



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE
SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA
NORMATIVA FIA**

AUTOR

FERRAN GIL CASTELLBLANCH

TUTOR

ENRIQUE NADAL SORIANO

CO-TUTOR

JUAN JOSÉ RÓDENAS GARCÍA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Descripción.....	3
1.2 Objetivo.....	4
2. RESTRICCIONES DEL DISEÑO	5
2.1 Normativa FIA.....	5
2.1.1 Especificaciones FIA del diseño.....	6
2.1.2 Ensayo 1: carga estática vertical sobre el arco principal.....	11
2.1.3 Ensayo 2: carga estática sobre el arco frontal.....	11
2.2 Material.....	13
2.3 Dimensionado de la celda de seguridad.....	15
3. DISEÑO INICIAL	23
3.1 Geometría y condiciones del diseño inicial.....	23
3.2 Modelo en ANSYS del diseño inicial.....	25
3.2.1 Tipo de análisis.....	26
3.2.2 Caracterización del material.....	26
3.2.3 Tipo de elemento.....	27
3.2.4 Geometría.....	28
3.2.5 Mallado de la pieza.....	29
3.2.6 Condiciones de contorno.....	30
3.2.6.1 Fuerza gravitatoria.....	30
3.2.6.2 Restricciones de desplazamiento.....	31
3.2.6.3 Modelado de las cargas del ensayo 1.....	31
3.2.6.4 Modelado de las cargas del ensayo 2.....	32
3.2.7 Resultados del ensayo 1.....	34
3.2.7.1 Tensión equivalente de Von Mises.....	34
3.2.7.2 Desplazamientos.....	35
3.2.8 Resultados del ensayo 2.....	35
3.2.8.1 Tensión equivalente de Von Mises.....	36
3.2.8.2 Desplazamientos.....	37
3.2.9 Conclusiones del modelo inicial.....	37
4. AUTOMATIZACIÓN DEL MODELO EN ANSYS	38
4.1 Parametrización del modelo.....	39
4.1.1 Parámetros del modelo.....	39
4.1.2 Rango de valores para los parámetros y argumentos.....	41
4.2 Macro para ANSYS del modelo.....	43

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

4.2.1	Definición del elemento a utilizar, propiedades del material y secciones.....	45
4.2.2	Definición de la geometría	45
4.2.3	Mallado del modelo	46
4.2.4	Condiciones de contorno.....	47
4.2.5	Obtención de los resultados	49
5.	OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO	51
5.1	<i>Algoritmo genético</i>	<i>52</i>
5.2	<i>Optimización del diseño con Matlab.....</i>	<i>54</i>
5.2.1	Caracterización del algoritmo genético	54
5.2.2	Función objetivo.....	57
5.3	<i>Resultados de la optimización.....</i>	<i>58</i>
5.3.1	Variables optimizadas.....	59
5.3.2	Parámetros del diseño final optimizado	59
5.3.3	Resultados del ensayo 1	62
5.3.3.1	Tensión equivalente de Von Mises.....	62
5.3.3.2	Desplazamientos.....	63
5.3.4	Resultados del ensayo 2	63
5.3.4.1	Tensión equivalente de Von Mises.....	64
5.3.4.2	Desplazamientos.....	65
5.3.5	Análisis de los resultados.....	65
6.	CONCLUSIONES	67
7.	PRESUPUESTO.....	68
8.	PLIEGO DE CONDICIONES.....	73
9.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS EXTERNAS.....	74
ANEXOS	75
A1.	<i>Matriz para el Ensayo 1.....</i>	<i>76</i>
A2.	<i>Matriz para el Ensayo 2.....</i>	<i>80</i>
A3.	<i>Matriz para obtener el Peso.....</i>	<i>84</i>
A4.	<i>Función algoritmo genético de Matlab.....</i>	<i>87</i>
A5.	<i>Sub-rutina de la función objetivo en Matlab.....</i>	<i>88</i>
PLANOS.....	90

1. INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo introductorio se hace un breve resumen donde se explica en qué consiste y para qué sirve una celda de seguridad de un vehículo. De igual forma se expone cual es el objetivo que pretende conseguir este trabajo y los pasos que se van a seguir para ello.

1.1 Descripción

Debido a las altas velocidades y riesgos que se toman en las competiciones de velocidad (World Rally Championship, Deutsche Tourenwagen Masters, World Endurance Championship, etc), los vehículos ven reforzada su seguridad en caso de accidente con varios elementos de seguridad que no son comunes a los vehículos de calle. Los asientos tipo baquet, los cinturones de arneses con 4 o 6 puntos, extintores y la celda de seguridad son elementos extra que frecuentemente incorpora un vehículo de competición con la finalidad de proteger a las personas que se sitúan en su interior. Así mismo, los ocupantes del vehículo también utilizan elementos de protección individuales como casco, Hans (elemento de protección de la cabeza y el cuello) y ropa ignífuga.

Este trabajo se va a centrar en la celda de seguridad (figura 1), la cual es una estructura formada por elementos tubulares de acero soldados entre sí, que se instala en el interior de vehículos de competición o forma parte del mismo chasis del vehículo. La principal función que tiene esta estructura es la de formar un esqueleto interno dentro del habitáculo del vehículo que proteja a los ocupantes en caso de accidente o vuelco en competición. Por tanto, es un elemento crítico que requiere de un estudio preciso de su diseño para garantizar que cumple su principal función, proteger a los ocupantes del vehículo donde es instalada.

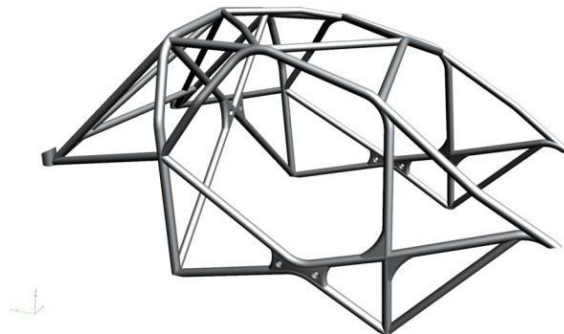


Figura 1. Celda de seguridad [1]

Por tratarse de un elemento estructural tan crítico, su diseño y fabricación está regulado por una normativa firmada por la Federación Internacional de Automovilismo (FIA). Por ello, nos referiremos a esta normativa a lo largo del trabajo ya que en las diferentes fases del diseño acudiremos a ella para garantizar que el diseño final cumple las especificaciones y la celda de seguridad diseñada pueda ser fabricada para su uso en competición.

1.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo es el diseño y optimización de una celda de seguridad siguiendo la normativa FIA [2], [3] y [4]. Por tanto, el objetivo de este trabajo se puede dividir en dos partes. La primera es diseñar una celda de seguridad para un vehículo siguiendo la normativa FIA. La segunda parte del trabajo consiste en partir del diseño inicial de la celda de seguridad que cumple la normativa FIA y optimizar su diseño en base a unos parámetros del mismo, con el fin de conseguir una celda de seguridad que mantenga una relación peso-precio óptima.

Con el fin de alcanzar el objetivo de este trabajo, se han establecido unos pasos a seguir que son:

- Diseño inicial de una celda de seguridad que cumpla la normativa FIA.
- Diseño parametrizado a partir del diseño inicial.
- Optimización del diseño parametrizado.

Para el diseño de la celda de seguridad haremos uso de dos programas informáticos. Utilizaremos el programa ANSYS de Elementos Finitos para simular los ensayos que vienen especificados en la normativa FIA y de esta forma comprobar que el diseño cumple con la normativa. Para la optimización del diseño haremos uso del programa Matlab y su función de Algoritmos Genéticos para conseguir el diseño más económico de construir entre las opciones disponibles de materiales y dimensiones geométricas que serán establecidas. Por otro lado utilizaremos un programa de CAD, en nuestro caso AutoCAD, para realizar los planos del diseño definitivo.

2. RESTRICCIONES DEL DISEÑO

Cuando se pretende diseñar una pieza nueva, se debe tener en cuenta, dónde va a ser utilizada, para qué va a ser utilizada y cómo se va a utilizar. Esto conlleva una serie de condicionantes que afectarán al diseño final de la pieza.

Para el diseño de la celda de seguridad que se va a realizar en este trabajo aparecen varios tipos de restricciones. A continuación se expondrán estas restricciones al diseño con el fin de obtener un diseño que sea parametrizable de forma sencilla y, por tanto, poder optimizarlo sin necesidad de invertir grandes recursos computacionales en el proceso.

2.1 Normativa FIA

La normativa FIA representa el gran condicionante del diseño de la celda de seguridad. La FIA regula mediante su extensa normativa no solo el diseño de las celdas de seguridad, sino todo el equipamiento de un vehículo de competición. Del mismo modo, cada categoría (Rally, camiones, GT, Todo Terreno, etc.) tiene su propia normativa que difiere parcialmente de la normativa del resto de categorías.

Por tanto el primer paso es encontrar la normativa FIA que debe ser aplicada en el diseño de la celda de seguridad para este trabajo. Para ello definimos el tipo de vehículo y la categoría donde participaría.

- Tipo de vehículo: **Todo Terreno**.
- Categoría: **T1, vehículos Todo Terreno modificados. Prototipo**.

El vehículo que va a albergar la celda de seguridad es un prototipo de la categoría T1. Son coches que generalmente compiten en carreras tipo *baja* o *Rally Raid* (Rally Dakar, Baja Aragón, etc.). En este caso el vehículo pertenece a la categoría de prototipos por lo que su chasis no es de un coche de serie, sino que se trata de una estructura tubular la que conforma todo el chasis del vehículo, siendo la celda de seguridad una parte del mismo.

Una vez ha sido establecido que el tipo de vehículo pertenece a la categoría T1 de coches prototipos se puede especificar que la normativa FIA que debe cumplir la celda de seguridad para dicho vehículo es la siguiente:

- Anexo J – Artículo 283. Equipamiento de Seguridad para vehículos Todo Terreno [2].
- Anexo J – Artículo 285. Equipamiento de Seguridad para vehículos Todo Terreno modificados (T1) [3].

Por otra parte, con el fin de comprobar que una celda de seguridad es lo suficientemente resistente como para proteger a los ocupantes del vehículo, se realizan ensayos estáticos que son regulados por la siguiente normativa:

- 2017 – Homologation Regulations for Safety Cages [4].

2.1.1 Especificaciones FIA del diseño

Del artículo 283 [2] anteriormente mencionado se extrae que la estructura de la celda de seguridad debe ser diseñada a partir de un modelo base especificado en dicho artículo donde se establecen los elementos mínimos y su disposición en la celda de seguridad. Estos elementos mínimos que conforman una celda de seguridad para un vehículo de la categoría T1 que se especifican en el artículo 283 [2] son:

- La **estructura base** de la celda de seguridad que debe estar constituida por los siguientes elementos representados en la figura 2.
 - Un arco principal.
 - Dos semi-arcos laterales.
 - Un miembro transversal.
 - Dos tirantes longitudinales traseros.
 - Seis puntos de anclaje.



Figura 2. Estructura base [2]

Dichos elementos deben atenerse a los siguientes requisitos:

1. La parte vertical del arco principal debe ser tan próxima como sea posible a los paneles interiores de la carrocería y debe tener una sola curvatura entre su parte inferior y su parte superior.
 2. El pilar de un arco delantero (o el pilar frontal de un arco o semi-arco lateral) debe seguir lo más cerca posible a los montantes del parabrisas y tener una sola curvatura entre su parte inferior y su parte superior.
 3. Las siguientes conexiones deben situarse a nivel del techo:
 - Miembros longitudinales al arco principal y delantero
 - Miembros transversales a los arcos laterales
 - Semi-arcos laterales al arco principal
 4. No debe haber más de 4 uniones desmontables a nivel del techo.
 5. Los tirantes longitudinales traseros deben anclarse a nivel del techo y cerca de los ángulos superiores exteriores del arco principal, a ambos lados del vehículo, siendo posible hacerlo por medio de conexiones desmontables.
 6. Deberán formar un ángulo mínimo de 30° con la vertical, estar dirigidos hacia atrás y ser rectos y tan cercanos como sea posible a los paneles interiores de la carrocería.
- El **tirante diagonal** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 3.

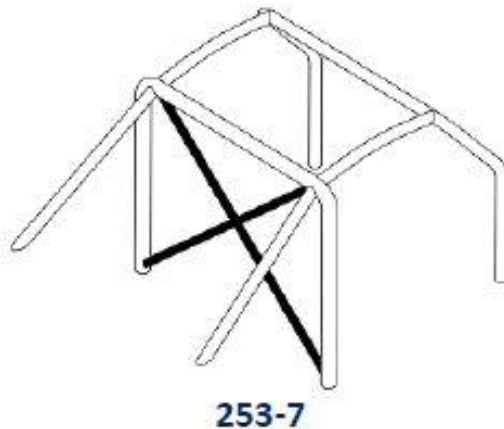


Figura 3. Tirante diagonal [2]

Los tirantes diagonales deben atenerse a los siguientes requisitos:

1. Los miembros deben ser rectos y pueden ser desmontables.
 2. El extremo superior de la diagonal debe unirse al arco principal a menos de 100 mm de la unión del arco principal con el tirante longitudinal trasero, o al tirante longitudinal trasero a menos de 100mm de su unión con el arco principal.
 3. El extremo inferior de la diagonal debe unirse al arco principal o a un tirante longitudinal trasero a menos de 100mm del pie de anclaje.
- Las **barras de las puertas** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 4.

Las barras de las puertas deben atenerse a los siguientes requisitos:

1. Se deberán instalar dos miembros longitudinales a cada lado del vehículo conforme a la figura 4.
2. Los tubos que compongan este refuerzo deben estar incorporados a la estructura de seguridad, y su ángulo con el tubo horizontal no debe superar los 15° (inclinado hacia abajo y hacia delante).
3. El diseño debe ser idéntico en ambos lados.
4. La protección lateral deberá situarse tan alta como sea posible, pero en todos los casos sus puntos de anclaje superiores no estarán a más de la mitad de la altura total de la puerta medida desde su base.
5. Si estos puntos de anclaje superiores están situados delante o detrás de la apertura de la puerta, esta limitación en altura aplica a la intersección correspondiente al tirante y la apertura de la puerta (vista lateral).
6. Se recomienda que los puntos de anclaje inferiores se fijen directamente sobre el larguero longitudinal de la carrocería/chasis y que al menos una parte de la "X" sea una barra de una sola pieza.
7. La conexión de los tirantes de puertas con el pilar de refuerzo del parabrisas (figura 5) está autorizada.

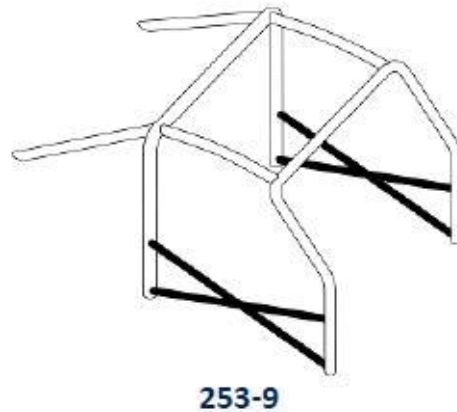


Figura 4. Barras de las puertas [2]

- Los **pilares de refuerzo del parabrisas** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 5.

Los pilares de refuerzo del parabrisas deben atenerse a los siguientes requisitos:

1. Deben estar montados a cada lado del arco delantero.
2. Este refuerzo puede ser curvado a condición de que sea rectilíneo en vista lateral y que el ángulo de la curvatura no exceda 20° .
3. Su extremo superior debe estar a menos de 100mm de la unión entre el arco delantero (lateral) y el miembro longitudinal (transversal). Su extremo inferior debe estar a menos de 100mm del pie de anclaje (delantero) del arco delantero (lateral).

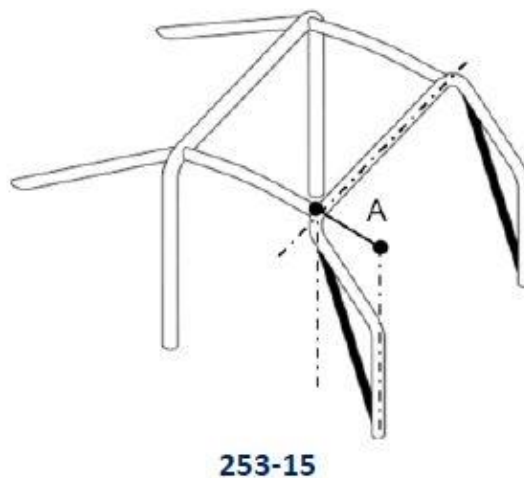


Figura 5. Refuerzo del parabrisas [2]

- El **miembro transversal** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 6.

El miembro transversal debe atenerse a los siguientes requisitos:

1. Debe ser recto y estar situado tan alto como sea posible, pero su borde inferior no debe estar situado por encima del punto más elevado del salpicadero.
2. No debe posicionarse por debajo de la columna de dirección.

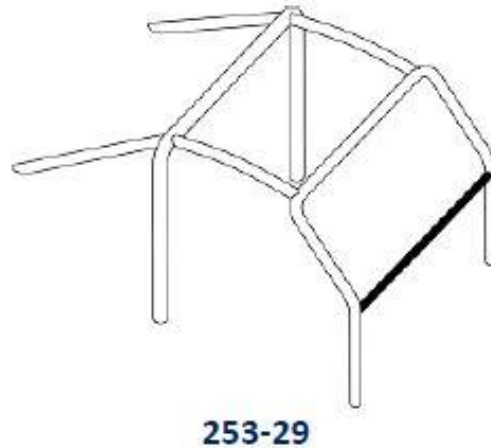


Figura 6. Miembro transversal [2]

- Los **refuerzos del techo** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 7.

Los refuerzos del techo deben atenerse a los siguientes requisitos:

1. Los miembros pueden seguir la curvatura del techo.
2. Los extremos de los miembros deben estar a menos de 100mm de la unión entre arcos y miembros.

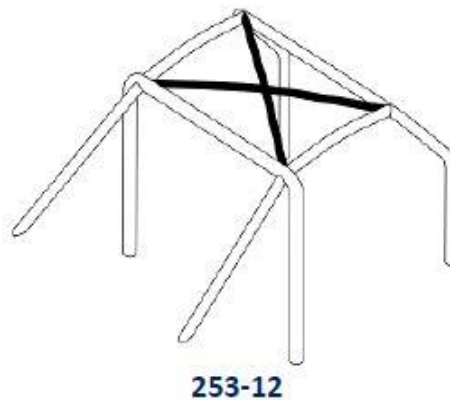


Figura 7. Refuerzo del techo [2]

Todos los elementos anteriormente explicados deben aparecer en cualquier celda de seguridad. También existen otros elementos que no son de obligatoria implantación. Sin embargo, en este proyecto se va a limitar la celda de seguridad únicamente a los elementos obligatorios que contempla la normativa.

2.1.2 Ensayo 1: carga estática vertical sobre el arco principal

La normativa de la FIA que regula los ensayos estáticos que debe soportar una celda de seguridad [4] establece que el primer ensayo se realiza en las siguientes condiciones:

La celda de seguridad completa debe soportar una carga vertical F (efecto de la gravedad no contemplado), aplicada sobre el arco principal mediante una prensa.

$$F = 75 * (W + 500) \quad (1)$$

Siendo W el peso del vehículo. La normativa para vehículos de la categoría T1 [3] establece una relación entre el peso mínimo del vehículo y el motor que monta. En el caso de este trabajo, el motor que será instalado en el chasis que alberga la celda de seguridad es un motor gasolina atmosférico de 3.997cc, por lo que el vehículo debe tener un peso mínimo de 1765kg. De este modo, sustituyendo en (1), la fuerza aplicada es:

$$F = 75 * W = 75 * (1765 + 500) = \mathbf{169875 \text{ N}}$$

El elemento con el que se aplica la fuerza con la que se realiza el ensayo debe estar fabricado en acero, tener un radio de $20\text{mm} \pm 5\text{mm}$ en las aristas en la dirección del eje del arco principal, además de tener las siguientes dimensiones mínimas.

- Longitud = anchura del arco principal + 100mm.
- Anchura = 250mm +/-50mm.
- Espesor = 40mm.

Este elemento deberá seguir el perfil transversal del arco principal. La carga deberá aplicarse en menos de 15 segundos.

En este ensayo, sobre la estructura de seguridad al completo no debe producirse ninguna deformación de más de **50mm** medidos en la dirección de aplicación de la carga, ni sobrepasar el límite de rotura del material.

2.1.3 Ensayo 2: carga estática sobre el arco frontal

La celda de seguridad debe soportar una carga de F (efecto de la gravedad no contemplado), aplicada en la parte superior del arco frontal, en el lado del piloto en la zona donde se interseca el miembro transversal con el pilar del arco frontal.

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

$$F = 35 * (W + 500) \quad (2)$$

El peso del vehículo (W) es el mismo para los dos ensayos, 1765kg, y sustituyendo en (2) la fuerza aplicada F es:

$$F = 35 * (W + 500) = 35 * (1765 + 500) = \mathbf{79275 \text{ N}}$$

Para este ensayo el elemento que aplica la fuerza debe estar fabricado en acero, con un radio de 20mm +/-5mm en las aristas dirigidas hacia la barra frontal y tendrá las siguientes dimensiones mínimas.

