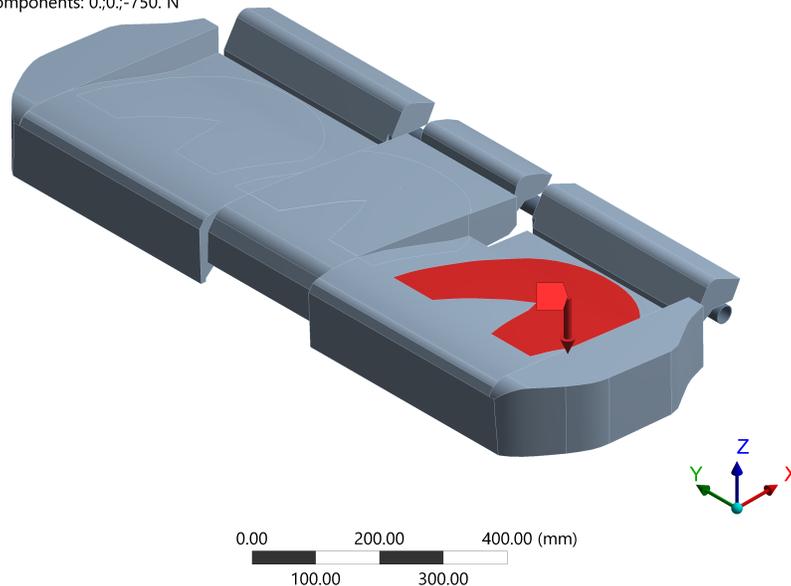
Soportes sin fricción – Cojín en la parte posterior y (a ambos lados) en sus laterales en el modelo final

Para terminar, se definen las cargas. Como se ha mencionado en repetidas ocasiones, la única carga aplicable en este ensayo es la de un HPM de percentil 95, que resulta en una fuerza en la dirección OZ de -750N. Simplemente, se define semejante fuerza en cada posición del HPM en el asiento, en cada uno de los tres módulos (posición izquierda, central y derecha).

A: Asiento parcial DISEÑO FINAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 40%

Force
Time: 1. s

Force: 750. N
Components: 0.;0.;-750. N



C: Asiento parcial DISEÑO FINAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - 60%

Force
Time: 1. s

Force: 750. N
Components: 0.;0.;-750. N

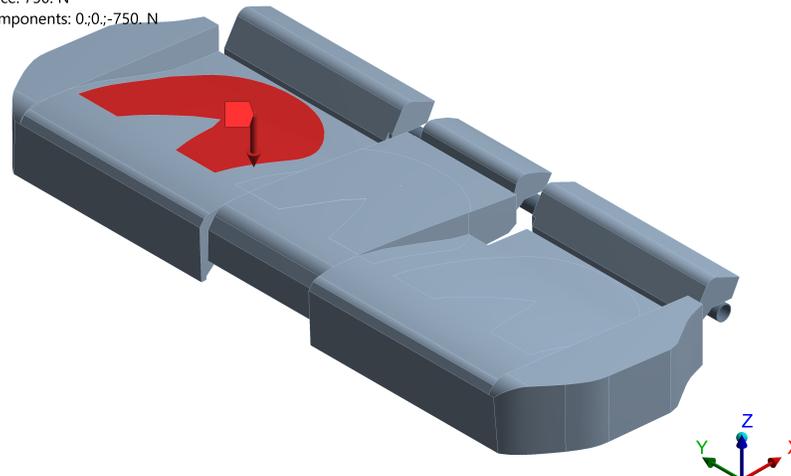


Imagen 69. Definición de la carga del HPM en el módulo 1 (izda.) y 3 (dcha.) del asiento en el modelo final

B: Asiento parcial DISEÑO FINAL - Hiperelástico - Neo-Hookean - Centro
Force
Time: 1. s

Force: 750. N
Components: 0;0;-750. N

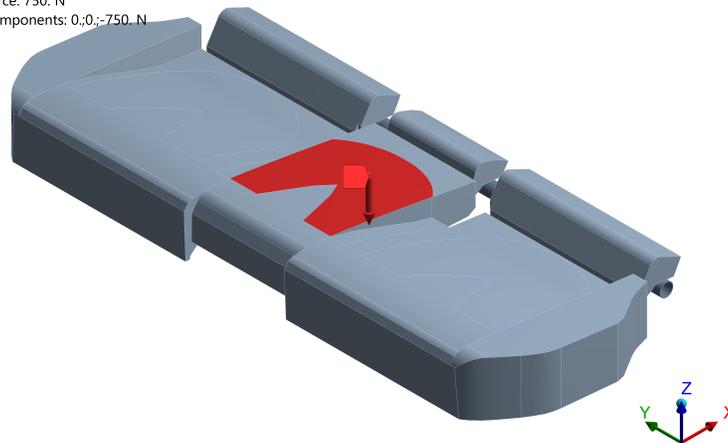


Imagen 70. Definición de la carga del HPM en el módulo 2 del asiento en el modelo final

Definidas así, las características específicas del pre-proceso del estudio, se resumen los resultados obtenidos de nombradas simulaciones en la tabla que se muestran a continuación, donde se comparan los valores establecidos del punto-SR con los resultados de la simulación a los que se denomina como punto-H.