- Longitud = 450mm +/-50mm.
- Anchura = 250mm +/-50mm.
- Espesor = 40mm.

Éste deberá estar diseñado para que se mantenga en la zona de la intersección del miembro transversal con el arco frontal. El eje longitudinal de la prensa debe estar dirigido hacia en frente y hacia abajo con un ángulo de 5 grados +/-1 grado relativo al plano horizontal y su eje transversal debe estar direccionado hacia el exterior y hacia abajo con un ángulo de 25 grados +/-1 grado relativo al plano horizontal; representación de la aplicación de la carga en la figura 8. La carga debe ser aplicada en menos de 15 segundos.

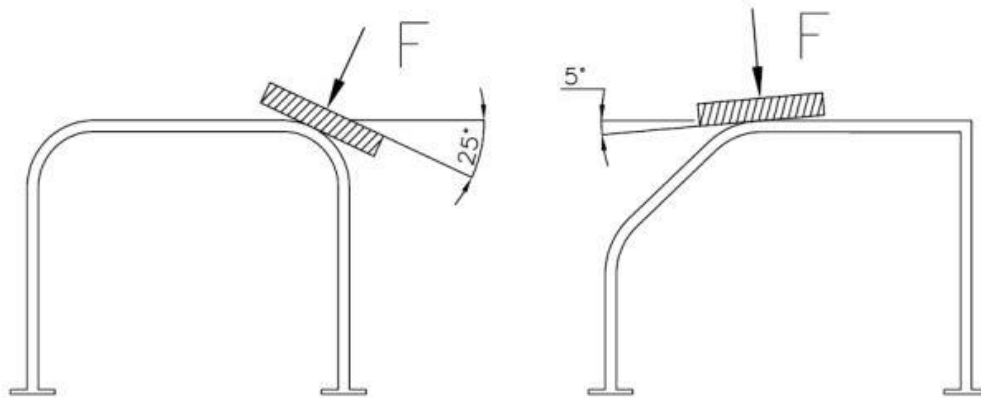


Figura 8. Carga aplicada en el ensayo 2 [4]

Para este ensayo no debe producir ningún desplazamiento por deformación en la estructura de más de **100mm** medidos en la dirección de aplicación de la carga, ni se debe de superar el límite de rotura del material.

2.2 Material

El tipo de material que se va a utilizar debe ser definido previamente, ya que sus características tanto geométricas como mecánicas afectarán a la estructura. Por tanto, en este punto aparecen dos restricciones diferentes.

Por un lado, se encuentra la normativa FIA [2] que define unas características mínimas que debe poseer el material que se emplea para la construcción de las celdas de seguridad. La FIA establece que:

- Solo se autorizan tubos de sección circular.
- Solo se autoriza el uso de un único material para toda la estructura (no se permite combinar aceros).
- Los tubos deben ser de acero al carbono no aleado, estirado en frío sin soldadura, con un contenido en carbono no superior al 0,3%.
- La resistencia mínima a tracción del material debe ser de 350N/mm^2 .

Además, la FIA también establece un diámetro y un espesor mínimo de los tubos en función del elemento estructural de la celda de seguridad al que sea destinado.

Para el arco principal se debe usar un tubo con diámetro y espesor no inferior a:

- Diámetro exterior: 45mm. Espesor: 2,5mm.
- Diámetro exterior: 50mm. Espesor: 2mm.
- Para diámetros exteriores que superen los 50mm la normativa FIA no establece un espesor mínimo obligatorio.

Para el resto de elementos de la celda de seguridad que no sean el arco principal se debe utilizar un diámetro y un espesor mínimo de los tubos de:

- Diámetro exterior: 38mm. Espesor: 2,5mm.
- Diámetro exterior: 40mm. Espesor: 2mm.
- Para diámetros exteriores que superen los 40mm la normativa FIA no establece un espesor mínimo obligatorio.

Por otra parte, se debe tener en cuenta las posibilidades comerciales que se encuentran disponibles para construir la celda de seguridad. De la diversidad de aceros que existen y cumplen los requisitos establecidos por la FIA, han sido seleccionados 3 aceros con diferentes características mecánicas que pueden ser suministrados en tubos circulares huecos de dimensiones aptas para la fabricación de una celda de seguridad.

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

Los 3 tipos de tubo de acero seleccionados con sus características mecánicas principales y un precio aproximado de su coste en función del peso son comparados en la tabla 1.

Propiedades [5]	E355	E470	25CrMo4
Límite elástico (MPa)	355	430	700
Tensión de rotura (MPa)	490	600	900
Densidad (kg/m ³)	7850	7850	7850
Módulo de Young (GPa)	205	205	205
Coef. Poisson	0.3	0.3	0.3
Módulo tangente (MPa)	1450	1450	1450
Precio (€/kg)	1.4	1.6	3.5

Tabla 1. Características de aceros

En cuanto a las posibilidades comerciales [6] de los tubos de acero que pueden ser utilizados en la fabricación de la celda de seguridad se recogen en la tabla 2 las distintas secciones válidas para la celda de seguridad.

Sección	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)
38 x 2,5	38	2,5
40 x 2	40	2
45 x 2,5	45	2,5
48 x 2,5	48	2,5
50 x 2	50	2

Tabla 2. Secciones de tubos

Se debe tener en cuenta que las dos primeras secciones de la tabla 2 no pueden ser utilizadas para la construcción del arco principal.

Como se puede observar, han sido definidos varios materiales y secciones de tubo. Esto es debido a que el algoritmo genético que se va a utilizar en la optimización del diseño seleccionará, teniendo en cuenta todas las restricciones de diseño que se contemplan en este punto, la combinación de los mismos que mejor cumpla el objetivo del proyecto.

2.3 Dimensionado de la celda de seguridad

El diseño de la celda de seguridad tiene que contar con unas longitudes concretas de los tubos que la conforman. En el caso presente, la celda de seguridad forma parte de un chasis tubular y no de un vehículo de producción, por lo tanto las dimensiones anteriormente comentadas no se deben ajustar a un espacio ya definido, sino que pueden ser establecidas dentro de unos límites más laxos. Por ello, para el diseño de la celda de seguridad de este proyecto se han establecido los siguientes rangos de longitudes que pueden tomar los tubos que conforman la celda de seguridad, en base a criterios de norma FIA, confortabilidad y funcionalidad.

- La **anchura** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 9.

La anchura total del vehículo no puede ser superior a 2000mm [3]. Teniendo en cuenta que debe existir una carrocería que recubre la celda de seguridad por ambos lados, ésta última no puede tener una anchura superior a **1600mm**.

También se debe tener en cuenta la anchura mínima de la celda de seguridad. Una anchura menor a **1400mm** dejaría un espacio interior poco confortable al mismo tiempo que funcional.

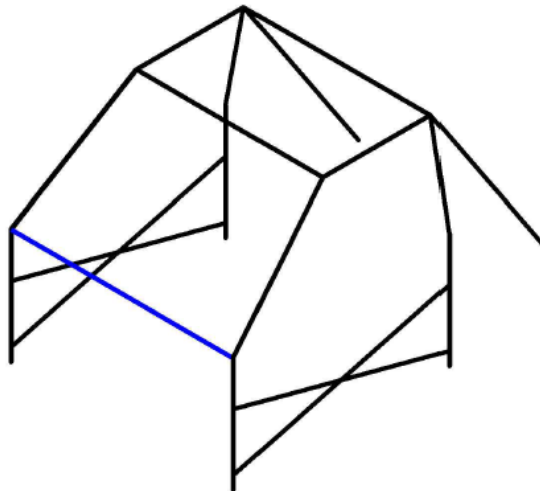


Figura 9. Anchura de la celda de seguridad

- La **altura** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 10.

La altura mínima dentro del habitáculo del vehículo debe ser de **1410mm** [3].

Teniendo en cuenta que aumentar la altura de la celda de seguridad implica alejar el centro de gravedad del suelo, se establece una altura máxima de **1550mm**.

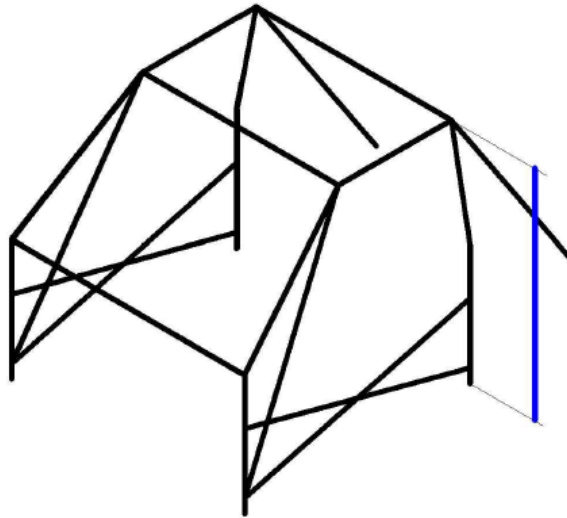


Figura 10. Altura de la celda de seguridad

- La **altura del salpicadero** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 11.

Debido a la necesidad de albergar la columna de dirección, el pedalier y los instrumentos de navegación y lectura del vehículo, junto a la comodidad de los ocupantes; se ha decidido establecer una altura del salpicadero no inferior a **650mm**.

Por otra parte, conforme se aumenta la altura del salpicadero disminuye la altura del parabrisas y por tanto la visibilidad del piloto y del copiloto. Por tanto, se establece una altura máxima de **750mm**.

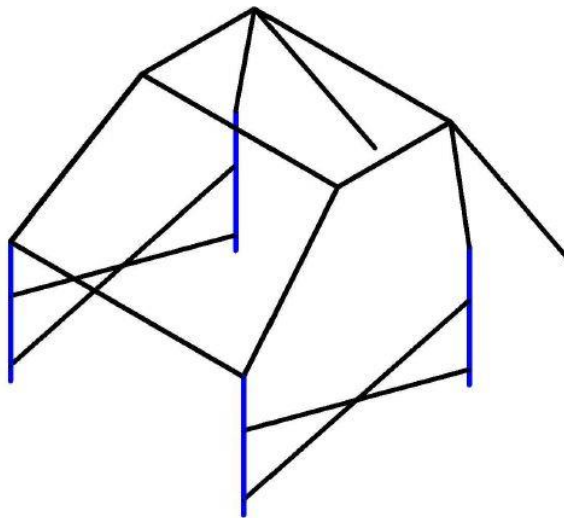


Figura 11. Altura del salpicadero de la celda de seguridad

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

- El **largo del salpicadero** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 12.

Como en el caso anterior, la normativa no establece ningún límite. Sin embargo para encontrar un equilibrio entre funcionalidad y confortabilidad se han establecido los siguientes límites. El largo del salpicadero no será inferior a **650mm**, ni tampoco será superior a **750mm**.

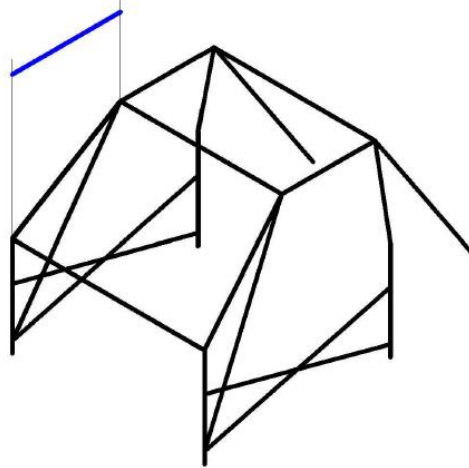


Figura 12. Largo del salpicadero de la celda de seguridad

- El **largo de la cabina** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 13.

En este caso la normativa FIA [3] establece que la longitud del hueco donde van situados los asientos debe ser superior a 400mm. Sin embargo, la longitud de los asientos tipo baquet generalmente es superior a 400mm. A su vez, una longitud de 400mm resultaría un espacio muy pequeño. Por tanto, tomando como referencia asiento tipo baquet de 700mm de largo, se establece **750mm** como el mínimo del largo de la cabina.

Por otra parte, una excesiva longitud de la cabina y por ende del chasis conllevaría una distancia entre ejes grande lo que afectaría a la conducción. Por tanto, el largo de la cabina no puede superar los **850mm**.

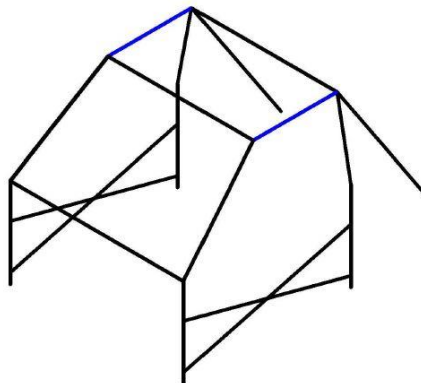


Figura 13. Largo de la cabina de la celda de seguridad

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

- La **anchura de la cabina** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 14.

La normativa FIA [3] regula también la anchura para el hueco donde van situados los asientos. Para el caso de un vehículo biplaza el ancho mínimo que debe cumplir el hueco destinado a los asientos es de 1130mm, existiendo una separación entre los centros de los asientos de 600mm. Por tanto, se establece una anchura mínima de **1150mm** para la cabina.

En cuanto a una anchura máxima de la cabina, continúa presente el límite de 2000mm de ancho que puede ser el vehículo. Por tanto, como sucedía con el ancho de la celda de seguridad, el ancho de la cabina debe ser inferior a este valor. Se ha establecido un ancho máximo de **1350mm**, ya que de nuevo se busca un equilibrio entre funcionalidad y confortabilidad.

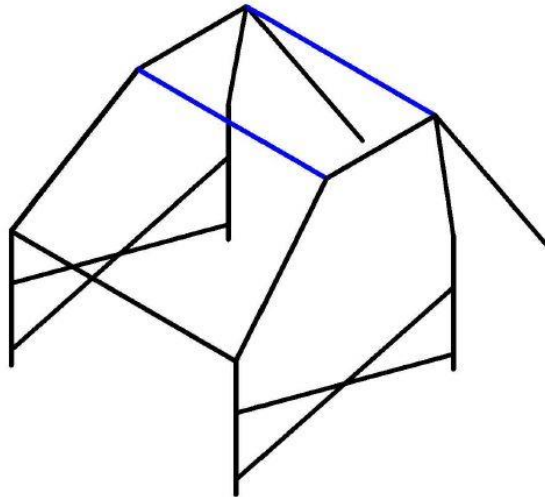


Figura 14. Anchura de la cabina de la celda de seguridad

- La **altura y largo del tirante longitudinal trasero** de la celda de seguridad respecto de la cota cero, de acuerdo a las figuras 15 y 16.

En este caso, el tirante longitudinal trasero debe formar un ángulo mínimo con la vertical de 30° [2]. Por otra parte, con el objetivo de no realizar un diseño excesivamente largo que comprometa la estabilidad y el paso por curva del vehículo se establecen unos rangos tanto para el largo como para la altura respecto de la cota cero de la celda de seguridad.

El largo del tirante longitudinal trasero no será inferior a **700mm**, mientras que la longitud máxima no superará los **800mm**.

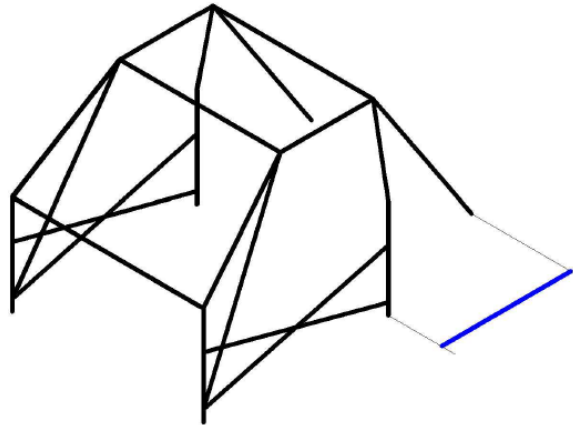


Figura 15. Largo del tirante longitudinal trasero de la celda de seguridad

Por su parte, la altura mínima del tirante longitudinal trasero respecto de la cota 0 de la celda de seguridad no debe ser inferior a los **200mm**. La altura máxima que puede alcanzar es de **400mm**.

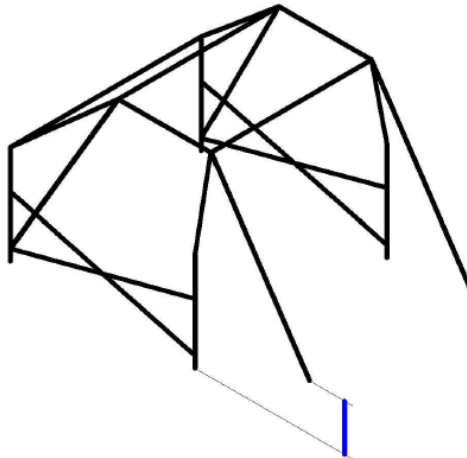


Figura 16. Altura del tirante trasero longitudinal de la celda de seguridad

- La **altura inferior de la unión del refuerzo de las puertas con el semi-arco lateral** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 17.

La normativa de la FIA [2] establece una altura máxima respecto de la cota cero de la celda de seguridad a partir de la cual no está permitido realizar la unión del elemento inferior del refuerzo de las puertas. Esta altura máxima es de **100mm** respecto de la cota cero.

Sin embargo no existe una altura mínima a la que se debe unir el refuerzo de las puertas al semi-arco lateral, por lo que se permite unir el refuerzo de las puertas al punto de unión de la celda de seguridad con el chasis.

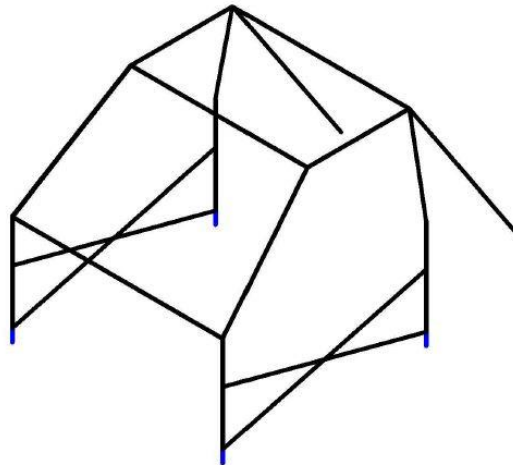


Figura 17. Altura inferior de la unión del refuerzo de las puertas con el semi-arco lateral de la celda de seguridad

- La **altura superior entre los elementos del refuerzo de las puertas en la unión con el semi-arco lateral** de la celda de seguridad de acuerdo a la figura 18.

La normativa de la FIA [2] establece que el punto de unión superior del refuerzo de las puertas no debe situarse a una altura superior a la mitad de las puertas del vehículo. Del mismo modo, establece que los tubos que forma el refuerzo no deben tener un ángulo superior a 15° respecto de la horizontal. Por tanto, la mínima altura superior a la que se unirá el elemento superior del refuerzo de las puertas es de **490mm**.

En cuanto a la altura máxima a la que se podrá anclar el elemento superior del refuerzo de las puertas se establece en **590mm**.

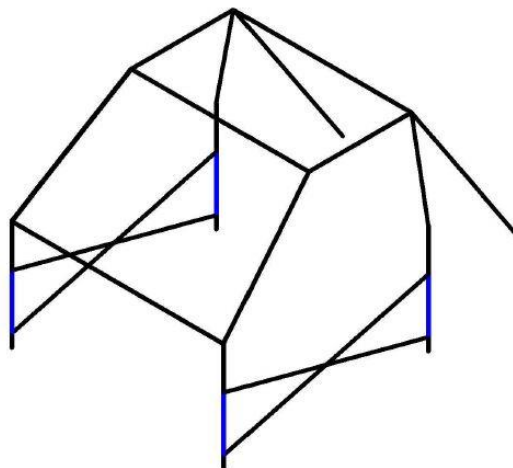


Figura 18. Altura superior de la unión del refuerzo de las puertas con el semi-arco lateral de la celda de seguridad

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

- En cuanto al refuerzo del techo, al refuerzo del parabrisas y el refuerzo de la parte trasera, los tubos que los conforman se unirán a la estructura en puntos ya existentes de la siguiente forma:
 - El refuerzo del techo se unirá en los 4 vértices que generan los dos semi-arcos laterales con el arco principal y con la unión entre ellos a la altura del techo (figura 19).

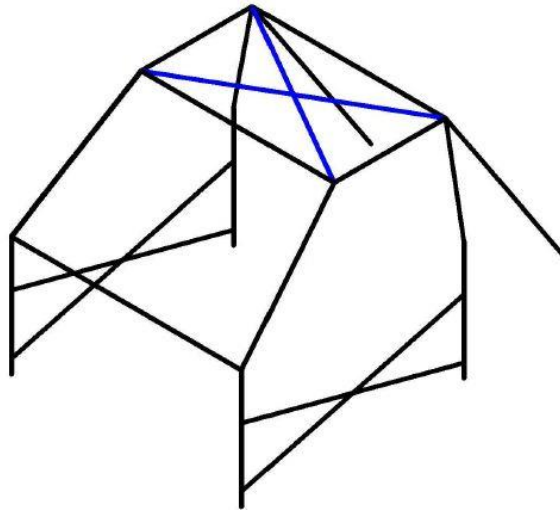


Figura 19. Uniones refuerzo del techo

- Cada refuerzo del parabrisas se extiende desde la unión a altura del techo del tubo que une los dos semi-arcos laterales con uno de ellos, hasta la unión inferior del refuerzo de las puertas con el mismo arco lateral (figura 20).