Para entender los resultados, se explica de nuevo como se determinan los resultados numéricos finales del punto-H. Primero, el punto-SR, establecido por el fabricante, se ha proyectado sobre el cojín del asiento, facilitando así un punto concreto sobre el que realizar la medida. El punto-SR se ubica por encima del cojín del asiento y delante de las espumas del respaldo, en un espacio donde no hay contacto con ningún elemento del asiento, ya que es el lugar que ocupa el pasajero. El programa *ANSYS Workbench* calcula automáticamente la coordenada, según el sistema de referencia 3-D del vehículo establecido, del punto concreto definido. Se obtiene como resultado los tres valores para coordenada (x, y, z) del punto-H proyectado. Con las coordenadas OX y OY no hay ningún problema, ya que la proyección del punto-SR solo afecta a la coordenada OZ del punto-H medido por el programa. Es decir, para obtener la coordenada OZ real del punto-H medido en la simulación, es necesario sumar a este valor la distancia que existe entre el punto-SR y la superficie del cojín en vertical. Estas distancias se miden en el CAD del modelo del diseño final, teniendo en cuenta que el punto de referencia es distinto en los módulos laterales que en el modulo central, se requieren las dos distancias.

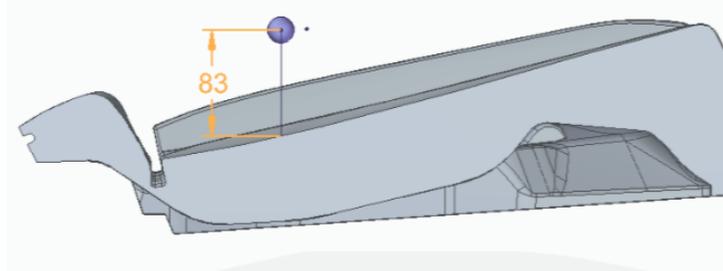


Imagen 71. Distancia en OZ del punto-SR lateral a la superficie del cojín del modelo final (módulos 1 y 3) – Vista de corte

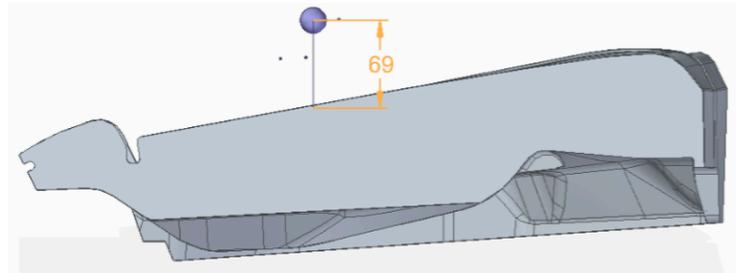


Imagen 72. Distancia en OZ del punto-SR central a la superficie del cojín del modelo final (módulo 2) – Vista de corte

En resumen, es necesario sumar a la coordenada OZ calculada por ANSYS Workbench, el valor de la distancia vertical entre el punto-SR y la superficie del cojín específica para cada módulo del asiento. En el caso de los módulos laterales se suman 83mm y el módulo central 69mm.

- **Resultados del asiento parcial (sin respaldo)**

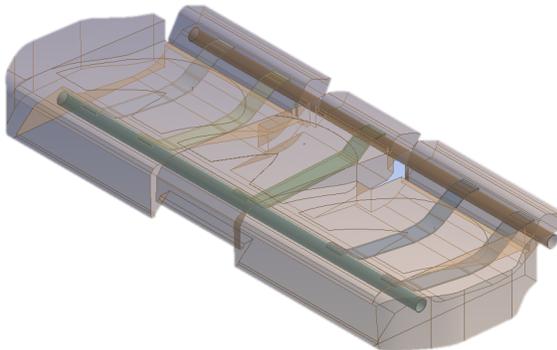


Imagen 73. Geometría del asiento parcial (sin respaldo) del modelo final utilizada en la simulación con ANSYS Workbench

Se realizan las tres simulaciones, una en cada módulo, obteniendo los resultados medidos por el programa de la proyección del punto-H indicados en las siguientes imágenes. Como añadido a las imágenes, se plasman las mediciones numéricas en una tabla de forma más clara. Seguidamente, se muestra otra tabla con los resultados reales del punto-H después de sumarles los valores correspondientes, previamente mencionados y señalados en las imágenes 71 y 72.

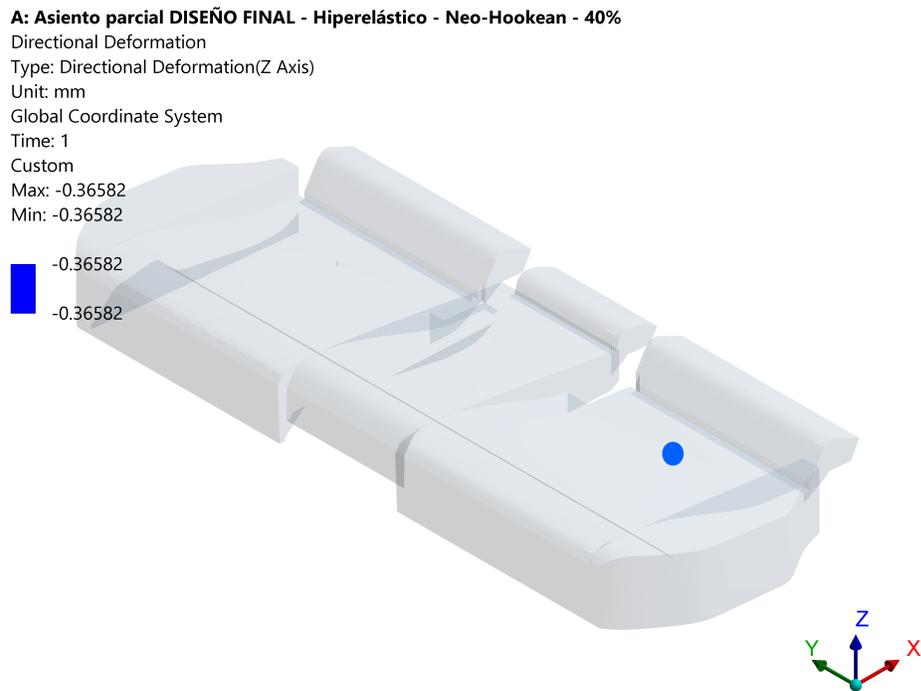


Imagen 74. Resultado numérico de la proyección del punto-H en ANSYS Workbench del módulo 1. Asiento parcial final (sin respaldo)

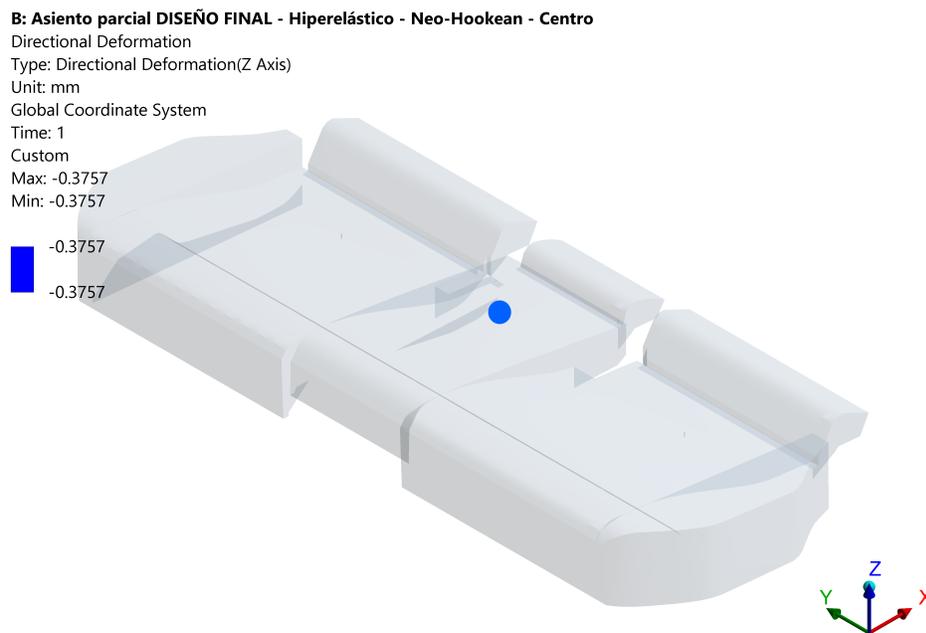


Imagen 75. Resultado numérico de la proyección del punto-H en ANSYS Workbench del módulo 2. Asiento parcial final (sin respaldo)

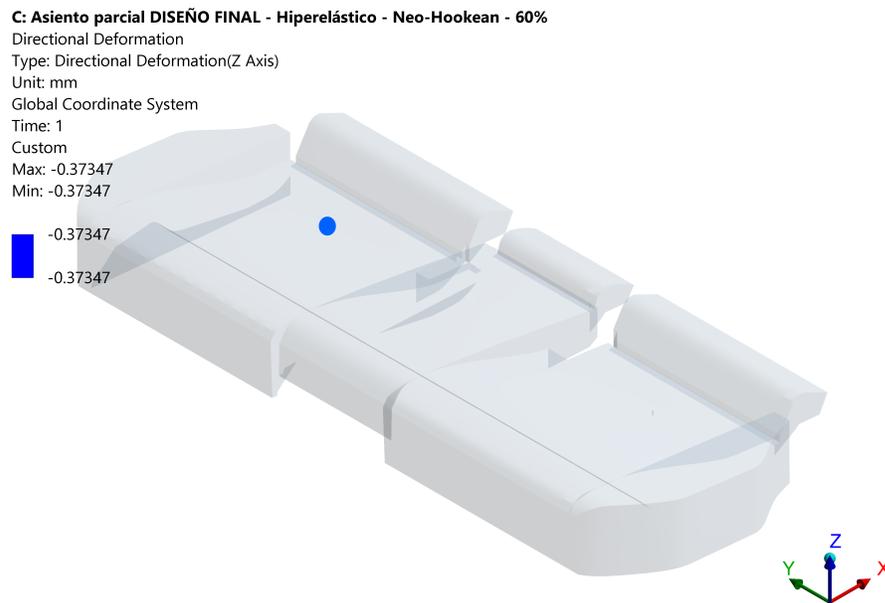


Imagen 76. Resultado numérico de la proyección del punto-H en ANSYS Workbench del módulo 3. Asiento parcial final (sin respaldo)

Las coordenadas de la proyección del punto-H mostradas en las imágenes anteriores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 30. Resultados numéricos de la proyección del punto-H en el asiento parcial final (sin respaldo)

Módulo	Valor (mm)	Posición X	Posición Y	Posición Z
1 (40%)	0,37268	2055,40	-347,10	253,30
2 (Centro)	0,37939	2029,90	2,00	299,60
3 (60%)	0,37966	2056,00	352,60	253,20

Entonces, los resultados numéricos del punto-H real en el asiento parcial del modelo final (sin respaldo) son las expuestas en la siguiente tabla:

Tabla 31. Resultados numéricos del punto-H real en el asiento parcial final (sin respaldo)

		Punto-SR (mm)	Punto-H (mm)	Desviación
Módulo 1 (Derecha)	X	2055	2055,4	+0,4
	Z	336	336,3	+0,3
	Y	-350	-347,1	+2,9
Módulo 2 (Centro)	X	2029	2029,9	+0,9
	Z	366	368,6	+2,6
	Y	0	2	+2
Módulo 3 (Izquierda)	X	2055	2056	+1
	Z	336	336,2	+0,2
	Y	350	352,6	+2,6

Obteniendo así un resultado que cumple los criterios establecidos, se procede a la fabricación de prototipos para la medida del punto-H experimental.