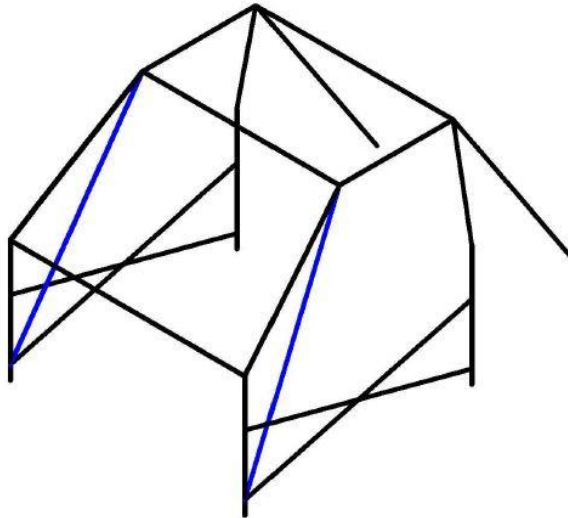


Figura 20. Uniones refuerzo del parabrisas

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

- Cada refuerzo de la parte trasera tiene un vértice en una unión del arco principal con un semi-arco lateral y el otro vértice en la unión inferior del refuerzo de las puertas con el arco principal en la parte opuesta de la celda de seguridad (figura 21).

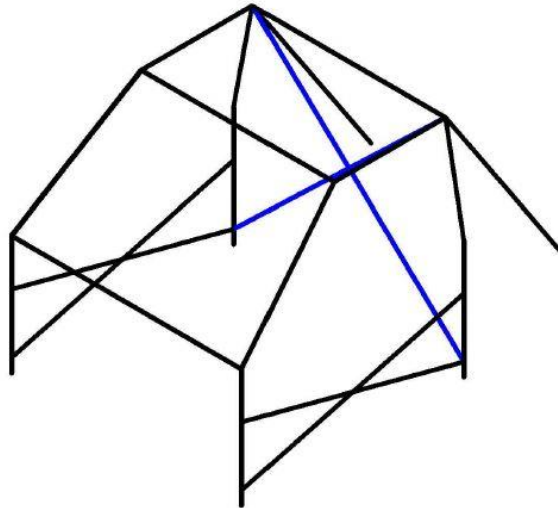


Figura 21. Uniones refuerzo trasero

No solo las longitudes de los tubos deben ser establecidas. Tanto en el arco principal, como en ambos semi-arcos laterales no encontramos curvaturas. Las curvaturas en los tubos vienen reguladas en la normativa FIA [2] y [3]. El curvado del tubo debe hacerse en frío con un radio de curvatura no inferior a 50mm. Si el tubo se ovaliza durante esta operación la relación entre el diámetro menor y mayor no será inferior a 0,9. La superficie al nivel de los ángulos debe ser uniforme sin ondulaciones ni fisuras.

En el caso del diseño de la celda de seguridad que se está llevando a cabo en este proyecto los radios de curvatura son los siguientes:

- Radio de curvatura: 100mm. Para las curvaturas que se realizan a la hora de conformar los semi-arcos laterales. Para las curvaturas inferiores que se realizan en el arco principal.
- Radio de curvatura: 50mm. Para las curvaturas que se realizan en el arco principal a la altura del techo.

Con esto concluyen todas las restricciones que afectan al diseño de la celda de seguridad.

3. DISEÑO INICIAL

El diseño inicial tiene como función aportar un punto de inicio sobre el que desarrollar el diseño final. Este punto de inicio debe ser coherente con la normativa que anteriormente se ha especificado, así como con las restricciones geométricas y de materiales que han sido determinadas.

Para llevar a cabo el diseño inicial, primeramente se establecerán las dimensiones de la celda de seguridad, que material de los tres disponibles va a ser utilizado y que sección o secciones de tubo se van a usar. Una vez establecidas las condiciones de diseño anteriormente mencionadas, se procederá mediante la aplicación de un análisis de elementos finitos al estudio de la estructura de la celda de seguridad bajo las condiciones de carga de los ensayos requerido por la normativa FIA.

La aplicación del método de elementos finitos (MEF) nos permite obtener una solución numérica aproximada sobre un medio continuo como es nuestra celda de seguridad. Se trata de un método numérico general basado en la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales las cuales caracterizan el comportamiento físico de un problema dentro de un dominio encerrado por unas condiciones de contorno en la frontera de dicho dominio. El MEF divide el dominio del problema en pequeños sub-dominios (elementos) definidos por los nodos que conecta, discretizando de esta forma el problema. Estos sub-dominios se reparten por toda la estructura en forma de malla. Para cada elemento se establecen las funciones incógnitas del problema, generalmente funciones polinómicas, en función de unos coeficientes a determinar. Tras realizar la minimización de la versión discreta de la energía potencial total se obtienen dichos coeficientes que permiten obtener una solución aproximada del problema. Una de las ventajas del método es que debido a la discretización del dominio en elementos, es posible adaptarse de manera sencilla y sistemática a cualquier tipo de geometría.

3.1 Geometría y condiciones del diseño inicial

El diseño inicial debe seguir las restricciones anteriormente establecidas. Por tanto, de las distintas posibilidades que existen y que cumplen dichas restricciones de diseño se han escogido unos valores concretos que formaran el diseño inicial. Los valores que se escojan no afectarán a los resultados, ya que la finalidad del diseño inicial es proporcionar un punto de partida para realizar la posterior optimización.

- En cuanto a las restricciones dimensionales de los tubos, han sido escogidos los siguientes valores para cada longitud expuesta en el apartado anterior. La elección ha sido aleatoria dentro de los límites establecidos.

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

- La **anchura** de la celda de seguridad es: **1550mm**.
 - La **altura** de la celda de seguridad es: **1450mm**.
 - La **altura del salpicadero** de la celda de seguridad es: **750mm**.
 - El **largo del salpicadero** de la celda de seguridad es: **750mm**.
 - El **largo de la cabina** de la celda de seguridad es: **750mm**.
 - La **anchura de la cabina** de la celda de seguridad es: **1350mm**.
 - La **altura del tirante longitudinal trasero** de la celda de seguridad es: **250mm**.
 - El **largo del tirante longitudinal trasero** de la celda de seguridad es: **800mm**.
 - La **altura inferior de la unión del refuerzo de las puertas con el semi-arco lateral** de la celda de seguridad es: **10mm**.
 - La **altura superior de la unión del refuerzo de las puertas con el semi-arco lateral** de la celda de seguridad es: **500mm**.
- Por otra parte, el material que va a ser utilizado para este diseño inicial es el **acero E470** cuyas características físicas aparecen en la tabla 1. La elección de este acero ha sido debida a que es el acero con características físicas intermedias entre los tres posibles.
 - Finalmente, todos los tubos que conforman la estructura de la celda de seguridad van a tener la misma sección. El motivo es la simplificación del diseño, ya que como los resultados solo van a ser orientativos, pero no significativos para el diseño final, se ha optado por escoger una única sección de tubo para toda la celda de seguridad. De las cinco secciones disponibles, las dos primeras se descartan ya que el arco principal no puede ser fabricado con esas secciones. Por tanto, de las tres restantes se ha escogido la sección denominada **50 x 2** cuyo diámetro exterior es de 50mm y el diámetro interior de 46mm. La elección de esta sección ha sido debido a que cuanto mayor es la sección, las tensiones resultantes son menores, y de esta forma tratar de que los resultados del análisis sean satisfactorios y cumplan la normativa FIA.

3.2 Modelo en ANSYS del diseño inicial

ANSYS es un programa informático que hace uso del MEF para resolver diferentes problemas. Desde, el análisis de flujo en una turbina hasta un análisis de comportamiento dinámico de una pieza, entre otros tipos de análisis. En general, este tipo de programas informáticos basados en el MEF se dividen en tres partes.

- El **pre-proceso** es donde se define la geometría, la generación de la malla (número de nodos y elementos y su distribución) y el tipo de elemento a emplear dependiendo de las necesidades del problema podrá ser unidimensional, bidimensional o tridimensional así como lineal, cuadrático, cúbico... También se asignan las propiedades de los materiales de la pieza (acero, aluminio, cobre, madera...). Del mismo modo se establecen las condiciones de contorno en la frontera del dominio del problema. En definitiva, en el pre-proceso se representa la situación del problema antes de su resolución.
- El **cálculo** es como su nombre indica, la resolución del problema aplicando el MEF. El programa genera las ecuaciones en función del número de incógnitas que han aparecido tras el pre-proceso. En algunos programas informáticos que se basan en el MEF como ANSYS existe la posibilidad de estimar el error de cálculo que se ha cometido, ya que el MEF ofrece una solución aproximada pero no exacta.
- El **post-proceso** es la representación de los resultados obtenidos en el cálculo. ANSYS ofrece una gran variedad de opciones para visualizar los resultados. En el post-proceso puedes obtener el valor de las tensiones y las deformaciones en los nodos o en los elementos, del mismo modo puedes estimar el error discretización del modelo. La representación de los resultados puede ser en un mapa de colores del modelo o vectorial. Además, estos resultados pueden ser exportados en formatos de lectura típicos lo que permite realizar un tratamiento posterior de los resultados con otro programa informático ajeno a ANSYS. La infinidad de posibilidades que ofrece ANSYS a la hora de obtener resultados tras el cálculo hace que se tan adecuado para la realización de este trabajo y su interacción con Matlab.

A continuación se exponen todos los pasos que se han seguido en el pre-proceso para representar los problemas de tensiones que se plantean para el diseño inicial ya que se van a realizar los dos tipos de ensayos estáticos que determina la normativa FIA. Tras realizar todos los pasos necesarios del pre-proceso se mostrarán los resultados obtenidos en el post-proceso que indicarán si el diseño inicial sería apto para construir de acuerdo a la normativa FIA.

3.2.1 Tipo de análisis

El tipo de análisis que se va a realizar es un **análisis estructural estático considerando plasticidad**, ya que la normativa FIA establece que los ensayos deben ser estáticos y no superar la tensión límite de rotura. Al tratarse de un análisis en régimen no lineal del material debemos tener en cuenta que el sistema de ecuaciones que obtenemos de nuestra discretización es no lineal y por tanto ANSYS va a utilizar un algoritmo iterativo para resolver el problema. Esto conlleva dos inconvenientes, los recursos computacionales que necesita son superiores a los de un análisis lineal y el algoritmo iterativo puede no converger y por tanto no llegar a una solución.

Sin embargo, si el problema se define de forma correcta, las necesidades computacionales no deben ser excesivamente elevadas y tampoco debe haber problema para converger a una solución. Aunque si finalmente apareciera algún problema tanto de tiempo computacional o de no convergencia en una solución se resolvería ajustando el modelo inicial realizado en el pre-proceso, o los parámetros de ajuste del solver iterativo, para resolver los problemas que hubiesen surgido.

3.2.2 Caracterización del material

Para el análisis estructural estático no lineal que se realiza es necesario introducir en ANSYS las características mecánicas del material, en este caso el acero E470. En la sección de post-proceso de ANSYS se introduce un nuevo modelo de material.

Primeramente, se introduce la densidad del material que es 7850kg/m^3 . A continuación se introducen las características lineales del acero escogido que se definen por el coeficiente de Poisson cuyo valor es 0,3 y su módulo de Young de valor 205GPa .

Finalmente, se caracteriza el acero E470 como un material bilineal isótropo para representar el comportamiento plástico del material. Para crear el modelo bilineal es necesario introducir en ANSYS la tensión límite de la zona elástica 430MPa y el módulo tangente del material cuyo valor es de 1450MPa . En la figura 22 se muestra como representa ANSYS el modelo bilineal de un material inelástico como el acero E470.

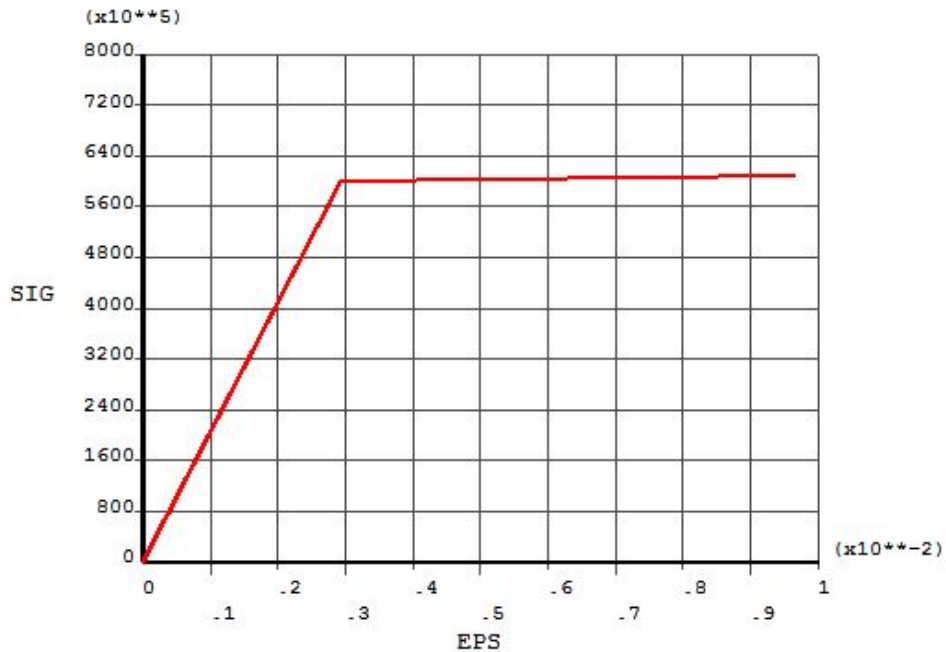


Figura 22. Gráfica tensión deformación del modelo bilineal del acero E470 en ANSYS

3.2.3 Tipo de elemento

La elección del tipo de elemento que va a ser utilizado es muy importante. Del tipo de elemento que sea escogido depende la complejidad del cálculo del problema y si la solución es aceptable o no. Los elementos más comunes son los triángulos y los cuadriláteros y sus equivalentes en 3D (tetraedro y cubo). Para un problema como el planteado en este proyecto lo más adecuado sería usar un elemento tetraédrico o cúbico.

Sin embargo, para el problema del estudio de una celda de seguridad se puede hacer uso de otro tipo de elemento denominado BEAM ya que los perfiles utilizados son de sección constante. Estos elementos BEAM son capaces de simular el comportamiento de sección constante utilizando mallados 1D. Por ello, este tipo de elementos permite tratar modelos en 3D con un coste computacional muy inferior al que se necesitaría en caso de usar elementos 3D.

Por tanto, el elemento utilizado para este análisis ha sido el **BEAM 188** cuya función de forma es lineal (2 nodos).

Por otra parte, para hacer uso de este tipo de elementos se debe definir el tipo de sección que debe formarse. Para ello ANSYS en su pre-proceso contempla la opción de escoger una sección predefinida en su librería o la opción de crear una nueva. En este caso, se ha optado por crear una sección nueva cuya forma es una circunferencia hueca cuyo radio exterior y radio interior son los escogidos en el apartado 3.1. Además se ha establecido un mallado de la sección en 10 elementos.

3.2.4 Geometría

Definida la geometría en el punto apartado 3.1, se debe trasladar a ANSYS. Como ya ha sido comentado, se va realizar un modelo 1D basado en líneas que representan los tubos de la celda de seguridad. Más tarde, durante el mallado y la asignación a esas líneas de elementos tipo BEAM se le conferirá al modelo la tridimensionalidad necesaria para el análisis estructural que se pretende realizar. Para crear el modelo con líneas se siguen una serie de pasos.

- Definición de los keypoints por localización de coordenadas. Conociendo las dimensiones del diseño inicial de la celda de seguridad se crean tantos keypoints sean necesarios para definirla.
- Unión de los keypoints mediante lines. Se unen todos los keypoints para crear la estructura de la celda de seguridad. Esta estructura aún no tiene la geometría adecuada para ser ensayada.
- Establecer los radios de acuerdo. Las curvaturas de la celda de seguridad vienen definidas por los radios de acuerdo que se establecieron en el apartado 2.3. Cuando se realiza esta operación se crea una nueva línea y dos nuevos *keypoints* que indican el inicio y el fin del arco de curvatura creado.
- Operación booleana división de línea por otra línea. Los refuerzos del techo, trasero, de las puertas y del parabrisas intersectan unos tubos con otros. Para que ANSYS reconozca la unión entre esas líneas, y no considere que son líneas independientes, se debe dividir una línea por la intersección de la otra. Al realizar esta operación se elimina una de las dos líneas de la intersección y se crea un nuevo *keypoint* en la línea que queda
- A continuación se crean dos líneas nuevas que suplen a la que ha sido eliminada, pero estas dos nuevas líneas tienen en común el punto de intersección que ha sido creado en la línea no ha sido eliminada en el paso anterior. De esta forma se modelan las uniones entre tubos que se intersectan en ANSYS.

Siguiendo los pasos anteriormente descritos y con las dimensiones previamente establecidas obtenemos un modelo de una celda de seguridad en ANSYS como se muestra en la figura 23. Los *keypoints* generados en el primer paso son un número menor de los *keypoints* finales ya que con las siguientes operaciones se han creado nuevos. Con las líneas ocurre lo mismo.

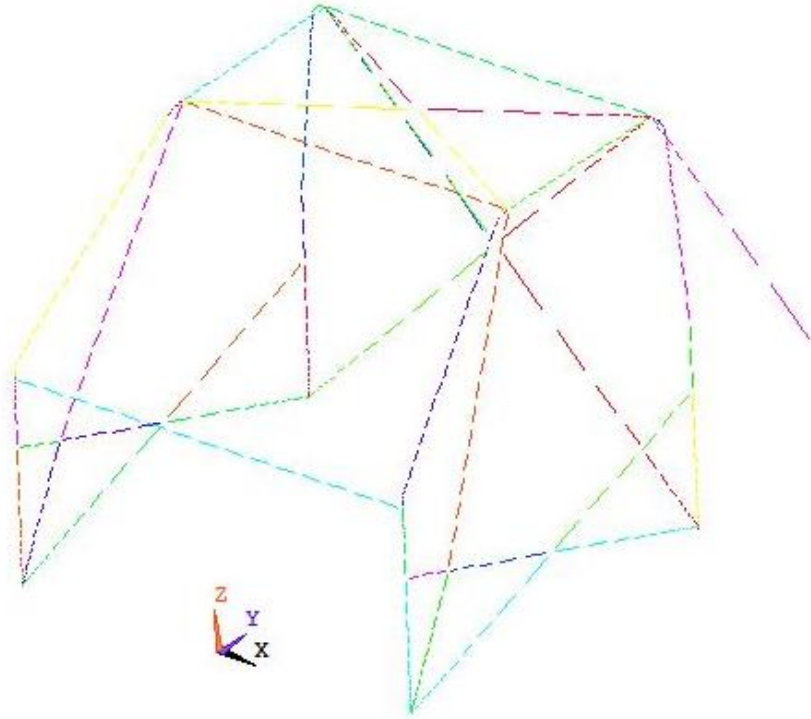


Figura 23. Geometría del modelo inicial en ANSYS

- El número de *keypoints* que aparecen en el modelo es: **46**
- El número de *lines* que forman el modelo es: **57**

3.2.5 Mallado de la pieza

Una vez definida la geometría del modelo a analizar se debe proceder al mallado del mismo. En este proyecto se hace uso de la versión académica de ANSYS por lo que existe una limitación de elementos que pueden ser definidos. Por ello se va a realizar un mallado adaptativo, con el fin de minimizar errores de cálculo y mallados deficientes, manteniendo un número bajo de elementos. Las uniones entre tubos y los arcos de curvatura van a tener un mallado más pequeño que las secciones centrales de los tubos, ya que la solución es más compleja y los concentradores de tensiones se encuentran situados en estos puntos.

Como ha sido comentado anteriormente, durante el mallado debemos definir que todas las líneas deben ser malladas con el elemento BEAM 188 definido previamente, así como con la sección tipo de acuerdo a las medidas del tubo a utilizar (50x2mm).

Desde la barra de herramientas que ofrece ANSYS cuando se va a realizar el mallado, seleccionamos todas las características que han sido comentadas en este apartado. El modelo una vez ha sido mallado es el que aparece en la figura 24.