15.5. Mediciones experimentales

La muestra elegida para el análisis experimental, con el modelo final constituido, es de tres prototipos. Esta muestra es menor que la del modelo inicial por limitaciones temporales del proyecto. Todos los prototipos están contruidos con la misma serie de piezas, obtenidas de los mismos proveedores y ensamblados en la planta por el equipo responsable del proyecto. Una vez formados los prototipos se llevan a la sala del punto-H para realizar las mediciones correspondientes. Como se ha comentado con anterioridad, el método de medición del punto-H sigue la aplicación a la norma *ISO 6549*, en concreto, con atención a los estándares definidos por el fabricante en el *ECE: ECE-R 17*. Este estándar provee especificaciones e instrucciones para la utilización del HPM para realizar la medición adecuadamente. El maniquí utilizado es de percentil 95 y esta regulado por la *SAE J826*. Además, el software de medición específico para este tipo de controles, y por ello el utilizado, es el *FAROArm* y *FAROScanArm* (instrumentos de medición de contacto y ópticos).

Una vez realizadas las mediciones en los tres módulos de los tres prototipos, se recogen los resultados del punto-H en una tabla. El color verde indica que el valor medido del punto-H entra dentro del rango de tolerancias del punto-SR. Por otro lado, el color rojo indica lo contrario, indica que el valor medido del punto-H no cumple con las tolerancias del punto-SR establecido.

Tabla 32. Mediciones experimentales del punto-H en los prototipos del diseño final

		Punto-SR (mm)	PROTOTIPOS			Desviación máx.
			Punto-H (mm)			
			Nº 11	Nº 12	Nº 13	
Modulo 1 (Derecha)	X	2055	2055	2055,5	2055,9	+0,9
	Z	336	334,8	335,3	334,7	-1,3
	Y	-350	-348	-347,1	-347,6	+2,9
Modulo 2 (Centro)	X	2029	2030,1	2030,7	2030	+1,7
	Z	366	370,3	370,4	369,9	+4,4
	Y	0	2,2	2,6	2,5	+2,6
Modulo 3 (Izquierda)	X	2055	2056,5	2056,1	2056,6	+1,6
	Z	336	334,5	335,2	334,4	-1,6
	Y	350	352,9	352,6	352,1	+2,9

Como se puede observar en los resultados anteriores todas las coordenadas de las mediciones del punto-H son válidas. Con mayores o menores desviaciones todas las coordenadas cumplen con los valores requisito del fabricante.

15.6. Análisis de resultados

Se separan los resultados en los tres módulos del asiento: lateral derecho, centro y lateral izquierdo, o lo que es lo mismo, módulo 1, 2, y 3, respectivamente. Después, se comparan paralelamente los resultados obtenidos numéricamente del modelo del asiento con los medidos experimentalmente en los prototipos, y ambos se contrastan con el punto-SR de referencia establecido por el fabricante.

➤ Módulo 1 (asiento lateral derecho)

Tabla 33. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 1 del diseño final

		Punto-SR (mm)	RESULTADOS NUMÉRICOS Punto-H (mm)	MEDICIONES EXPERIMENTALES		
				PROTOTIPOS		
Módulo		Punto-SR (mm)	Punto-H (mm)	Punto-H (mm)		
				Nº 11	Nº 12	Nº 13
1	X	2055	2055,4	2055	2055,5	2055,9
	Z	336	336,3	334,8	335,3	334,7
	Y	-350	-347,1	-348	-347,1	-347,6

En este caso la simulación por ordenador muestra que la coordenada OX queda por encima de la coordenada del punto-SR pero, casi iguala su valor. Esto significa que el ocupante se posiciona un poco más alejado del conductor de lo inicialmente diseñado según el sistema de referencia 3-D del vehículo establecido. En el caso de la coordenada OZ, pasa lo mismo, situando al pasajero mínimamente a una cota mas alta de la diseñada. Por ultimo, en la coordenada OY, se observa una desviación mayor que en los otros dos valores pero a su vez válida. Ésta indica que el pasajero queda situado más hacia el centro del asiento.

La similitud de los resultados numéricos con los valores de las mediciones experimentales de los prototipos es evidente. Esto indica que se ha logrado un punto-H dentro de los requisitos de tolerancia del punto-SR. Con una particularidad con respecto al caso inicial, en el caso puntual de la coordenada OZ se ha conseguido validar el diseño, dado que en estas

mediciones sus resultados cumplen perfectamente con los requisitos de tolerancia. Con este dicho, se puede dar por válido el diseño del asiento en este módulo.

➤ Módulo 2 (asiento central)

Tabla 34. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 2 del diseño final

Módulo			Punto-SR (mm)	RESULTADOS NUMÉRICOS	MEDICIONES EXPERIMENTALES		
					PROTOTIPOS		
			Punto-H (mm)	Punto-H (mm)			
				Nº 11	Nº 12	Nº 13	
2	X	2029	2029,9	2030,1	2030,7	2030	
	Z	366	366,6	370,3	370,4	369,9	
	Y	0	2	2,2	2,6	2,5	

En el caso del asiento central, en el resultado del punto-H numérico se obtienen casi los mismos valores que los del punto de referencia diseñado. Sólo existe una pequeña desviación de dos milímetros, en la coordenada OY, que indica la posición del pasajero hacia la derecha.

Las mediciones experimentales se asemejan a los resultados numéricos, principalmente en las coordenadas OX y OY. En los prototipos, el pasajero se posiciona más alejado del conductor y un poco hacia la derecha que en lo determinado por la simulación computacional. En el caso de la coordenada OZ, los valores se distancian considerablemente situando al ocupante a una altura mayor de la definida por el fabricante. De todas formas, todos los prototipos cumplen con éxito con las tolerancias establecidas y se puede dar por válido el diseño del asiento en este módulo.

➤ Módulo 3 (asiento lateral izquierdo)

Tabla 35. Comparación de resultados numéricos y experimentales en el módulo 3 del diseño final

Módulo			Punto-SR (mm)	RESULTADOS NUMÉRICOS	MEDICIONES EXPERIMENTALES		
					PROTOTIPOS		
			Punto-H (mm)	Punto-H (mm)			
				Nº 11	Nº 12	Nº 13	
3	X	2055	2056	2056,5	2056,1	2056,6	
	Z	336	336,2	334,5	335,2	334,4	
	Y	350	352,6	352,9	352,6	352,1	

En este ultimo caso, se pueden repetir las conclusiones expuestas en el caso del módulo 1. Con la única excepción de que en este módulo, en la coordenada OY, el pasajero queda más alejado del centro del asiento que en caso del módulo derecho. Con esto, también se puede dar por valido el diseño del asiento en este módulo.

15.7. Valoraciones finales

Se observa que los resultados numéricos y las mediciones experimentales en los tres módulos del asiento cumplen con los requisitos establecidos por el fabricante. Como existe cierta diferencia entre ambos valores se elabora un estudio de las propiedades físicas del material de la espuma. Esto se debe a que en los primeros prototipos construidos con el plano inicial, las características de diseño de la espuma del cojín no cumplían con los requisitos establecidos. Dicho esto, se estudian las durezas, densidades, y propiedades de elasticidad de las diferentes zonas y módulos de los prototipos de diseño final montados.

Tabla 36. Mediciones de las propiedades de la espuma de cojín en los prototipos del diseño final

COJÍN		Resistencia a la compresión [kPa]		Densidad [kg/m ³]		Elasticidad [%]	
		Debería	Es	Debería	Es	Debería	Es
MODULO 1 (Derecha)	Central Zona 1	7,5 ±0,5	7,4	60,0 ±2,5	59,7	< 22	21,6
	Lateral Zona 2	10,0 ±0,7	10,4	60,0 ±2,5	59,9		
MODULO 2 (Centro)	Central Zona 1	7,5 ±0,5	7,4	60,0 ±2,5	62,2	< 22	21,6
MODULO 3 (Izquierda)	Central Zona 1	7,5 ±0,5	7,3	60,0 ±2,5	59,4	< 22	21,6
	Lateral Zona 2	10,0 ±0,7	10,5	60,0 ±2,5	59,9		

Esta vez las propiedades de la espuma del cojín cumplen con las tolerancias permitidas. En el diseño inicial los requisitos de densidad y elasticidad superaban los límites establecidos. Contrariamente, en el diseño final se han respetado las características del modelo y se han plasmado correctamente en la construcción del prototipo. Entonces, se valida el diseño final propuesto para el asiento.

Como las espumas de los respaldos no han sufrido modificaciones con respecto al diseño inicial, no se repite el estudio de propiedades, validadas inicialmente.

Para asegurar que el comportamiento de la estructura metálica sigue cumpliendo los requisitos y tolerancias se realiza, de nuevo, un estudio mediante el MEF sobre la estructura. Se evalúan las posibles deformaciones de la estructura metálica y las tensiones que resiste, comprobando que no se produzca el fallo. La simulación a realizar consiste en estudiar la influencia del HPM sobre el marco metálico. Se pretenden observar las deformaciones y las tensiones cuando se aplica una fuerza equivalente al peso de un maniquí de percentil 95.

Para mayor facilidad de visualización, se resumen los datos de las deformaciones de las siguientes tres imágenes en una tabla:

Tabla 37. Resumen de las deformaciones de la estructura metálica en ANSYS Workbench de los tres módulos del asiento en el diseño final

	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3
Deformación en OZ (mm)	0,29	0,21	0,29