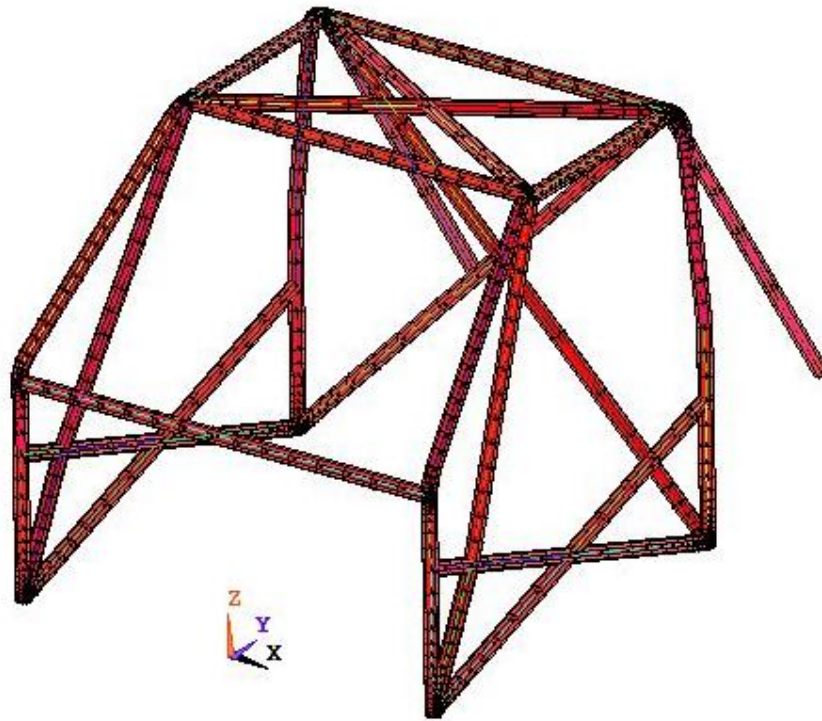


Figura 24. Mallado del modelo inicial en ANSYS

- El número de *elementos* que forman el modelo es: **593**
- El número de *nodos* que forman el modelo es: **576**

3.2.6 Condiciones de contorno

En el caso de este proyecto, las condiciones de contorno vienen impuestas por la normativa FIA [4]. En ella se especifican los ensayos que se realizan, es decir, el valor de las fuerzas que deben ser aplicadas así como el lugar donde son aplicadas. De igual forma se establece que partes de la estructura de la celda de seguridad tienen restringidos movimientos.

3.2.6.1 Fuerza gravitatoria

En el reglamento de la FIA [4] en el que se establecen las condiciones de los ensayos se especifica que la acción de la fuerza de la gravedad no se ha tenido en cuenta para calcular la fuerza que debe ejercer la prensa que realiza el ensayo. No obstante, si se quiere simular en ANSYS el ensayo real con la prensa se debe tener en cuenta la fuerza gravitatoria que afecta a la estructura.

De este modo, en el pre-proceso de ANSYS se debe indicar la acción de la fuerza gravitatoria en la dirección Z negativa de acuerdo al sistema de coordenadas empleado.

3.2.6.2 Restricciones de desplazamiento

De acuerdo al reglamento FIA [4] la celda de seguridad debe contar con seis apoyos anclados al chasis estructural del vehículo. Estos seis apoyos se sitúan en la parte inferior de la celda de seguridad. En dichos apoyos, la bancada del ensayo restringe muy significativamente cualquier tipo de movimiento posible, por ello en ANSYS se le asigna un valor de cero a los todos los desplazamientos en los nodos que pertenecen a los apoyos. En la figura 25 se muestran los apoyos de la celda de seguridad.

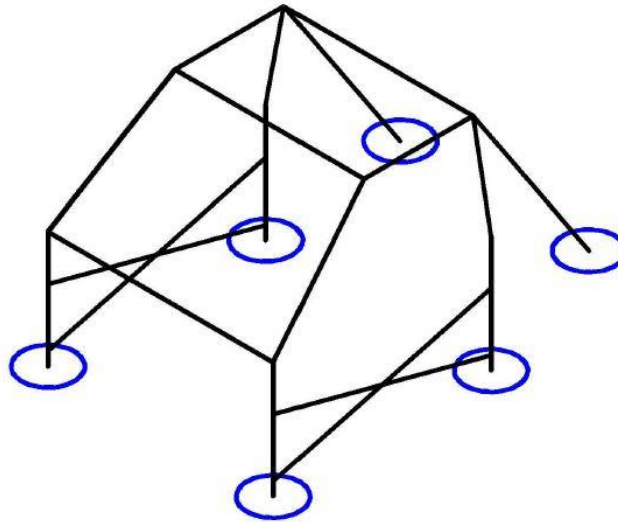


Figura 25. Apoyos de la celda de seguridad

3.2.6.3 Modelado de las cargas del ensayo 1

Para el primer ensayo se deben seguir las pautas expuestas en el apartado 2.1.2. La fuerza que debe ser aplicada para la celda de seguridad que se está estudiando en este proyecto es de **169875N**. Representar este ensayo en ANSYS con la prensa no es posible, ya que nuestro modelo es en realidad un modelo en 1D como ya ha sido explicado y por tanto no puede interactuar de forma correcta con una pieza en 3D como sería la prensa. Por tanto, se debe realizar una aproximación de la aplicación de la carga. Para ello se puede proceder de diversas formas.

Por un lado, se puede distribuir la fuerza por toda la barra superior del arco principal, como lo haría la prensa. Sin embargo esta opción no es viable ya que la barra superior del arco principal se comporta como una viga bi-apoyada lo que provoca grandes deformaciones y tensiones en el centro de la barra comparado con su comportamiento en los extremos. Este resultado no es real ya que en el ensayo físico cuando se aplica la carga, la barra superior y el elemento de la prensa se encuentran en contacto sólo en los extremos, siendo este último de una rigidez elevadísima por lo que no sufre deformaciones en el centro, mientras que la barra del arco principal sí que se deforma.

Descartada la distribución de la carga sobre toda la barra superior del arco principal, la otra opción razonable es aplicar la carga en los extremos de la barra superior del arco principal. Procediendo de esta forma se consiguen unos resultados bastante más coherentes que en el caso anterior, ya que el arco principal en su parte superior no sufre deformaciones exageradas ya que la prensa no contacta con la zona central de la barra superior del arco principal y sus elementos verticales son los que soportan el mayor esfuerzo, como es lógico.

Por tanto, para la aplicación de la carga lo que se va a realizar es aplicar sobre los dos nodos de la barra superior del arco principal la mitad de la fuerza establecida para este ensayo, como se muestra en la figura 26. De esta forma, aplicando **84937,5N**, en dirección Z negativa, en cada nodo (hay dos) obtenemos una aproximación válida de la fuerza que aplicaría la prensa en un ensayo físico real de la celda de seguridad.

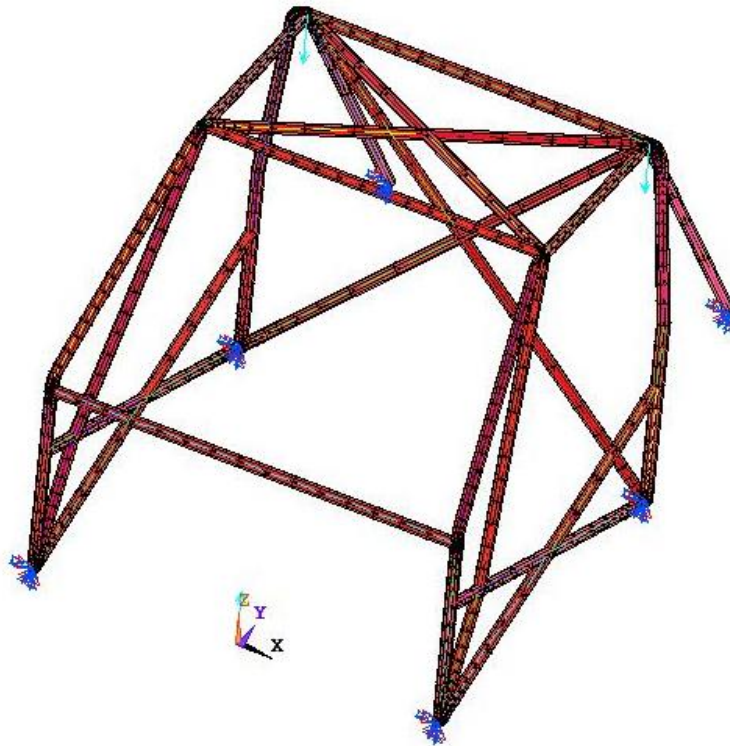


Figura 26. Cargas ensayo 1

3.2.6.4 Modelado de las cargas del ensayo 2

De igual forma que para las cargas del ensayo 1, en este caso también debemos hacer una adaptación del comportamiento de la prensa para nuestro modelo. De nuevo, la prensa del ensayo real no puede ser representada en el modelo de ANSYS, por ello se debe aplicar la fuerza que ejercería la prensa sobre los nodos correspondientes del modelo de ANSYS de la celda de seguridad.

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

En este caso, como se puede apreciar en el apartado 2.1.3 y en la figura 8, debido a su posición según la normativa el elemento de la prensa que transmite la carga a la celda de seguridad solo está en contacto con ésta en la parte superior de la curvatura del semi-arco lateral. Por tanto, en el modelo en ANSYS del ensayo se ha decidido aplicar la carga en el nodo adjunto al *keypoint* que pertenece al punto de unión del semi-arco lateral con las barras del refuerzo del parabrisas, del refuerzo del techo y el miembro transversal superior, como se muestra en la figura 27. La carga solo se aplica a un lado de la estructura.

Sobre este nodo se aplica la fuerza de **79275N** que ha sido calculada en el apartado 2.1.3. La fuerza aplicada no corresponde solo a una dirección de los ejes de coordenadas, por tanto a continuación se descompone la fuerza en las tres direcciones de los ejes de coordenadas para poder introducir la fuerza de forma correcta en ANSYS.

- La fuerza que debe ser aplicada en la dirección X es:

$$F_x = -F \cdot \sin(25^\circ) = -79275 \cdot \sin(25^\circ) = \mathbf{33514N}$$

- La fuerza que debe ser aplicada en la dirección Y es:

$$F_y = F \cdot \cos(25^\circ) \cdot \sin(5^\circ) = 79275 \cdot \sin(25^\circ) \cdot \sin(5^\circ) = \mathbf{6264N}$$

- La fuerza que debe ser aplicada en la dirección Z es:

$$F_z = F \cdot \cos(25^\circ) \cdot \cos(5^\circ) = 79275 \cdot \sin(25^\circ) \cdot \cos(5^\circ) = \mathbf{71597N}$$

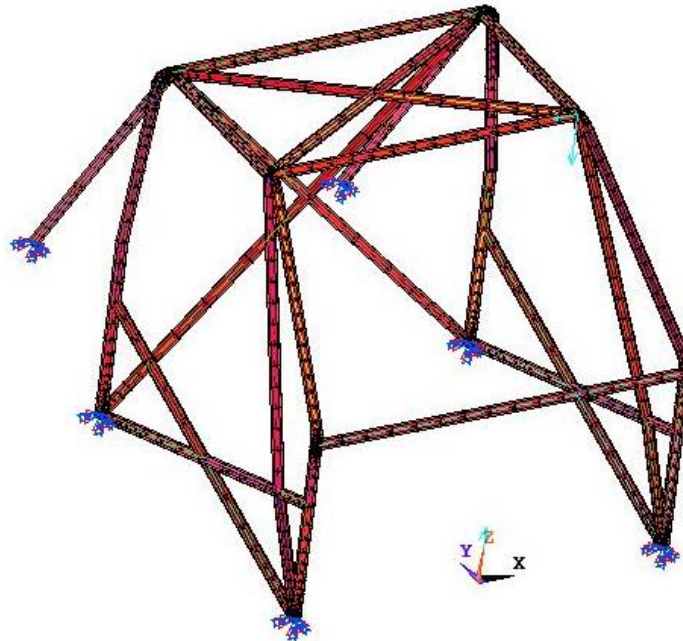


Figura 27. Cargas del ensayo 2

3.2.7 Resultados del ensayo 1

Una vez se han realizado todos los trabajos del pre-proceso se ejecuta la orden de cálculo para el ensayo 1, es decir teniendo en cuenta las cargas solo de ese ensayo. Como se había previsto, la solución ha convergido de forma rápida por lo que no han sido necesarios cambios en el modelo inicial.

El interés del estudio es conocer las tensiones provocadas por las cargas del ensayo y las deformaciones generadas. Para ello, desde el post-proceso de ANSYS se realiza por una parte un *plot* en pantalla de las tensiones equivalente de Von Mises, y por otra parte un *plot* de los desplazamientos que se han generado en el modelo.

3.2.7.1 Tensión equivalente de Von Mises

La tensión máxima equivalente de Von Mises que aparece tras el ensayo 1 es de **460MPa**, como se muestra en la figura 28. Teniendo en cuenta que la tensión de rotura del material es 600MPa, se puede asegurar que el diseño inicial cumple los requisitos del ensayo 1 en cuanto a tensiones máximas que se generan.

En cuanto a cómo se distribuyen las tensiones resultantes en el modelo se acepta que lo hace de forma lógica. La zona más afectada es el arco principal, ya que sobre él actúan las cargas del ensayo. Finalmente, se da por válido la modelización inicial del ensayo 1 en cuanto a los resultados de tensiones equivalentes de Von Mises.

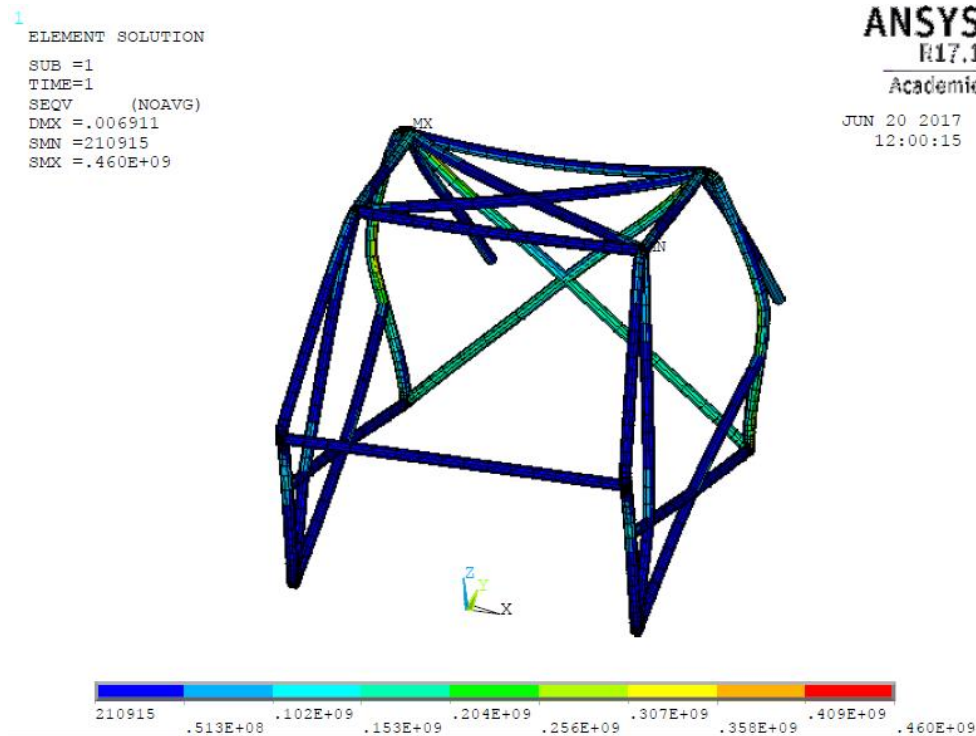


Figura 28. Tensión equivalente de Von Mises para el ensayo 1 del modelo inicial

3.2.7.2 Desplazamientos

Como se puede observar en la figura 29, el desplazamiento máximo que se produce en toda la estructura es de **6,9mm**, mientras que la normativa FIA establece que el desplazamiento máximo permitido tras aplicar las cargas del ensayo 1 es de 50mm.

Los desplazamientos que surgen tras aplicar las cargas del ensayo 1, al igual que las tensiones, no presentan ninguna anomalía aparente. De nuevo, la zona más afectada es el arco principal como se podía prever. Se concluye que el modelo inicial de la celda de seguridad y la modelización del ensayo 1 es correcto y por tanto válido.

```
1 DISPLACEMENT
SUB =1
TIME=1
DMX =.006911
```

ANSYS
R17.1
Academic

JUN 20 2017
12:03:55

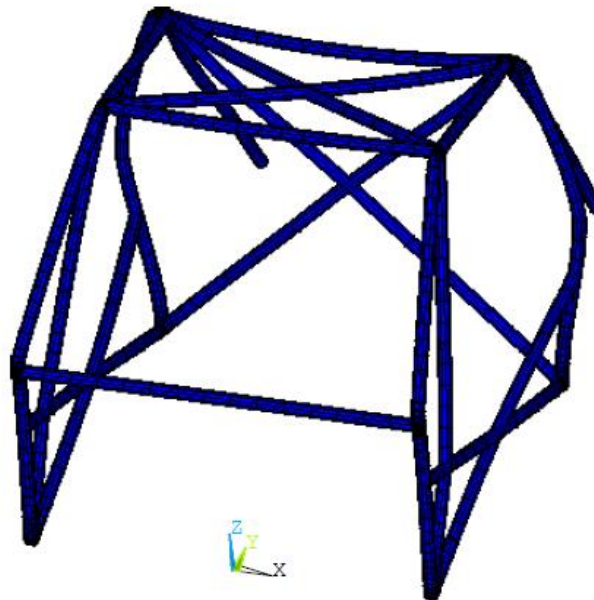


Figura 29. Desplazamientos provocados por el ensayo 1 en el modelo inicial

3.2.8 Resultados del ensayo 2

De igual forma que para conocer los resultados del ensayo 1, se ha realizado el cálculo del problema teniendo en cuenta solo las cargas del ensayo 2. Como ocurría con el ensayo 1, de nuevo la solución ha convergido de forma rápida por lo que no han sido necesarios cambios en el modelo inicial.

El interés del estudio es conocer las tensiones provocadas por las cargas del ensayo 1 y las deformaciones generadas. Para ello, desde el post-proceso de ANSYS se realiza por una parte un *plot* en pantalla de las tensiones equivalente de Von Mises, y por otra parte un *plot* de los desplazamientos que se han generado en el modelo.

3.2.8.1 Tensión equivalente de Von Mises

La tensión máxima equivalente de Von Mises que aparece tras el ensayo 2 es de **445MPa**. Teniendo en cuenta que la tensión de rotura del material son 600 MPa, se puede asegurar que el diseño inicial cumple los requisitos del ensayo 2 en cuanto a tensiones máximas que se generan.

En cuanto a las tensiones resultantes en el modelo, se puede apreciar en la figura 30 que no aparece ningún fenómeno extraño y que por tanto se acepta como válida la modelización del ensayo 2 para el diseño inicial. La zona más afectada por las cargas es el refuerzo del parabrisas, ya que la mayor fuerza aplicada coincide con la dirección de esta barra, y en sus extremos encontramos las tensiones máximas. También en la unión del semi-arco lateral con el refuerzo del parabrisas se distribuyen las tensiones afectando a todas las barras que se unen en ese punto.

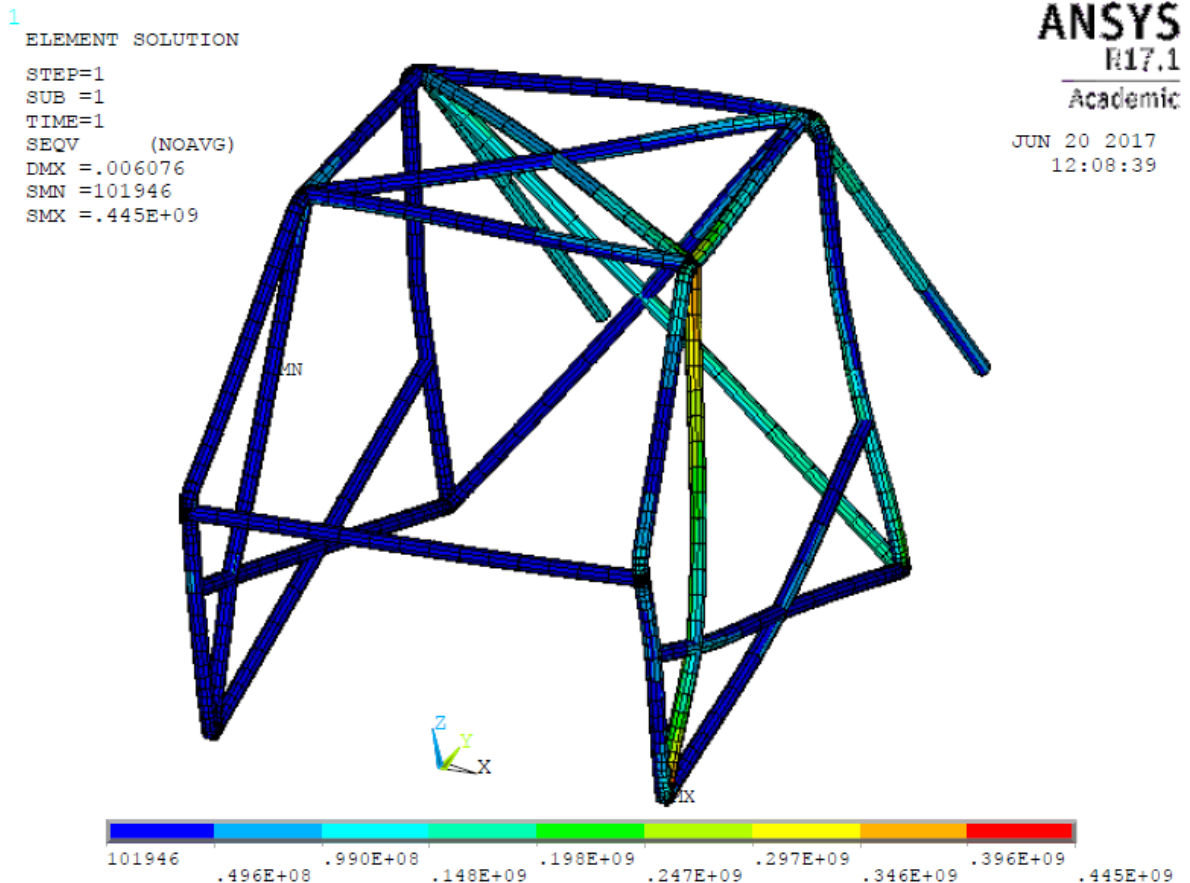


Figura 30. Tensión equivalente de Von Mises para el ensayo 2 del modelo inicial

3.2.8.2 Desplazamientos

Se puede apreciar en la figura 31 como la zona de aplicación de la carga del ensayo 2 queda totalmente deformada. Todas las barras que se unen en el punto de aplicación de la carga sufren una deformación importante. Como ocurría con las tensiones, el refuerzo del parabrisas es la barra que mayor desplazamiento sufre, llegando a afectar al refuerzo de la puerta de ese mismo lado de la celda de seguridad.

Sin embargo, se produce un menor desplazamiento máximo que en el caso del ensayo 1, siendo para el ensayo 2 un poco más de **6mm**, a pesar de que la normativa FIA contempla para este caso un desplazamiento máximo de 100mm. Por tanto la modelización del ensayo 2 para el modelo inicial es aprobada

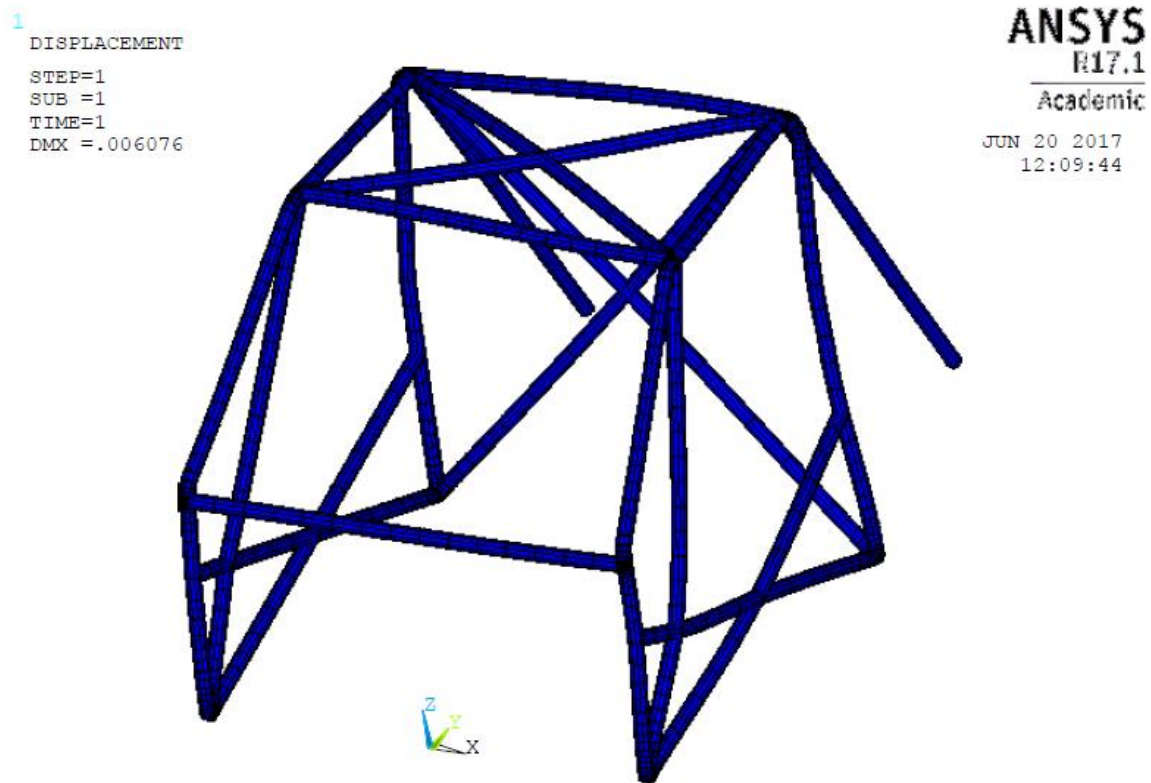


Figura 31. Desplazamientos provocados por el ensayo 2 en el modelo inicial

3.2.9 Conclusiones del modelo inicial

Para este primer diseño inicial el peso de la celda de seguridad es de **736,97N**, lo que conlleva un peso de la estructura de la celda de seguridad de **75,2kg**.

Los resultados obtenidos han sido coherentes y por tanto se puede proceder al siguiente paso de este proyecto, que consiste en la parametrización y automatización del modelo inicial para que pueda ser optimizado.

4. AUTOMATIZACIÓN DEL MODELO EN ANSYS

Cuando se va a realizar diversos análisis en ANSYS que son muy similares entre sí se hace uso de las llamadas macros. Una macro de ANSYS son líneas de código en el que se basa ANSYS escritas en un archivo (generalmente .mac, .txt. o .dat) para que ANSYS las ejecute como si de una sub-rutina se tratase. Su principal función es la de agilizar el trabajo, ya que si necesitas realizar varios análisis a una misma geometría, la construcción de ésta en el pre-proceso la puedes realizar con una macro.

En este proyecto, la macro es una parte fundamental del mismo, ya que ésta debe estar definida del tal forma que al ser ejecutada en un archivo nuevo de ANSYS se realicen todos los pasos que han sido explicados en el apartado 3 hasta llegar a obtener los resultados del análisis en un archivo externo al de ANSYS. Cuando de un proceso de optimización se trata, el optimizador (Matlab), propone nuevos parámetros para el modelo. El uso de una macro en este contexto es muy útil ya que permite la construcción de nuevos modelos de forma desatendida.

Por ello, en este apartado del proyecto se van a explicar los distintos pasos que son necesarios para parametrizar el modelo de la celda de seguridad a partir del diseño inicial que ha sido realizado.

Para ello el primer paso será establecer los parámetros con los que se va a trabajar. Los parámetros que serán establecidos deben ser capaces de recrear el modelo inicial realizado junto con una infinidad de modelos más que deben ser igual de válidos. Por tanto, la tarea de parametrización del modelo debe ser clara, coherente y aplicable al modelo de la celda de seguridad que ha sido propuesto en este proyecto.

Una vez sean establecidos los parámetros del modelo se procederá a escribir la macro en función de éstos. Para la escritura de la macro se hará uso de la ayuda que ofrece ANSYS para entender y aplicar todos los comandos que sean necesarios. La escritura de la macro se debe realizar de forma coherente ya que ANSYS ejecutará la macro leyendo línea a línea. Del mismo modo, se debe contemplar todos los pasos desde el inicio del análisis hasta la obtención de los resultados ya que no se va a interactuar con la GUI de ANSYS.

Se debe tener en cuenta que los valores de los parámetros se van a introducir de forma externa en ANSYS. Estos valores reciben el nombre de argumentos de la macro. Estos argumentos se definen en la macro como *Arg1*, *Arg2*, *Arg3*, etc. Todos los parámetros de la macro son función de estos argumentos, siendo posible que varios parámetros sean función de un solo argumento.

4.1 Parametrización del modelo

La parametrización del modelo inicial debe tener en cuenta todas las posibilidades de diseño que resultaron disponibles en el apartado 2.

Los parámetros del modelo se van a nombrar de forma alfabética, comenzando por la letra A. Si bien es cierto, que nombrar a cada parámetro con una abreviación de aquello que representa es una buena forma de hacerlo, se ha decidido a nombrarlos de forma alfabética debido a su elevado número (más de 15) y a la similitud entre algunos que hacia complicado establecer abreviaturas diferenciadas entre ellos.

Por otra parte, también se debe tener en cuenta la dependencia de los parámetros respecto de los argumentos que se introducen en la macro. Es un hecho importante éste ya que estos parámetros no serán introducidos en la macro como valores externos, si no que su valor se generará en la propia macro a partir de los argumentos que sí son introducidos en la macro de forma externa.

Del mismo modo, hay que contemplar la existencia de dos tipos de parámetros. Por un lado se encuentran aquellos parámetros necesarios para definir la geometría del modelo los cuales pueden ser considerados continuos ya que pueden tomar infinitos valores dentro de un rango de valores, aunque para la optimización se limitara el número de valores para ahorrar costes computacionales. Por otro lado, se encuentran los parámetros discretos como son las propiedades mecánicas de los materiales las cuales son valores discretos ya que se utilizan materiales comerciales.

Por tanto, en la parametrización del modelo se van a distinguir dos partes. Primeramente se van a establecer los parámetros que definen el modelo. Y a continuación se van a establecer el rango de valores o los valores que puede tomar cada parámetro y su dependencia respecto de los argumentos.

4.1.1 Parámetros del modelo

Como ha sido comentado anteriormente, los parámetros van a ser nombrados de forma alfabética comenzando por la letra A.

Los primeros parámetros que se van a definir son los relacionados con la geometría:

- El parámetro **A** hace referencia a la mitad de la **anchura** de la celda de seguridad.
- El parámetro **B** hace referencia a la **altura** de la celda de seguridad.
- El parámetro **C** hace referencia a la **altura del salpicadero** de la celda de seguridad.

- El parámetro **D** hace referencia al **largo del salpicadero** de la celda de seguridad.
- El parámetro **E** hace referencia al **largo de la cabina** de la celda de seguridad.
- El parámetro **F** hace referencia a la **altura del tirante longitudinal trasero** de la celda de seguridad.
- El parámetro **G** hace referencia al **largo del tirante longitudinal trasero** de la celda de seguridad.
- El parámetro **H** hace referencia a la **altura inferior de la unión del refuerzo de las puertas con el semi-arco lateral** de la celda de seguridad.
- El parámetro **I** hace referencia a la mitad de la **anchura de la cabina** de la celda de seguridad.
- El parámetro **J** hace referencia a la **altura de la curva del semi-arco lateral a la altura del salpicadero** de la celda de seguridad.
- El parámetro **K** hace referencia al **largo de la curva del semi-arco lateral a la altura del salpicadero** de la celda de seguridad.
- El parámetro **L** hace referencia a la **anchura de la curva del arco principal** de la celda de seguridad.
- El parámetro **M** hace referencia a la **altura superior de la unión del refuerzo de las puertas con el semi-arco lateral** de la celda de seguridad.

Una vez definidos los parámetros geométricos, se procede a establecer los parámetros de los materiales que se van a utilizar. Nótese que los parámetros O y P no se van a definir porque hacen referencia al precio y la tensión de rotura de los tubos de acero, estos datos no son necesarios para ANSYS pero si para el algoritmo genético.

- El parámetro **N** hace referencia al **límite elástico** del acero que se va a utilizar como material para la celda de seguridad.
- El parámetro **Q** hace referencia al **radio interior** de la primera sección de tubo que se define.
- El parámetro **R** hace referencia al **radio exterior** de la primera sección de tubo que se define.
- El parámetro **S** hace referencia al **radio interior** de la segunda sección de tubo que se define.

- El parámetro **T** hace referencia al **radio exterior** de la segunda sección de tubo que se define.
- El parámetro **U** hace referencia al **radio interior** de la tercera sección de tubo que se define.
- El parámetro **V** hace referencia al **radio exterior** de la tercera sección de tubo que se define.

Todos los parámetros anteriores aparecerán en la macro que se va a realizar.

4.1.2 Rango de valores para los parámetros y argumentos

Como se ha realizado en el punto anterior, se va a distinguir entre los parámetros que definen la geometría y los que definen el material y las secciones de los tubos. En las siguientes dos tablas se definen de forma clara los argumentos de las macros, los parámetros, la dependencia de cada parámetros de los argumentos y los valores que pueden tomar los argumentos.

De esta forma, los argumentos y sus rangos de valores que hacen referencia a la geometría son los mostrados en la tabla 3:

Argumento	Valor argumento
1	0,7 – 0,8
2	1,4 – 1,55
3	0,65 – 0,75
4	0,65 – 0,75
5	0,75 – 0,85
6	0,2 – 0,4
7	0,7 – 0,8
8	0 – 0,1

Tabla 3. Argumentos geométricos del modelo automatizado de ANSYS

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

Los argumentos anteriormente expuestos se relacionan con los parámetros geométricos que han sido establecidos como se muestra en la tabla 4.

Parámetro	Argumento
A	Arg 1
B	Arg 2
C	Arg 3
D	Arg 4
E	Arg 4 + Arg 5
F	Arg 6
G	Arg 4 + Arg 5 + Arg 7
H	Arg 8
I	Arg 1 - 0,125
J	Arg 3 + 0,05
K	Arg 4 - 0,05
L	Arg 1 - 0,075
M	Arg 8 + 0,49

Tabla 4. Relación parámetros geométricos y argumentos

Se debe tener en cuenta que para los parámetros físicos del material a utilizar y las secciones de tubo a utilizar los argumentos corresponden directamente con los parámetros. Es decir, que cada parámetro tiene el valor exacto de un argumento y que cada argumento solo afecta a un parámetro. Por tanto se establecen las relaciones y valores posibles para cada pareja de parámetro y argumento en la tabla 5.

Parámetro	Hace referencia a	Argumento	Posibles valores del argumento
N	Límite elástico	9	$3,55 \cdot 10^8$ / $4,3 \cdot 10^8$ / $7 \cdot 10^8$
Q	Radio interior. Sección 1	10	0,02 / 0,0215 / 0,023
R	Radio exterior. Sección 1	11	0,0225 / 0,024 / 0,025
S	Radio interior. Sección 2	12	0,0165 / 0,018 / 0,02 / 0,0215 / 0,023
T	Radio exterior. Sección 2	13	0,019 / 0,02 / 0,0225 / 0,024 / 0,025
U	Radio interior. Sección 3	14	0,0165 / 0,018 / 0,02 / 0,0215 / 0,023
V	Radio exterior. Sección 3	15	0,019 / 0,02 / 0,0225 / 0,024 / 0,025

Tabla 5. Relación parámetros físicos y argumentos

Cuando se trabaja con el código de ANSYS, éste no reconoce las unidades de las distintas magnitudes. Por tanto, se debe tener especial cuidado en trabajar siempre con las mismas unidades, por ello todos los parámetros tienen unidades del SI.

Una vez han sido definidos todos los parámetros de la macro y se han establecido las relaciones entre los parámetros y los argumentos se puede proceder a escribir todo el código de comandos necesario para realizar la macro.

Como se ha dicho anteriormente, se debe tener especial cuidado a la hora de diferenciar entre parámetros y argumentos. Los segundos son valores externos que le son dados a la macro, mientras que los parámetros son valores que son función de los argumentos. Del mismo modo, la macro es dependiente directamente de los parámetros ya que es con éstos con los que se realizan los comandos.

4.2 Macro para ANSYS del modelo

Una vez se conocen los argumentos de entrada a la macro y el modelo inicial ha sido parametrizado, la macro se escribe siguiendo los mismos pasos que se realizaron para definir el modelo inicial. En los anexos A.1, A.2 y A.3 del presente documentos se encuentran las tres macros realizadas.

Durante la escritura de la macro se van a realizar comentarios en la propia macro con el fin de ayudar a su interpretación, realizar aclaraciones para facilitar su lectura así como la búsqueda de errores o localizar partes que deban ser modificadas. Del mismo modo se va a estructurar en distintas partes para distinguir de forma clara los pasos que se van a ir siguiendo durante la realización de la misma. De esta forma, la macro va a ser estructurada en los siguientes sub-apartados:

1. Definición del elemento a utilizar, propiedades del material y secciones.
2. Definición de la geometría.
3. Mallado de la pieza.
4. Condiciones de contorno.
5. Solve.
6. Obtención de datos.

También se debe tener en cuenta que se van a realizar dos ensayos y se quiere conocer el peso de la estructura tubular de la celda de seguridad. Esto implica que se deben realizar tres macros distintas, una para cada ensayo y otra para el peso. Esto es debido a que las condiciones de contorno varían para cada caso, pero el resto de la macro, que es prácticamente toda, es igual en los tres casos. Por tanto, se van a realizar tres macros muy similares, con la única diferencia de que algunas condiciones de contorno variarán y la recogida de datos para el peso también será distinta que para los ensayos. Por ello, solo en las condiciones de contorno y en la obtención de datos se especificará para cada macro sus condiciones particulares, siendo el resto de partes de la macro comunes para las tres.

Para escribir todo el código de las tres macros se debe utilizar el lenguaje de programación que usa ANSYS [7]. También se va a tomar como referencia y ayuda el archivo .log que generó ANSYS durante la realización del modelo inicial en el cual aparecen todos los pasos ejecutados en la GUI de ANSYS en forma de comandos.

Por otra parte, los argumentos en la macro son introducidos habitualmente de forma manual a través de la GUI de ANSYS. Sin embargo, en este proyecto la macro no va a ser ejecutada en la GUI, ya que no debe haber interacción entre el ordenador y la persona para realizar la optimización con algoritmos genéticos. Por ello, los argumentos van a ser leídos mediante un comando escrito en la macro. Estos argumentos son valores que va a generar el algoritmo genético de Matlab y van a ser guardados en un archivo .dat. Este archivo .dat va ser leído por ANSYS con el comando *VREAD* y almacenados sus valores en una matriz previamente creada. A continuación se muestran las líneas de código que realizan esta operación.

```
NVARIA=16
*DIM,VV,ARRAY,NVARIA,1,1
*VREAD,VV,'VARIABLE','DAT',,KJI,1,1,NVARIA
(G15.5)
```

Una vez han sido leídos los argumentos desde un archivo externo a ANSYS y guardados en la matriz tan solo se debe indicar el puesto del argumento en la matriz. Un ejemplo es, para el parámetro N le corresponde *VV(9,1,1)*.

4.2.1 Definición del elemento a utilizar, propiedades del material y secciones.

En la primera parte de la macro se encuentran las líneas de código que definen el elemento a utilizar. En este caso, se utiliza el mismo elemento que en el modelo inicial que es el BEAM 188.

También se encuentran las líneas de código que definen las características físicas del material. Debe tenerse en cuenta que se trata de un análisis estático en régimen de plasticidad. Por tanto se debe indicar que el análisis no es lineal. Del mismo modo, se escriben todas las características mecánicas del material que necesita ANSYS para crear su modelo bi-lineal como ocurría en el análisis inicial que ha sido realizado.

Por otra parte, se definen tres secciones diferentes con las que mallar el modelo. Esto es debido a la posibilidad permitida por la normativa de que existan diferentes secciones de tubo. De este modo se definen tres secciones en la macro las cuales son dependientes de los argumentos de entrada. Es decir, que el modelo que se realiza en la macro puede tener tres secciones de tubo diferentes pero también pueden tener todos los tubos la misma sección. Los argumentos del 10 al 15 definen los diámetros interiores y exteriores de las 3 secciones. Más adelante, cuando se realice el mallado se establece la sección que tiene cada barra o conjunto de barras.

4.2.2 Definición de la geometría

Para definir la geometría que ya ha sido parametrizada lo primero de todo es escribir todos los *keypoints* necesarios. El resultado es que las coordenadas de todos los *keypoints* son parámetros o cero.

A continuación como ocurría con el modelo inicial, se unen los *keypoints*, de uno en uno, de forma coherente con líneas rectas.

Una vez han sido definidas todas las líneas rectas se realizan las curvaturas del arco principal y de los semi-arcos laterales que fueron definidas en el modelo inicial y más tarde parametrizados sus puntos de curvatura. Para la realización de esta operación se hace uso del comando de ANSYS *Line Fillet* en el que se indica qué rectas se deben unir formando una curva y con qué radio lo deben hacer. Tras finalizar todas las operaciones de curvatura, se realiza una re-numeración de los *keypoints* ya que se han creado nuevos, mientras que otros han sido eliminados a causa de utilizar la operación de *Line Fillet*.

Finalmente, para acabar de definir la geometría se deben definir de forma correcta las barras que conforman los distintos refuerzos. Cuando han sido definidas todas las líneas, las líneas de los refuerzos se encuentran superpuestas. Para solucionar esta problemática se actúa como se hizo en el modelo inicial. Se selecciona una barra que

conforma el refuerzo y se divide por el punto coincidente pero no compartido de la otra barra que forma el refuerzo. Con esto se consigue dividir una de las dos barras mientras que la otra es eliminada. En el lugar de la barra que ha sido eliminada ahora se crean dos barras nuevas que comparten el nuevo *keypoint* que ha sido creado. Las líneas de código que realizan esta operación para el refuerzo del techo son:

```
C*** REFUERZO TECHO
C***
LSBL,33,32
LSTR,13,30
LSTR,30,16
```

Con la definición correcta de los distintos refuerzos termina la parte de la macro donde se define la geometría.