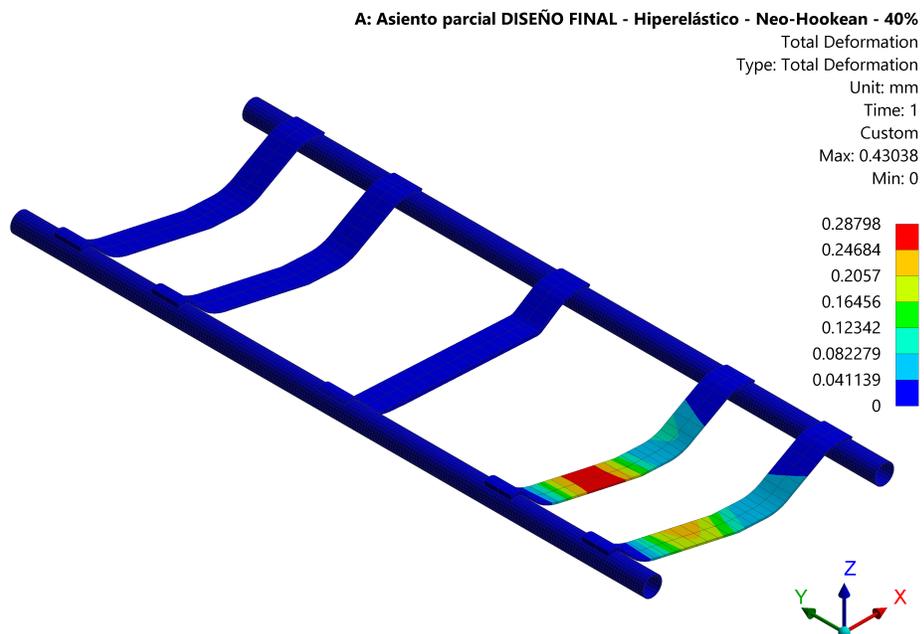


Imagen 77. Deformación en OZ de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 1 – Diseño final

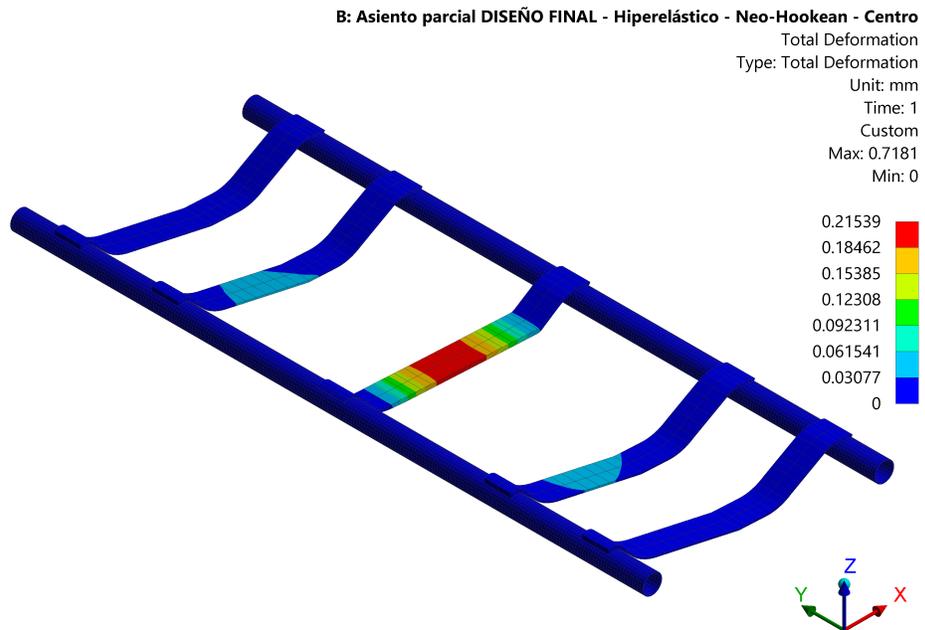


Imagen 78. Deformación en OZ de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 2 – Diseño final

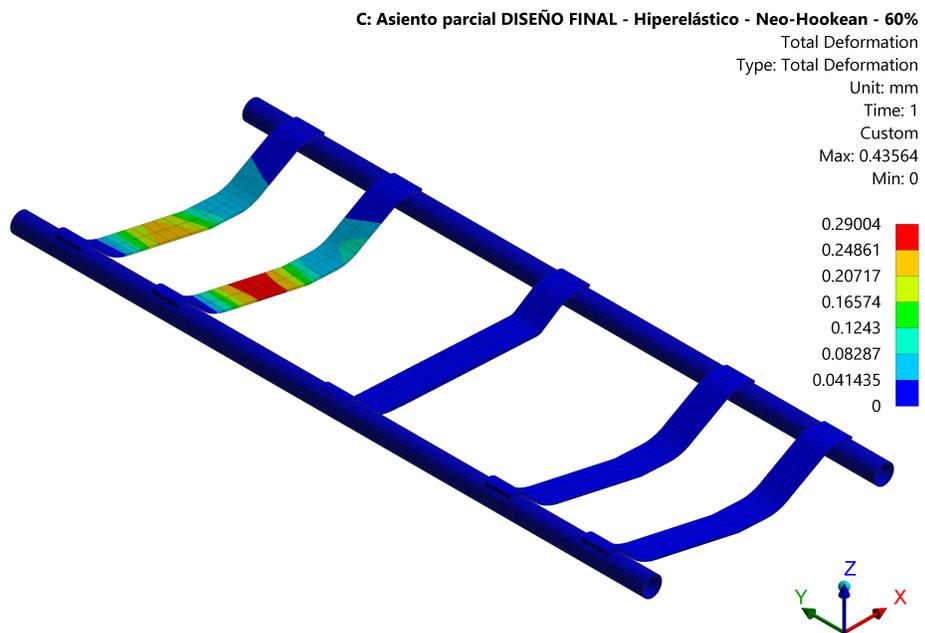


Imagen 79. Deformación en OZ de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 3 – Diseño final

Las deformaciones de los tres módulos se concentran en los refuerzos, se consideran despreciables ya que sus valores son casi nulos, e igualmente, se ajustan a las características de alta resistencia correspondientes a este material para soportar las cargas. Se puede observar que las deformaciones son ciertamente superiores a las del diseño inicial. Esto se debe a que al reducir el espesor de la espuma ésta absorbe menos esfuerzos y tienen que ser compensados por la resistencia de la estructura metálica. Demostrada que la deformación de la estructura metálica es intrascendente, se comprueba el estado tensional de la estructura.