4.2.3 Mallado del modelo

En el modelo inicial toda la estructura fue mallada con un único tipo de sección. Sin embargo, para el modelo parametrizado, como ya ha sido comentado, se van a realizar tres tipos de mallados ya que cada uno va a tener asociada una sección diferente.

Para mallar distintas partes de la estructura, lo primero que se va a hacer es definir el tipo de mallado que se quiere realizar y a continuación se seleccionan mediante comandos las líneas que van a ser malladas.

El primer mallado va a ser solo para el arco principal ya que es la barra de la celda de seguridad que tiene una sección mínima mayor que el resto. Por tanto el primer paso es seleccionar la sección que ha sido previamente definida en el punto 4.2.1 para esta barra. A continuación se define el tamaño de elemento que tendrá el mallado, se escoge realizar un mallado tipo inteligente con un valor de tres, este tipo de mallado es una opción ofrece ANSYS. Finalmente, se seleccionan las barras que forman el arco principal y se malla. A continuación se muestran las líneas de código que realizan la operación de mallado con una de las secciones definidas:

```
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 2
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,2
SMRT,6
SMRT,5
SMRT,4
SMRT,3
```


FLST,2,13,4,ORDE,5
FITEM,2,15
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,40
FITEM,2,-41
LMESH,P51X

Para el segundo mallado se va a proceder de la misma manera que ha sido explicada para el primero. El tamaño del elemento se mantiene igual que en el mallado anterior, sin embargo ahora se selecciona la siguiente sección de tubo definida. Para este segundo mallado se van a seleccionar las líneas que definen las barras que forman la estructura base de la celda de seguridad, sin tener en cuenta el arco principal, las cuales son:

- Los dos semi-arcos laterales.
- Los dos tirantes longitudinales traseros.
- Los dos miembros transversales que unen los semi-arcos laterales.

Finalmente, para el último mallado se selecciona la sección restante que ha sido definida. De nuevo, se mantiene el mismo tamaño de elemento utilizado en los dos mallados anteriores. En esta ocasión las líneas seleccionadas para ser malladas son las que forman las barras de los distintos refuerzos de la celda de seguridad que son:

- Las barras del refuerzo del techo.
- Las barras de los dos refuerzos del parabrisas.
- Las barras de los refuerzos de ambas puertas.
- Las barras del refuerzo trasero.

4.2.4 Condiciones de contorno

Para las condiciones de contorno se va a distinguir entre las que son comunes para las tres macros que se van a realizar y las que son individuales de cada macro. Las condiciones de contorno que son comunes a las tres macros son las restricciones de desplazamientos y la acción de la fuerza gravitatoria. Las restricciones de desplazamientos se realizan de igual forma que en el modelo inicial. Se seleccionan los nodos adjuntos a los *keypoints* de los puntos de anclaje de la celda de seguridad (figura 25). Una vez seleccionados estos nodos se define que el desplazamiento en todos ellos es igual a cero. Las líneas de código que realizan esta operación son:

```
FLST,2,6,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
/GO
DK,P51X,,,0,ALL,,,,,
```

La acción de la fuerza gravitatoria se define como una aceleración constante de valor 9,8 (no se expresan unidades como ya ha sido comentado anteriormente) en dirección Z negativa.

Una vez definidas las condiciones de contorno comunes a las 3 macros, las condiciones particulares de cada una son las siguientes:

- Para la macro que va a realizar el análisis del **ensayo 1** la condición de contorno particular es la aplicación de la carga correspondiente a dicho ensayo. Esta carga ya ha sido definida y es igual a la aplicada en el modelo inicial. Por tanto, para definir en la macro la carga primeramente se seleccionan los dos nodos sobre la que se va aplicar la carga. Estos nodos ya se definieron como aquellos nodos adjuntos a los *keypoints* situados en la barra superior del arco principal en sus extremos. Una vez seleccionados dichos nodos se aplica una fuerza de 84940 N en la dirección negativa del eje Z en coordenadas globales. En lenguaje de ANSYS se escribe como:

```
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,16
FITEM,2,31
/GO
FK,P51X,FZ,-84940
```

- Para la macro que va a realizar el análisis del **ensayo 2** la condición de contorno particular es la aplicación de las cargas de dicho ensayo. Se procede de igual forma que para la macro que contempla las cargas del primer ensayo. De igual forma que en el modelo inicial, se selecciona el nodo adjunto al *keypoint* que tienen en común el semi-arco lateral, el miembro transversal y el refuerzo del parabrisas de uno de los laterales de la celda de seguridad. Una vez seleccionado dicho nodo, en las tres direcciones de los ejes de coordenadas globales se aplican las tres fuerzas que conforman la carga del ensayo 2 de igual forma que se realizó en el modelo inicial.
- Para la macro con la que se obtiene el peso de la estructura de la celda de seguridad no se establece ninguna condición de contorno particular ya que solo son necesarias las dos condiciones de contorno que son comunes para todas las macros.

4.2.5 Obtención de los resultados

Los datos que se quieren obtener para las dos macros correspondientes a los dos ensayos son los mismos, mientras que para la macro del peso los datos que se quieren obtener son distintos.

Para las macros de los ensayos se quiere obtener la tensión máxima equivalente de Von Mises de toda la estructura. Para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Se define una matriz de una sola celda mediante el comando **DIM*.
2. Se obtiene el valor de la tensión máxima de Von Mises mediante el comando **get*.
3. Se escribe con el comando **Mwrite* en un archivo externo .txt la matriz que se ha definido en el primer paso.

También se quiere obtener el desplazamiento máximo en estas dos macros. Sin embargo, no existe un comando específico en ANSYS con el que obtener el desplazamiento máximo que se ha producido en toda la estructura. Por ello se ha optado por obtener todos los desplazamientos producidos en los nodos y con un post-tratamiento externo a ANSYS obtener de todos esos desplazamientos el que es máximo. Para obtener los desplazamientos en los nodos se han seguido una serie de pasos:

1. Se define una matriz de una sola celda, igual que en el caso anterior, para almacenar el número total de nodos.
2. Se obtiene el valor de cuantos nodos han sido generados durante el mallado mediante el comando **get*.
3. Se define una nueva matriz de tantas filas como número de nodos existen. El valor de las otras dimensiones de la matriz es uno.
4. Se crea un bucle con el comando *DO / ENDDO* con el cual obtener (**get*) el desplazamiento de cada nodo en particular y que ese valor sea guardado en la matriz definida en el paso anterior.
5. Se escribe con el comando **Mwrite* en un archivo externo .txt la matriz completada con los datos del paso anterior.

Para obtener el peso de la estructura se ha realizado una tercera macro. En esta tercera macro no se ha aplicado ninguna carga, la estructura solo se ve afectada por la acción de la fuerza gravitatoria. Para la obtención del peso de la estructura se va obtener la fuerza de reacción de los nodos a los que se ha restringido el desplazamiento anteriormente en la macro. La suma de las fuerzas de reacción en los distintos nodos es equivalente al peso de la estructura ya que solo se ve afectada por la fuerza gravitatoria. Para obtener las fuerzas de reacción en dichos nodos se han seguido una serie de pasos:

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

1. Se define una matriz de seis filas ya que son seis los nodos que tienen restringido el desplazamiento. El resto de dimensiones de la matriz tiene valor unitario.
2. Se obtiene la fuerza de reacción en cada nodo de forma individualizada mediante el comando **get*.
3. Se escribe con el comando **Mwrite* en un archivo externo .txt la matriz que se ha definido en el primer paso.

Las líneas de código en el lenguaje de ANSYS que realizan las operaciones para obtener el peso son:

```
C*** PESO
C***
*DIM,pesos,ARRAY,6,1,1
*GET,pesos(1,1,1),NODE,NODE(A,0,0),RF,FZ
*GET,pesos(2,1,1),NODE,NODE(-A,0,0),RF,FZ
*GET,pesos(3,1,1),NODE,NODE(A,E,0),RF,FZ
*GET,pesos(4,1,1),NODE,NODE(-A,E,0),RF,FZ
*GET,pesos(5,1,1),NODE,NODE(I,G,F),RF,FZ
*GET,pesos(6,1,1),NODE,NODE(-I,G,F),RF,FZ
*MWRITE,pesos,'peso','txt',,JIK
%G
```

Una vez se han definido en las macros las líneas de código necesarias para obtener los datos que necesita el algoritmo genético, se debe comprobar que se las tres macros funcionan correctamente y se da por concluida la automatización del modelo en ANSYS.

5. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

Durante el proyecto se ha realizado un diseño inicial de una celda de seguridad para un vehículo de la categoría T1 según la normativa FIA. Este diseño inicial ha sido sometido a varios análisis en ANSYS para comprobar que cumplía los requisitos de la normativa. Validado el diseño inicial, se ha procedido a la parametrización y automatización de dicho diseño, ya que el objetivo de este proyecto consiste en conseguir el diseño óptimo que cumpla la normativa al menor coste y peso posible. Finalmente, tras completar las tres macros que nos permiten generar y analizar un modelo de celda de seguridad en ANSYS sin tener que interactuar con la GUI, es decir que se realiza 100% de forma autónoma, solo queda definir la optimización del diseño y ejecutarla.

La optimización del diseño se va a realizar mediante un algoritmo genético que debe ser ajustado a las características del problema. Este algoritmo genético será implementado en Matlab, programa mediante el cual se va a interactuar con ANSYS de forma autónoma para realizar la optimización del diseño parametrizado de la celda de seguridad. La función de Matlab en el proceso de optimización es seleccionar mediante el algoritmo genético los valores de los argumentos que le son introducidos a las tres macros de ANSYS que han sido definidas en el apartado anterior.

Para ello, a lo largo de este apartado se va a realizar una pequeña introducción a los algoritmos genéticos, cómo funcionan y porque han sido escogidos para realizar esta optimización. Del mismo modo, se va a explicar todo el procedimiento que se va a seguir en Matlab para definir el algoritmo genético que va a ser utilizado, la función objetivo de la optimización y la interacción entre el propio Matlab y ANSYS para conseguir que todo el proceso de optimización sea 100% desatendido.

Finalmente, se expondrán los resultados extraídos de la optimización. Por un lado se tendrán los parámetros que definirán el diseño óptimo que se ha estado buscando. Por otro lado, tendremos el modelo optimizado de la celda de seguridad al que se le realizarán los ensayos definidos por la normativa FIA para analizar los resultados de tensiones y deformaciones resultantes. También, a diferencia del modelo inicial en el cual no se realizó, se hará un análisis de los costes teóricos aproximados del material utilizado para la celda de seguridad y del peso que tendría ésta si fuese fabricada de acorde a los parámetros obtenidos en este apartado. Este análisis se realiza ya que el objetivo del proyecto es conseguir una celda de seguridad que cumpla normativa FIA y que mantenga una relación coste de fabricación y peso lo más baja posible.

5.1 Algoritmo genético

Un algoritmo genético [8] es un método de búsqueda que imita la teoría de la evolución biológica de Darwin para la resolución de problemas de optimización. Para ello, se parte de una población inicial de la cual se seleccionan los individuos más capacitados para luego reproducirlos y mutarlos para finalmente obtener la siguiente generación de individuos que estarán más adaptados que la anterior generación. John Holland es quien en 1962 asienta las bases de lo que hoy se conoce como algoritmos genéticos.

Tras parametrizar el problema en una serie de variables, estos se codifican en un cromosoma. Todos los operadores utilizados por un algoritmo genético se aplicarán sobre poblaciones de ellos. En el algoritmo genético va implícito el método para resolver el problema. Una de las particularidades del algoritmo genético es que es independiente del problema, lo cual lo hace un algoritmo versátil, lo que resulta útil en cualquier ámbito de acción, pero a la vez débil, pues no está especializado en ninguno. El ambiente, constituido por todas las soluciones de una población, ejercerá una presión selectiva de forma que sólo los mejor adaptados (aquellos que resuelvan mejor el problema) sobrevivan o leguen su material genético a las siguientes generaciones, igual que en la evolución de las especies. La diversidad genética se introduce mediante mutaciones y reproducción sexual. Por lo tanto, un algoritmo genético consiste en hallar de qué parámetros depende el problema, codificarlos en un cromosoma, y aplicar los métodos de la evolución: selección y reproducción sexual con intercambio de información y mutaciones que generen diversidad.

Para la utilización de algoritmos genéticos se deben tener en cuenta una serie de parámetros:

- El **tamaño de la población** nos indica el número de cromosomas que tenemos en nuestra población para una generación determinada. En caso de que este valor sea insuficiente, el algoritmo genético tiene pocas probabilidades de realizar reproducciones lo que conllevaría una búsqueda de soluciones escasa y poco óptima. El tamaño de la población de un algoritmo genético debe ser lo suficientemente grande para garantizar su diversidad. Del mismo modo, la población es generalmente generada de forma aleatoria con el fin de garantizar la diversidad
- El **número de generaciones** nos indica el número de iteraciones que realiza el algoritmo genético. Se puede fijar un número máximo de iteraciones antes de finalizar el algoritmo genético o detenerlo cuando no se produzcan más cambios en la población (convergencia de la solución). Un bajo número de interacciones puede provocar una falta de reproducciones y por tanto no llegar a una solución óptima. Del mismo modo, un elevado número de generaciones puede provocar un empleo excesivo de tiempo de cálculo en soluciones redundantes. Por ello se debe intentar ajustar el número de generaciones acorde al tamaño del problema a resolver.

- La **probabilidad de cruce** es la frecuencia con la que se producen cruces entre los cromosomas padres, es decir la probabilidad de reproducción entre ellos.
- La **probabilidad de mutación** es la frecuencia con la que los genes de un cromosoma mutan. En caso de que exista mutación de un cromosoma, partes de este cromosoma descendiente son modificadas. La mutación contribuye a la diversificación genética de la especie.

La utilización de algoritmos genéticos para la resolución del problema de optimización planteado en este proyecto es debida a que las ventajas que presentan éstos frente a algoritmos tradicionales los hacen muy viables para su implementación en el proceso de optimización. Las ventajas más importantes son:

- Los algoritmos genéticos exploran todo el espacio de soluciones. Mientras que los algoritmos tradicionales solo exploran el espacio de soluciones en una única dirección. Es decir, los algoritmos genéticos no se ven afectados por los mínimos locales, mientras que los algoritmos de gradientes se pueden ver afectados por mínimos locales, lo que resulta en falsas soluciones.
- Los algoritmos genéticos usan operadores probabilísticos en contraposición a los operadores determinísticos de otros tipos de algoritmos.
- Los algoritmos genéticos no necesitan conocimientos específicos del problema. Su aplicación no está delimitada a un campo.
- Los algoritmos genéticos son muy buenos a la hora de manipular muchos parámetros simultáneamente por lo que resultan interesantes a la hora de resolver varios objetivos al mismo tiempo.

Por otra parte, los algoritmos genéticos presentan un inconveniente. La cantidad de análisis que se realizan es muy superior a los que se realizarían utilizando algoritmos de gradientes.

También se debe tener en cuenta que es muy importante definir unos valores de población, iteraciones, probabilidad de cruce y de mutación adecuados al problema. En caso contrario puede no encontrarse una solución (no converge o tarda mucho en converger) o una solución prematura debido a una falta de diversidad en la población.

5.2 Optimización del diseño con Matlab

La aplicación del algoritmo genético para resolver el problema de optimización que ha sido planteado en este proyecto se va a realizar mediante Matlab. Este programa incorpora una herramienta (toolbox) de algoritmos genéticos que facilita el trabajo, ya que solo es necesario establecer los parámetros básicos del algoritmo sin necesidad de programarlo desde el comienzo. Por tanto, se van a implementar dos funciones en Matlab.

Por un lado se tendrá una función que contendrá el algoritmo genético y en la que se definirán las variables del algoritmo que están relacionadas directamente con los argumentos de entrada de las tres macros. En esta misma función se parametrizará el algoritmo genético (población, generaciones, probabilidad de cruce y de mutación) para establecer unos valores adecuados que garanticen la convergencia del mismo.

Por otro lado, se definirá una función objetivo en la que se definirá la función a optimizar. En esta función objetivo se programará la interacción entre Matlab y ANSYS de forma que se consiga un proceso totalmente autónomo desde el momento que es lanzado el proceso de optimización.

5.2.1 Caracterización del algoritmo genético

La función de Matlab del algoritmo genético requiere que se defina una sub-rutina con la que se calculará la función objetivo. Es necesario establecer unos parámetros en la función del algoritmo genético para caracterizarla en base al problema de optimización que se pretende resolver. En el anexo A.4 se encuentra la caracterización del algoritmo genético que se ha realizado en Matlab.

Primeramente, es necesario determinar el número de variables que debe operar el algoritmo genético en paralelo. Estas variables deben contener todos los argumentos de entrada de las tres macros que han sido definidas en el apartado número 4 del presente proyecto. También se deben establecer los rangos de valores que debe manejar el algoritmo genético para cada variable.

Las ocho primeras variables del algoritmo genético coinciden con los ocho primeros argumentos que le son introducidos a las macros. Por tanto, estas ocho primeras variables corresponden a los parámetros geométricos del diseño de la celda de seguridad. La unidad de estas variables son los milímetros, así como los intervalos de valores que pueden tomar. Como en estos intervalos de valores, que ya fueron establecidos en el apartado 4.1.2, existen infinitos valores se ha optado por escoger valores cada 10 milímetros desde el valor mínimo hasta el máximo para cada variable, excepto para la octava variable que será cada 5 milímetros. De esta forma, las ocho primeras variables, el intervalo de valores que tiene cada una y el número de valores que puede tomar cada variable queda reflejado en la tabla 6.

Variable	Argumento	Intervalo de la variable (m)	Número de valores que puede tomar la variable
1	1	0,7 – 0,8	11
2	2	1,4 – 1,55	16
3	3	0,65 – 0,75	11
4	4	0,65 – 0,75	11
5	5	0,75 – 0,85	11
6	6	0,2 – 0,4	21
7	7	0,7 – 0,8	11
8	8	0 – 0,1	22

Tabla 6. Ocho primeras variables del algoritmo genético

Algunos argumentos de las macros son dependientes entre sí, ya que existe relación entre los diámetros internos y externos de los tubos del mismo modo que cada acero disponible tiene características mecánicas y precio distintos. Por ello, para el proceso de optimización se han tenido en cuenta estas dependencias entre los argumentos.

De esta forma, la variable número 9 del algoritmo genético hace referencia a las características físicas del material y su precio. Existen tres filas en la matriz de la variable 9, cada fila tiene asociado un valor índice con el cual trabaja el algoritmo. En la tabla 7 se muestra como queda definida la matriz de la variable 9.

Índice de la variable	Límite elástico	Tensión de rotura	Precio
1	335 x 10 ⁶	490 x 10 ⁶	1,4
2	430 x 10 ⁶	600 x 10 ⁶	1,6
3	700 x 10 ⁶	800 x 10 ⁶	3,5

Tabla 7. Novena variable del algoritmo genético

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

La décima variable se trata al igual que la novena. En este caso está relacionada con las secciones que puede tomar el tubo que forma el arco principal. De nuevo, se asigna un índice valor a cada relación de diámetros posible para la primera sección definida en las macros. De esta forma, la variable número 10 queda definida como se presenta en la tabla 8.

Índice de la variable	Diámetro interno	Diámetro externo
1	0,02	0,0225
2	0,0215	0,024
3	0,023	0,025

Tabla 8. Décima variable del algoritmo genético

Tanto la undécima variable como la duodécima variable comparten los valores que pueden tomar. Se tratan de la segunda y tercera sección de tubo que son utilizadas en el diseño y que forman toda la estructura de la celda de seguridad a excepción del arco principal (sección primera). Estas dos últimas variables pueden tomar los siguientes valores mostrados en la tabla 9.

Índice de la variable	Diámetro interno	Diámetro externo
1	0,0165	0,019
2	0,018	0,02
3	0,02	0,0225
4	0,0215	0,024
5	0,023	0,025

Tabla 9. Undécima y duodécima variables del algoritmo genético

Una vez conocidas las **12 variables** con las que el algoritmo genético debe trabajar, es necesario establecer los parámetros intrínsecos al algoritmo que garanticen la convergencia del mismo en una solución válida. De este modo, la función del algoritmo genético de Matlab puede ser configurada para adaptarla al problema que se pretende resolver. Las características de la función del algoritmo genético quedan de la siguiente forma:

- Para el tamaño de la población de cada generación Matlab establece por defecto un valor de 200 individuos para aquellos casos donde el número de variables sea superior a 5. Sin embargo, con el fin de mejorar el proceso de cálculo y siguiendo un estudio sobre la influencia del tamaño de la población en algoritmos genéticos promovido por la *Bulgarian National Scientific Found* [9], se ha determinado un **tamaño de población de 100 individuos** como el más adecuado para algoritmos que contengan entre 10 y 20 variables. De acuerdo al estudio nombrado, este tamaño de población garantiza la diversidad de la misma e incrementando el número de individuos solo se consigue un proceso mucho más lento.
- En cuanto al número de generaciones (iteraciones) máximo que el algoritmo genético propuesto por Matlab tiene un valor de 100 iteraciones. Sin embargo, como Matlab ofrece un valor por defecto no adaptado al algoritmo genético del presente problema, se ajusta el número de iteraciones en base al estudio anteriormente nombrado [9] a un valor de **200 generaciones**. A pesar de aumentar el número máximo de iteraciones no resulta tan crítico como el valor de la población ya la solución puede converger antes de realizar las 200 iteraciones.
- Tanto la **probabilidad de cruce como la probabilidad de mutación** se ha respetado el **valor por defecto que establece Matlab** ya que no se ha encontrado ninguna información que respalde un valor distinto de acuerdo al problema que debe resolver el algoritmo genético.