Para mayor facilidad de visualización, se resumen los datos de las tensiones de Von Mises de las siguientes tres imágenes en una tabla:

Tabla 38. Resumen de las tensiones de Von Mises de la estructura metálica en ANSYS Workbench de los tres módulos del asiento en el diseño final

	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3
Tensión de Von Mises (MPa)	37,2	51,8	39,5

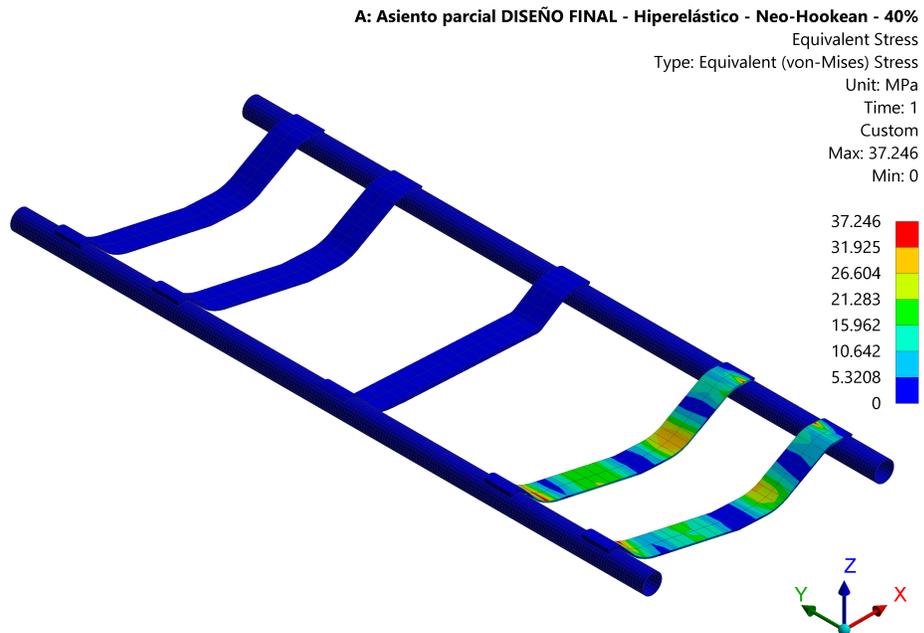


Imagen 80. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 1 – Diseño final

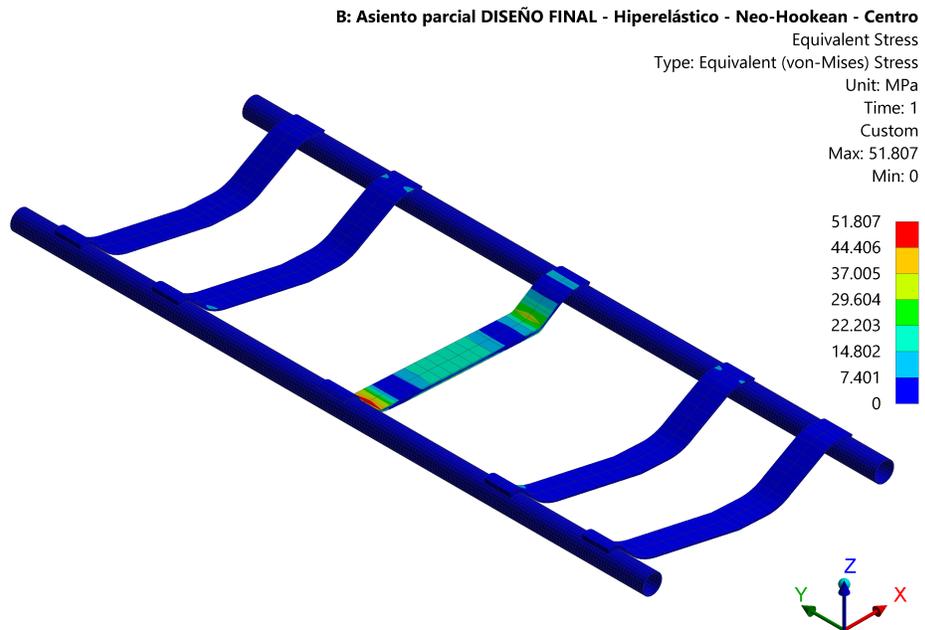


Imagen 81. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 2 – Diseño final

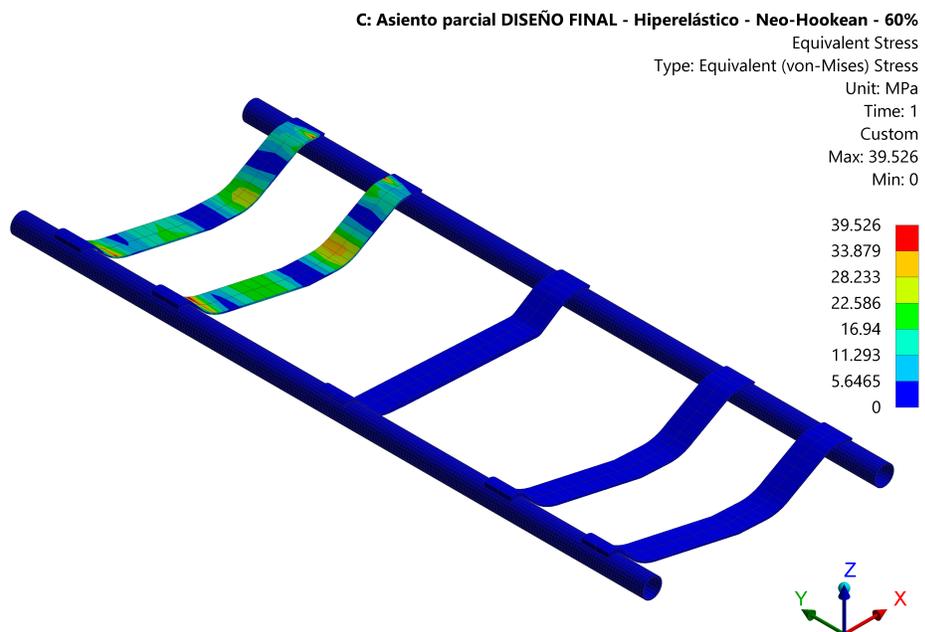


Imagen 82. Tensión de Von Mises de la estructura metálica en ANSYS Workbench del módulo 3 – Diseño final

Se observa que el estado tensional de los tres módulos queda muy por debajo del valor de la tensión última de estos aceros HSLA, por lo que claramente no se produce el fallo. Al igual que en las deformaciones, se observan valores de tensión superiores a los medidos en el modelo del diseño inicial que se vuelven a justificar por la reducción de espesor de la espuma. Entonces, se valida nuevamente la estructura metálica en el diseño final.

Con atención a los pedúnculos de los prototipos del diseño final, no se tienen las dificultades anteriores con el “rebote” del HPM. Por esta razón, se valida el diseño geométrico del cojín de la espuma.

Después, la influencia de la posición de los SBR no se ha detectado, ni positiva ni negativamente en las mediciones experimentales, ya que en el análisis inicial los resultados en la cota OZ eran tan bajos que su influencia era inabordable. En el caso de los prototipos del diseño final, donde se reposicionaron dichos dispositivos sensoriales, se puede concluir que la cota de la altura del HPM se respeta. Además, los SBR cumplen con su función adecuadamente.

Por último, puntualizando en la coordenada OZ donde se han encontrado los principales problemas. Se pueden explicar las diferencias de valores entre los resultados numéricos y las mediciones experimentales por el efecto de las fundas. Las fundas, dependiendo de su diseño geométrico y material, pueden conseguir modificar la geométrica de la espuma, haciendo que ésta varíe mínimamente resultando en diferencias entre el modelo y los prototipos. También, al simplificar las geometrías de las espumas del modelo para poder simularlo en el software de versión académica, se pueden perder algunas características que, de nuevo, se reflejen en la desviación de los resultados numéricos y las mediciones experimentales.