5.2.2 Función objetivo

La función objetivo aquella donde se relacionan la función del algoritmo genético que acaba de ser definida, las macros de ANSYS y las condiciones de la optimización que se quiere realizar. En el anexo A.5 se encuentra la sub-rutina de Matlab que se ha realizado donde se define la función objetivo.

La primera parte de la función objetivo es la ejecución de la función del algoritmo genético. Una vez esta última ha generado los valores de las variables, la función objetivo les asigna un nombre y los guarda en un archivo .dat, siendo este archivo el que leerán las macros de ANSYS como sus argumentos. Es decir, la primera parte de la función objetivo es la recepción y adecuación de las variables de parte del algoritmo genético para su posterior tratamiento en ANSYS.

Una vez que las variables están listas y transformadas a los argumentos que reclaman las macros de ANSYS, la sub-rutina encargada de evaluar la función objetivo ejecuta las macros de ANSYS. Este proceso se realiza en Matlab escribiendo las siguientes líneas de código que se muestran:

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```
% Llamar a ANSYS
Stack = 'SET KMP_STACKSIZE=2048k & ';
ANSYS_Path = 'C:\Program Files\ANSYS
Inc\v171\ansys\bin\winx64\ansys171.exe';
Macro1 = 'C:\Users\Ferran\Documents\COLEGIO\UPV\Curso 2016-
2017\TFG\Macro\Mf1.dat';
Macro2 = 'C:\Users\Ferran\Documents\COLEGIO\UPV\Curso 2016-
2017\TFG\Macro\Mf2.dat';
Macrop = 'C:\Users\Ferran\Documents\COLEGIO\UPV\Curso 2016-
2017\TFG\Macro\Mfp.dat';
StringCall=[Stack '' ANSYS_Path '' -b -i '' Macro1 '' -o SALIDA1.DAT'];
[status,cout] = system(StringCall);
StringCall=[Stack '' ANSYS_Path '' -b -i '' Macro2 '' -o SALIDA2.DAT'];
[status,cout] = system(StringCall);
StringCall=[Stack '' ANSYS_Path '' -b -i '' Macrop '' -o SALIDAp.DAT'];
[status,cout] = system(StringCall);
```

Una vez, ANSYS ha ejecutado las tres macros y se han obtenido los ficheros con los resultados de los ensayos solo queda establecer la condición para la optimización. Es decir, el diseño de la celda de seguridad debe cumplir los ensayos de la normativa que son simulados en ANSYS. Al mismo tiempo, se busca que el producto del peso de la celda de seguridad por el coste de los tubos utilizados. El precio de éstos es por unidad de masa, por lo que el coste es igual al precio por el peso. De esta forma la función objetivo a minimizar (3) resulta:

$$F_0 = \text{Peso} * \text{Coste} = \text{Peso}^2 * \text{Precio} \quad (3)$$

Con esto finaliza la función objetivo. Ésta es la función principal que relaciona todas las partes del proceso de optimización. La función objetivo se repetirá en bucle tantas veces como la función del algoritmo genético genere valores nuevos de las variables hasta converger en una solución o finalizar las 200 generaciones. El criterio de convergencia del algoritmo genético es el establecido por defecto en la función de Matlab.

5.3 Resultados de la optimización

Finalmente, ha habido 156 generaciones lo que hace un total de 15.600 individuos analizados. Aunque es un número muy elevado, realmente es un valor bajo comparado con la totalidad de combinaciones disponibles. La ampliación del número de iteraciones ha resultado conveniente ya que las 100 generaciones máximas que establece Matlab hubiesen sido insuficientes, aunque las 200 que se establecieron han resultado un tanto excesivas.

Tras finalizar el proceso de optimización solo queda observar que argumentos de las macros han resultado ser las variables más óptimas. Matlab, finaliza el algoritmo genético con las variables más óptimas, por tanto en el archivo .dat que contiene los argumentos de entrada a las macros se hayan los argumentos más óptimos.

5.3.1 Variables optimizadas

Los valores de las variables o los índices de éstas para las variables vectoriales que han resultado del proceso de optimización son los que se muestran en la tabla 10.

Variable	Valor / Índice
1	0,7
2	1,4
3	0,65
4	0,65
5	0,75
6	0,4
7	0,7
8	0,1
9	1
10	3
11	2
12	2

Tabla 10. Valores de las variables tras la optimización

5.3.2 Parámetros del diseño final optimizado

Conocidos los valores e índices de las variables podemos establecer los valores de los argumentos de entrada de las macros y por ende todos los parámetros que forman la geometría y el análisis de tensiones-deformaciones del diseño final de la celda de seguridad. Los valores de los parámetros correspondientes al diseño final son los mostrados en la tabla 11.

Parámetro	Hace referencia a	Valor parámetro
A	Anchura de la celda	0,7
B	Altura de la celda	1,4
C	Altura del salpicadero	0,65
D	Largo del salpicadero	0,65
E	Largo de la cabina	1,4
F	Altura del tirante longitudinal trasero	0,4
G	Largo del tirante longitudinal trasero	2,1
H	Altura inferior del refuerzo de las puertas	0,1
I	Anchura de la cabina	0,575
J	Altura de la curva del semi-arco lateral	0,7
K	Largo de la curva del semi-arco lateral	0,6
L	Anchura de la curva del arco principal	0,625
M	Altura superior del refuerzo de las puertas	0,59
N	Límite elástico	355×10^6
Q	Radio interior de la sección 1	0,023
R	Radio exterior de la sección 1	0,025
S	Radio interior de la sección 2	0,018
T	Radio exterior de la sección 2	0,02
U	Radio interior de la sección 3	0,018
V	Radio exterior de la sección 3	0,02

Tabla 11. Valores de los parámetros del diseño final

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

En los planos anexos a este documento se representa la celda de seguridad resultante. Las cotas que aparecen en dichos planos son las del diseño final.

En las figuras 32 y 33 se pueden observar los parámetros geométricos expuestos en la tabla superior sobre el diseño final de la celda de seguridad.

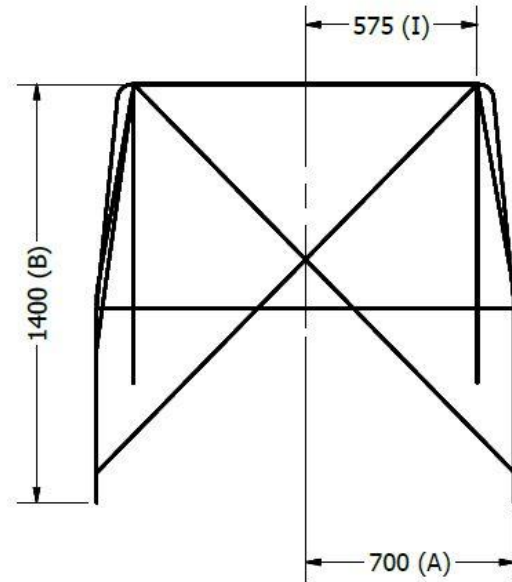


Figura 32. Parámetros geométricos de la celda de seguridad (a)

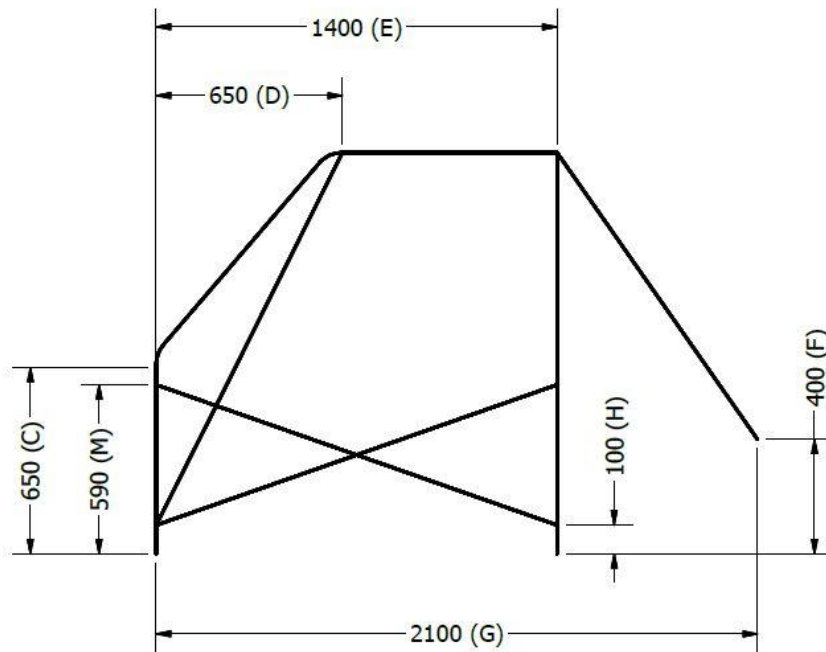


Figura 33. Parámetros geométricos de la celda de seguridad (b)

5.3.3 Resultados del ensayo 1

Se inicializa ANSYS y a través de su GUI se ejecuta la macro correspondiente a la simulación del primer ensayo. Al finalizar todo el proceso de ejecución de la macro obtenemos los dos archivos con las deformaciones y la tensión máxima de Von Mises que aparece en la estructura. Sin embargo, se ha decidido obtener por pantalla estos datos con el fin de realizar un mejor análisis.

5.3.3.1 Tensión equivalente de Von Mises

Del mismo modo que ocurría con el diseño inicial, las tensiones que aparecen en la estructura tras aplicar las cargas correspondientes al ensayo 1 no presentan anomalías. Como se aprecia en la figura 34, la barra que soporta el grueso de las tensiones es el arco principal sobre todo en sus extremos superiores donde encontramos las tensiones máximas que son de **471MPa**, siendo el límite de rotura del material de 490MPa. También destacar que los miembros verticales del arco principal soportan grandes tensiones ya que la fuerza aplicada es en dirección vertical. En definitiva, las tensiones resultantes son coherentes y no llegan a superar la tensión de rotura por lo que el diseño supera el primer ensayo.

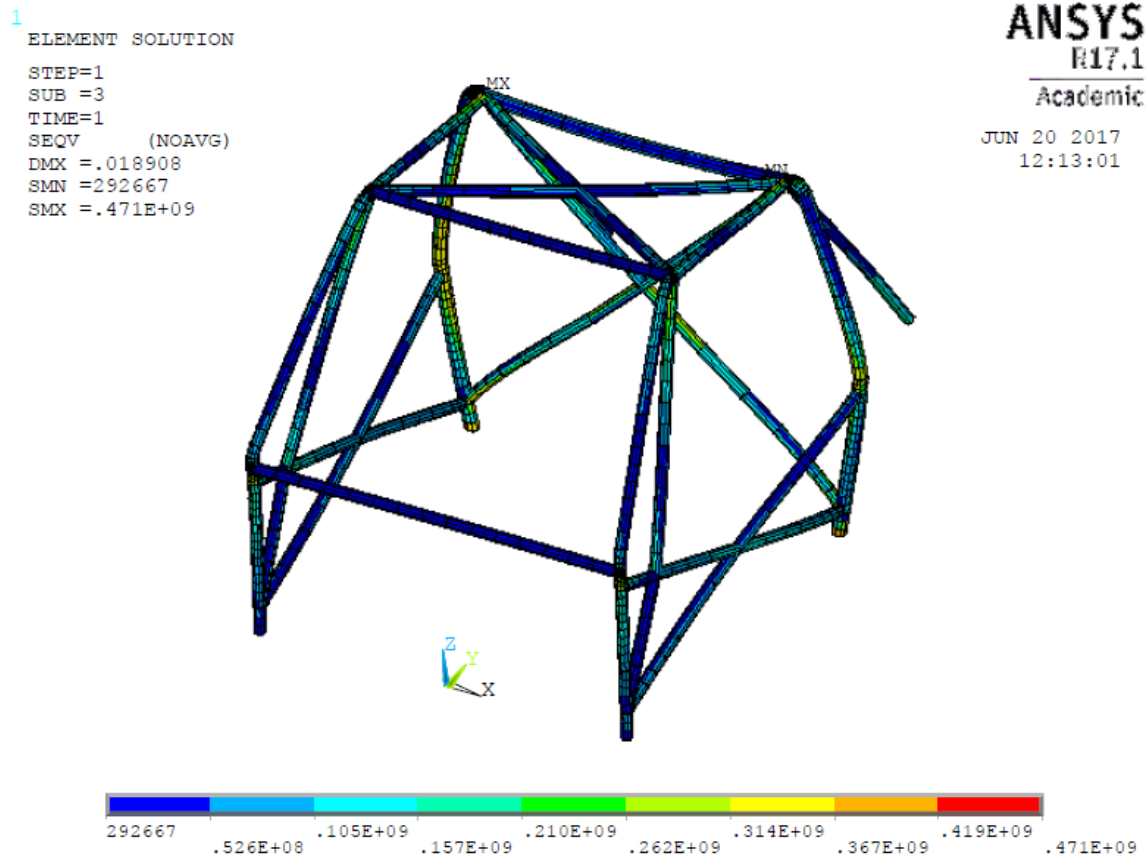


Figura 34. Tensión equivalente de Von Mises en el diseño final para el ensayo 1

5.3.3.2 Desplazamientos

Como se puede observar en la figura 35, el máximo desplazamiento producido es de **18,9mm**, siendo el máximo permitido de 50mm. Por tanto, el diseño cumple con la restricción de desplazamientos máximos del primer ensayo. De igual forma que ocurría con las tensiones, en el arco principal es donde se concentran las principales deformaciones, lo que resulta coherente. Las deformaciones que aparecen en este diseño final son bastante superiores a las del diseño inicial como debería ser lógico tras optimizar un diseño.

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =3
TIME=1
DMX =.018908

ANSYS
R17.1
Academic
JUN 20 2017
12:13:51

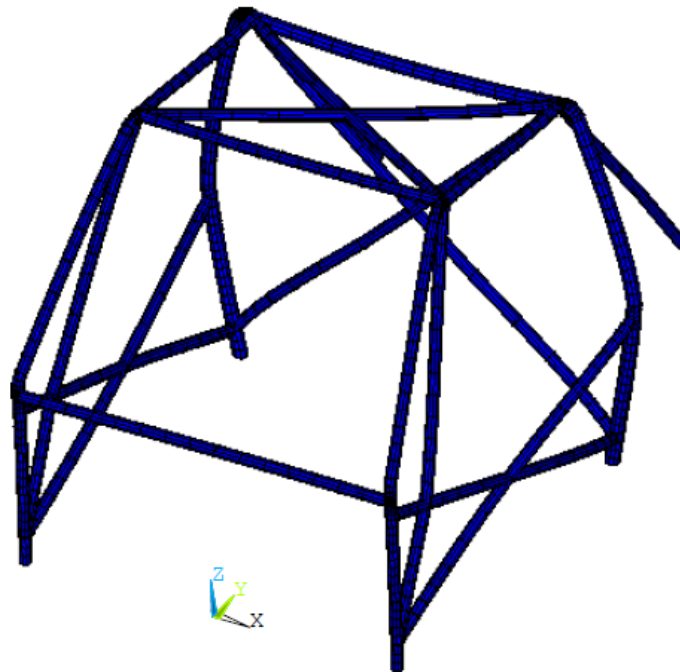


Figura 35. Desplazamientos provocados por el ensayo 1 en el modelo final

5.3.4 Resultados del ensayo 2

Del mismo modo que para el primer ensayo, solo es necesario ejecutar mediante la GUI de ANSYS la macro que simula el segundo ensayo. De nuevo, a través de la GUI se obtiene por pantalla la tensión equivalente máxima de Von Mises y las deformaciones del diseño final de la celda de seguridad para realizar un análisis más completo que observando solo los datos obtenidos en los archivos que ha generado la macro.

5.3.4.1 Tensión equivalente de Von Mises

Las tensiones máximas que aparecen en la estructura se distribuyen de forma similar a como lo hacían para el diseño inicial. De nuevo, en la zona donde es aplicada la carga del ensayo aparecen grandes tensiones que se distribuyen por las barras que allí se conectan. Como ocurría con el diseño inicial, el refuerzo del parabrisas es la barra que mayor tensión padece ya que la fuerza aplicada es en la dirección de la barra.

Observando la figura 36 se tiene que la tensión máxima que se produce es de **457MPa**, siendo la tensión límite de rotura del material es de 490MPa, lo que indica que la estructura de la celda de seguridad se sitúa dentro de los límites impuestos por la normativa.

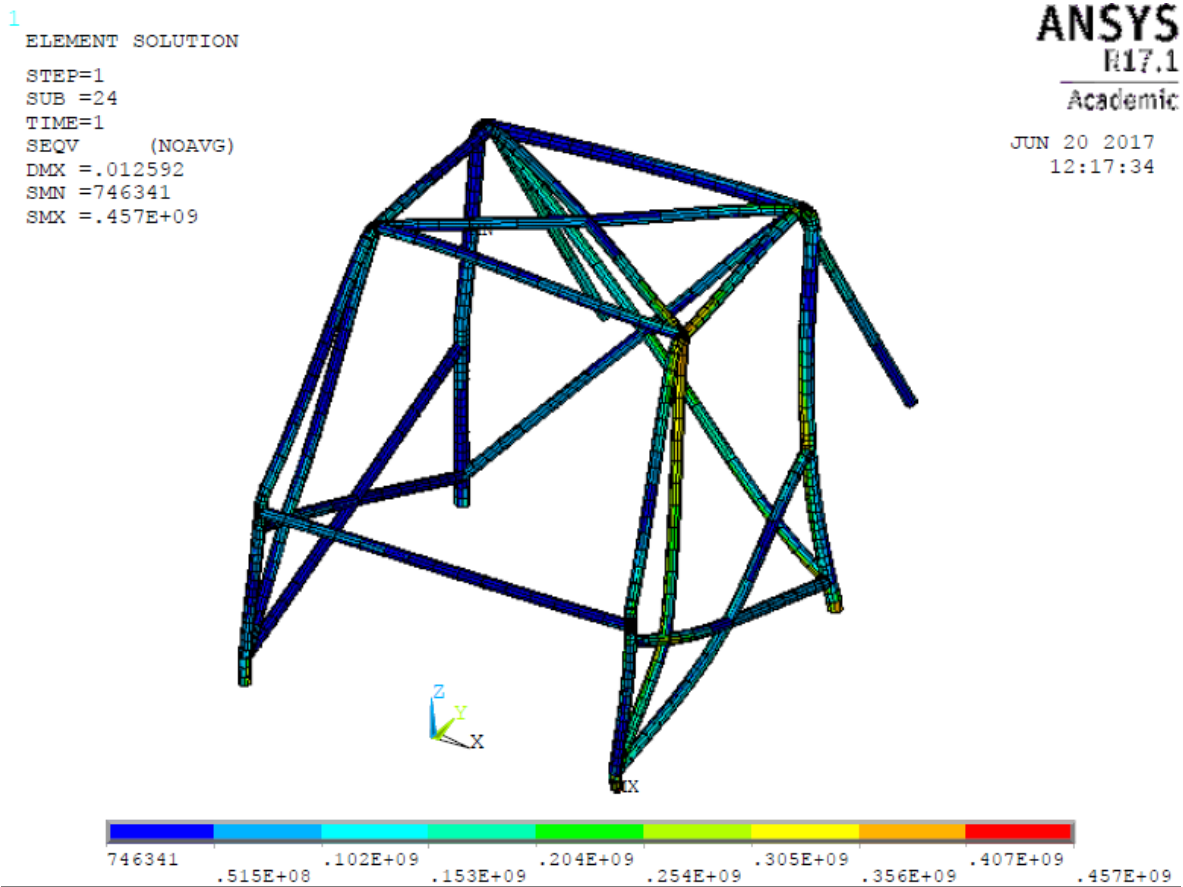


Figura 36. Tensión equivalente de Von Mises en el diseño final para el ensayo 2

5.3.4.2 Desplazamientos

El desplazamiento máximo que se produce es de **12,5mm**, muy alejado del máximo permitido por la normativa FIA que es de 100mm, por lo que el diseño cumple sin dudas los requerimientos del segundo ensayo. Por otra parte, como se puede observar en la figura 37, las zonas más deformadas son las barras del lateral derecho. Las barras del refuerzo de la puerta y del parabrisas sufren una deformación clara, del mismo modo que la parte superior del semi-arco lateral también se ve notablemente deformada. La barra vertical del arco principal también se ve deformada junto a los apoyos de la estructura en ese lateral.