16. Conclusiones

Como resultado se ha encontrado la solución para el diseño del asiento trasero de un automóvil SUV de la clase B, de tres plazas de tipo banco, ajuste longitudinal manual con banqueta fija y respaldo abatible asimétrico como se indica en los requisitos del fabricante.

A pesar de las dificultades iniciales encontradas, se ha alcanzado un resultado final adecuado. Por un lado, la definición de las propiedades mecánicas de los materiales ha sido compleja, debido a la confidencialidad del proyecto. Por otro lado, las limitaciones de la versión

académica del software de elementos finitos han obligado a formular simplificaciones en los modelos.

De ellos resulta necesario decir que se ha perseguido la definición de modelos virtuales con la mayor similitud posible al asiento físico real. Tanto las simplificaciones de la geometría, como las aproximaciones de los materiales, y las condiciones límite del software que, reducen la posibilidad de un mayor refinado en la malla, conducen a un modelo menos preciso. No obstante, se obtienen modelos que cumplen con los requisitos de diseño. Por ello, se validan debido a su correcta posición del punto-H, y como consecuencia se fabrican prototipos para la realización de mediciones experimentales.

De igual forma, es necesario validar los prototipos para autorizar la fabricación del asiento. En los prototipos del diseño inicial no se consiguen los resultados deseados, lo que ha obligado a proponer un nuevo diseño con sus razonadas modificaciones. Las mediciones han resultado inadmisibles por errores en la fabricación de algunas piezas o por su propio diseño. Esto apoya la creación de un nuevo modelo, que después de ser validado, se utiliza para construir los prototipos finales. Entonces, las mediciones realizadas en estos prototipos resultan admisibles y se valida así el diseño final.

Por lo tanto, la correlación entre el modelo y los prototipos del diseño final puede verse reflejada en los valores de ambos resultados, numéricos y experimentales, de la localización del punto-H.

Finalmente, la influencia de la posición del punto-H está en la geometría y material de las espumas, y también, en la unión de éstas a la estructura metálica específica del asiento. Por ello, para futuros problemas en la validación de los modelos y prototipos de un asiento trasero, la atención debe centrarse primero, en las espumas y la estructura metálica. Y segundo, en la analogía de las propiedades de los materiales definidos en el modelo, con los fabricados y utilizados para montar los prototipos.