```
1  
DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =24  
TIME=1  
DMX =.012592
```

ANSYS
R17.1
Academic
JUN 20 2017
12:18:21

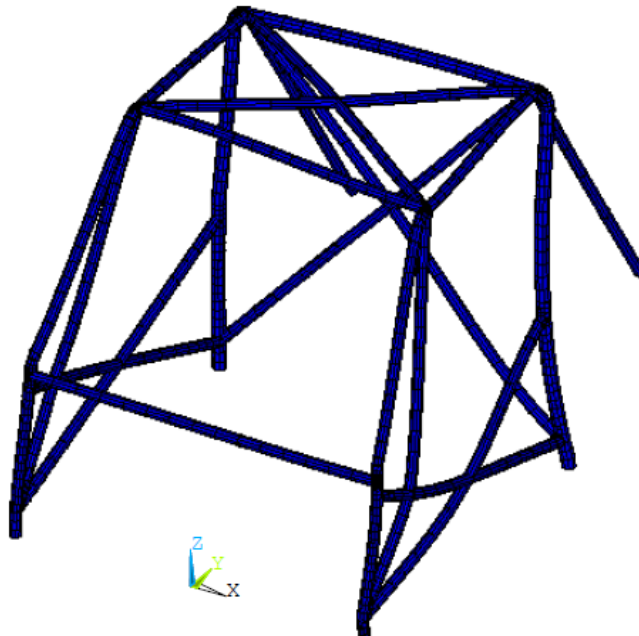


Figura 37. Desplazamientos provocados por el ensayo 2 en el modelo final

5.3.5 Análisis de los resultados

El resultado obtenido tras la optimización del diseño se puede calificar de muy bueno. La estructura satisface los dos ensayos estáticos que contempla la normativa, a pesar de que las tensiones resultantes tras la aplicación de las cargas son cercanas al límite de rotura del material utilizado.

La longitud más óptima para las barras que forman la estructura de la celda de seguridad es el valor más pequeño del intervalo propuesto. Es decir, la celda de seguridad más óptima es la más pequeña posible considerando los valores establecidos como posibles soluciones.

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

El acero que se ha considerado más óptimo tras la aplicación del algoritmo genético ha sido el **E355**. Con este acero y las secciones de tubo disponibles se consigue el diseño con menor coste y peso posibles.

Por su parte la sección de tubo utilizada para formar el arco principal de la celda de seguridad es la más grande disponible la cual es la sección **50 x 2 mm**. Como se ha observado en las figuras 34 y 36, el arco principal es el más afectado por las cargas aplicadas. Este hecho resulta coherente ya que la normativa establece una sección mínima para esta barra superior a la sección mínima para el resto de barras.

Para el resto de barras de la celda de seguridad la sección utilizada es la misma, a pesar de la posibilidad existente de que las barras de los refuerzos tuvieran una sección diferente al resto. La sección utilizada toda la estructura de la celda de seguridad excepto para el arco principal es la segunda más pequeña que hay disponible, la cual es la sección **40 x 2 mm**. Este resultado es coherente ya que en el primer ensayo es el arco principal quien recibe las cargas, mientras que para el segundo ensayo son varias barras las que se ven afectadas por las cargas distribuyéndose las tensiones sobre éstas.

En cuanto al peso de la estructura, ejecutando la macro con la que se obtienen las reacciones en los apoyos tenemos que la los tubos que conforman el diseño final de la celda de seguridad tienen un peso total de **553,78 N**. En término de masa se tienen un total de **56,45 Kg**. Teniendo en cuenta que el precio de los tubos que conforman la estructura es de 1,4 €/Kg. Entonces siendo la masa total de los tubos de 56,45 Kg, el coste final de éstos es de **79,03 €**.

En la tabla 12 se comparan los resultados del diseño inicial, con los resultados obtenidos en el diseño final tras la optimización.

Diseño	Peso (N)	Precio tubo (€/kg)	Coste (€)	Valor de la función objetivo
Inicial	736,97	1,6	120,32	868999,65
Optimizado	553,78	1,4	79,03	429341,2

Tabla 12. Comparación de los resultados del diseño inicial y el diseño optimizado

El diseño optimizado es un **24,86% más ligero** que el inicial. Del mismo modo, se ha rebajado el **coste** de los tubos utilizados en un **36,81%**. Mientras que el valor más óptimo de la función objetivo planteada en el problema de optimización es un **50,59% menor** que el valor de la función objetivo para el diseño inicial

En conclusión, los resultados obtenidos tras la optimización son muy satisfactorios. Se ha conseguido un diseño que cumple la normativa y a su vez el producto de su peso y coste es el menor posible.

6. CONCLUSIONES

En este último apartado se van a exponer todas las conclusiones que se han obtenido a lo largo de todo el estudio de diseño y optimización de una celda de seguridad para un vehículo según la normativa FIA que ha sido explicado.

Primeramente, ha sido muy importante la labor de buscar y determinar toda la normativa necesaria que afecta al diseño de una celda de seguridad para un vehículo que ha sido incluida en este documento. Esta parte del proyecto ha sido la base del mismo y sobre la que se han ido tomando las decisiones para finalmente conseguir un diseño de celda de seguridad a bajo coste y con un peso reducido.

También ha sido de gran importancia el diseño inicial que se realizó y a partir del cual se parametrizó la celda de seguridad para poder realizar la optimización. Este diseño inicial ha servido para evitar introducir fallos en el modelo automatizado. La construcción de la geometría en este modelo inicial ha sido fundamental para su parametrización. Del mismo modo, la definición de secciones constantes y el uso de elemento tipo BEAM en este modelo inicial ha servido para conocer su comportamiento y de esta forma validar su uso para el modelo parametrizado.

Por otra parte, la realización de las macros ha significado profundizar en el código de ANSYS. Trabajar directamente con el lenguaje de programación y no con la GUI del programa ha permitido aprender cómo trabaja y por tanto poder tomar mejores decisiones en cuanto a su manejo. Además, la escritura de las macros nos ha permitido generar miles de modelos y analizarlos de forma automática sin necesidad de interacción humana con ANSYS. El uso de macros ha sido el eje del estudio de diseño y optimización; para futuros trabajos esta experiencia es muy bien valorada.

En cuanto al uso de Matlab y su función de algoritmos genéticos ha permitido realizar una optimización eficaz consiguiendo un resultado imposible bajo otras circunstancias donde la optimización no se hubiese podido automatizar. Todo el proceso de optimización por parte del algoritmo genético ha sido 100% autónomo, es decir que una vez ha sido definida toda la programación necesaria para la optimización, ésta ha comparado miles de posibles soluciones hasta hallar la más óptima según los criterios establecidos.

En definitiva, durante el proyecto se ha conseguido establecer un método de diseño y optimización de una estructura. Este método de trabajo puede aplicarse a otros estudios por lo que ha resultado muy interesante todo el conocimiento que se ha desarrollado a lo largo de este proyecto.

7. PRESUPUESTO

En este apartado del proyecto se reflejan los costes que ha supuesto la realización del diseño y optimización de una celda de seguridad según la normativa FIA. Quedan reflejados los gastos relativos al personal, al material y software utilizado y al lugar de trabajo; y finalmente se presenta el gasto total que ha supuesto el proyecto.

Debido a que se trata de un proyecto de diseño y no formar parte de un proyecto de ejecución material, se van a contabilizar los recursos materiales que han sido necesarios para la realización del diseño así como las horas de personal.

- Los recursos que han sido utilizados durante la realización del presente proyecto son los siguientes:

El personal técnico cualificado que ha realizado el estudio de diseño y optimización de una celda de seguridad según la normativa FIA consta de:

- Un **ingeniero mecánico** especialista en diseño de máquinas. El cual ha realizado toda la tarea de diseño y optimización que ha sido expuesta en el presente proyecto.

Los recursos informáticos utilizados para la realización del diseño y optimización de una celda de seguridad según la normativa FIA son los siguientes:

- Un ordenador portátil HP.
- Una licencia de ANSYS.
- Una licencia de Inventor.
- Una licencia de Matlab.
- Una licencia de Microsoft Office.

Las instalaciones que han sido necesarias para realizar el presente estudio son:

- Una oficina englobada en un co-working.
- La **duración y tiempos de trabajo** del proyecto se establecen a partir del inicio del mismo el día 6 de Febrero de 2017 hasta su finalización el día 16 de Junio de 2016. La jornada laboral que se ha llevado a cabo ha sido de 20 horas a la semana.

Los tiempos de ejecución total de cada recurso utilizado durante la realización del estudio de diseño y optimización se muestran en la tabla 13:

Concepto	Inicio	Fin	Semanas	Horas semana	Total horas
Ingeniero mecánico	6/02/2017	16/06/2017	19	20	380
Ordenador portátil HP	6/02/2017	16/06/2017	19	20	380
Licencia ANSYS	06/03/2017	19/05/2017	11	20	220
Licencia Inventor	22/05/2017	26/05/2017	1	20	20
Licencia Matlab	24/04/2017	19/05/2017	4	20	80
Licencia Microsoft Office	29/05/2017	16/06/2017	3	20	60
Oficina en co-working	6/02/2017	16/06/2017	19		

Tabla 13. Tiempos de recursos empleados

- El **desglose de costes unitario**. En este apartado se realiza un estudio de los costes por unidad de tiempo de cada recurso utilizado durante el proyecto. Para ello se va a tener en cuenta la tasa horaria de cada recurso. La cual es el coste de un recurso por unidad de tiempo trabajada en un año. Se calcula como:

$$T_h = \frac{C}{h_t} \quad (4)$$

Siendo h_t las horas de jornada laboral en un año entero. Se va a tomar 1760 horas laborales en un año como valor de referencia para los cálculos. Por su parte, C es el coste anual de cada concepto.

- Los costes unitarios del personal que ha participado en la realización de este proyecto (tabla 14). Se establece un sueldo de 18000 € brutos al año para un ingeniero mecánico, lo que conlleva un coste anual aproximado de 27000€.

Concepto	Coste anual (€)	H_t (h)	T_h (€/h)
Ingeniero mecánico	27000	1760	15,34

Tabla 14. Desglose del coste unitario del personal

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

- Los costes unitarios de los recursos informáticos utilizados (tabla 15). Se establece el coste anual aproximado del hardware y el coste de la licencia anual de cada producto de software.

Concepto	Coste anual (€)	H _t (h)	T _h (€/h)
Ordenador portátil HP	600	1760	0,34
Licencia ANSYS	15000	1760	8,53
Licencia Inventor	2060	1760	1,17
Licencia Matlab	155	1760	0,09
Licencia Microsoft Office	126	1760	0,07

Tabla 15. Desglose de los costes unitarios de los recursos informáticos.

- Los costes unitarios del lugar de trabajo (tabla 16). Se establece el coste semanal del lugar de trabajo donde se ha desarrollado el proyecto.

Concepto	Coste Semanal (€/semana)
Oficina en coworking	40

Tabla 16. Desglose del coste unitario del lugar de trabajo

- El **desglose de costes totales**. Una vez conocidos los costes unitarios de todos los recursos empleados se puede obtener el coste total perteneciente a cada recurso.
 - El coste total del ingeniero mecánico se muestra en la tabla 17:

Concepto	Periodo	Tasa horaria	Importe	IVA (21%)	TOTAL
	(h)	(€/h)	(€)	(€)	(€)
Ingeniero mecánico	380	15,34	5829,2	1224,13	7053,33

Tabla 17. Coste total del personal

TOTAL 7053,33 €

El coste total del personal asciende a:

SIETE MIL CINCUENTA Y TRES EUROS CON TREINTA Y TRES CÉNTIMOS

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

- El coste total de los recursos informáticos se muestran en la tabla 18:

Concepto	Periodo	Tasa horaria	Importe	IVA (21%)	TOTAL
	(h)	(€/h)	(€)	(€)	(€)
Ordenador portátil HP	380	0,34	129,2	27,13	156,33
Licencia ANSYS	220	8,53	1876,6	394,09	2270,69
Licencia Inventor	20	1,17	23,4	4,91	28,31
Licencia Matlab	80	0,09	7,2	1,51	8,71
Licencia Microsoft Office	60	0,07	4,2	0,88	5,08

Tabla 18. Coste total de los recursos informáticos

TOTAL 2469,12 €

El coste total de los recursos informáticos asciende a:

DOS MIL CUATROCIENTOS SESENTA Y NUEVE EUROS CON DOCE CÉNTIMOS

- El coste total del lugar de trabajo se muestra en la tabla 19:

Concepto	Periodo	Tasa semanal	Importe	IVA (21%)	TOTAL
	(semanas)	(€/semanas)	(€)	(€)	(€)
Oficina coworking	19	40	760	159,6	919,6

Tabla 19. Coste total del lugar de trabajo

TOTAL 919,6 €

El coste total del espacio de trabajo asciende a:

NOVECIENTOS DIECINUEVE EUROS CON SESENTA CÉNTIMOS

- El resumen del presupuesto total (tabla 20). Finalmente, se unifican todos los costes de los distintos recursos utilizados en la elaboración del proyecto.

Concepto	Presupuesto
Personal cualificado	7053,33
Recursos informáticos	2469,12
Lugar de trabajo	919,6

Tabla 20. Presupuesto total del proyecto

TOTAL 10442,05 €

El coste total del proyecto de diseño y optimización de una celda de seguridad según la normativa FIA asciende a:

DIEZ MIL CUATROCIENTOS CUARENTA Y DOS EUROS CON CINCO CÉNTIMOS

8. PLIEGO DE CONDICIONES

En el presente documento se describen los requisitos y recursos necesarios para la realización del estudio que se ha llevado a cabo.

Por un lado se debe seguir la normativa que establece la Federación Internacional de Automovilismo para el diseño de la celda de seguridad para un automóvil. Esta normativa es:

- Anexo J – Artículo 283. Equipamiento de Seguridad para vehículos Todo Terreno.
- Anexo J – Artículo 285. Equipamiento de Seguridad para vehículos Todo Terreno modificados (T1).
- 2017 – Homologation Regulations for Safety Cages.

Por otro lado, se debe seguir la normativa de seguridad y salud en el trabajo por parte del ingeniero que realiza el proyecto:

- Real Decreto 488/1997 de 14.4. (M. Trab. y As. Soc., BOE 23.4.1997). Disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.

Para la realización del estudio es necesario contar con una licencia oficial de los distintos *softwares* que se utilizan:

- Licencia oficial de ANSYS.
- Licencia oficial de Matlab.
- Licencia oficial de Inventor.
- Licencia oficial de Microsoft Office.

Finalmente, los conocimientos mínimos requeridos para la realización del estudio son:

- Formación en ingeniería mecánica.
- Conocimientos específicos en el Método de Elementos Finitos.
- Conocimientos de programación informática e informática en general.

9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS EXTERNAS

- [1] : <https://es.racemarket.net/rally/recambios-rally/rally-carroceria/jaula-antivuelco-chasis-tubular-carrera-coche-chasis-construccion-i327> (Accedido 22-05-2017)
- [2] : <https://www.rfeda.es/documents/20185/772209/art283.pdf> (Publicado 8-12-2016) (Corregido 24-03-2017) (Accedido 7-04-2017)
- [3] : <https://www.rfeda.es/documents/20185/772209/art285.pdf> (Publicado 8-12-2016) (Accedido 7-04-2017)
- [4] : <https://www.rfeda.es/documents/20185/776060/RH+ES+FIA> (Publicado 8-12-2016) (Accedido 7-04-2017)
- [5] : ANSYS Material Library. 2016.
- [6] : <https://www.mcmaster.com/#> (Accedido 22-05-2017)
- [7] : ANSYS Mechanical APDL Command Reference
- [8] : <http://geneura.ugr.es/~jmerelo/ie/ags.htm> (Accedido 29-05-2017)
- [9] : Influence of the Population Size on the Genetic Algorithm Performance in Case of Cultivation Process Modelling

ANEXOS

A1. Macro para el Ensayo 1

```

C*****
C***  MACRO / CELDA SEGURIDAD      ***
C*****
C***                                     ***
C*** 1- Definición de elemento a utilizar, ***
C*** propiedades del material y secciones. ***
C***                                     ***
C*** 2- Definición de la geometría ***
C***                                     ***
C*** 3- Mallado de la pieza ***
C***                                     ***
C*** 4- Condiciones de contorno ***
C***                                     ***
C*** 5- Solve ***
C***                                     ***
C*** 6- Obtención de datos ***
C***                                     ***
C*****
C***  ENTRADA AL PREPROCESADOR
C***
/PREP7
/SHRINK,0
/ESHAPE,1.0
/EFACET,1
/RATIO,1,1,1
/CFORMAT,32,0
C***
C***  LECTURA DE LOS PARÁMETROS
C***
NVARIA=16
*DIM,VV,ARRAY,NVARIA,1,1
*VREAD,VV,'VARIABLE','DAT',,KJI,1,1,NVARIA
(G15.5)
C***
C***  Longitudes
C***
A=VV(1,1,1)
B=VV(2,1,1)
C=VV(3,1,1)
D=VV(4,1,1)
E=VV(4,1,1)+VV(5,1,1)
F=VV(6,1,1)
G=VV(4,1,1)+VV(5,1,1)+VV(7,1,1)
H=VV(8,1,1)
C***
C***  Material
C***
N=VV(9,1,1)
C***
C***  Sección 2
C***
Q=VV(10,1,1)
R=VV(11,1,1)
C***
C***  Sección 3
C***
S=VV(12,1,1)
T=VV(13,1,1)
C***
C***  Sección 4
C***
U=VV(14,1,1)
V=VV(15,1,1)
C***
C*****
C*** 1- Definición de elemento a utilizar, ***
C*** propiedades del material y secciones. ***
C*****
C***  DEFINICIÓN TIPO DE ELEMENTO
C***
ET,1,BEAM188
C***
C***  DEFINICIÓN DEL MATERIAL A UTILIZAR
C***
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,205E9
MPDATA,PRXY,1,,0.29
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7850
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,N,1450E6,,,
C***
C***  DEFINICIÓN DE SECCIONES TIPO "BEAM"
C***
SECTYPE, 2, BEAM, CTUBE, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,Q,R,10,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 3, BEAM, CTUBE, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,S,T,10,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 4, BEAM, CTUBE, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,U,V,10,0,0,0,0,0,0,0,0,0
C***
C*****
C*** 2- Definición de la geometría ***
C*****
C***
C***A=0.775
C***B=1.45
C***C=0.75
C***D=0.75
C***E=D+0.75
C***F=0.25
C***G=D+E+0.8
C***H=0.0005
C***
C***A=ARG1
C***B=ARG2

```

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```

C**C=0.75
C**D=0.75
C**E=D+0.75
C**F=0.25
C**G=D+E+0.8
C**H=0.0005
C**
C**A=ARG1
C**B=ARG2
C**C=ARG3
C**D=ARG4
C**E=(ARG4+ARG5)
C**F=ARG6
C**G=(ARG4+ARG5+ARG7)
C**H=ARG8
C**
I=(A-0.125)
J=(C+0.05)
K=(D-0.05)
L=(A-0.075)
M=(H+0.49)
C**
C**      KEYPOINTS
C**
K,1,A,0,0,
K,2,-A,0,0,
K,3,A,E,0,
K,4,-A,E,0,
K,5,I,G,F,
K,6,-I,G,F,
K,7,A,0,C,
K,8,-A,0,C,
K,9,A,0,J,
K,10,-A,0,J,
K,11,I,K,B,
K,12,-I,K,B,
K,13,I,D,B,
K,14,-I,D,B,
K,15,I,E,B,
K,16,-I,E,B,
K,17,L,E,B,
K,18,-L,E,B,
K,19,A,E,C,
K,20,-A,E,C,
K,21,A,0,M,
K,22,-A,0,M,
K,23,A,E,M,
K,24,-A,E,M,
K,25,A,0,H,
K,26,-A,0,H,
K,27,A,E,H,
K,28,-A,E,H,
K,29,A,D,B,
K,30,-A,D,B,
C**
C**      LINES
C**
LSTR,1,25
LSTR,2,26
LSTR,25,21
LSTR,26,22
LSTR,21,7
LSTR,22,8
LSTR,7,9
LSTR,8,10
LSTR,9,11
LSTR,10,12
LSTR,11,13
LSTR,12,14
LSTR,13,15
LSTR,14,16
LSTR,15,17
LSTR,16,18
LSTR,17,19
LSTR,18,20
LSTR,19,23
LSTR,20,24
LSTR,23,27
LSTR,24,28
LSTR,27,3
LSTR,28,4
LSTR,7,8
LSTR,13,14
LSTR,15,16
LSTR,15,5
LSTR,16,6
LSTR,25,29
LSTR,26,30
LSTR,13,16
LSTR,14,15
LSTR,15,28
LSTR,16,27
LSTR,25,23
LSTR,21,27
LSTR,26,24
LSTR,22,28
C**
C**      LINES FILLET - ESTRUCTURA PRINCIPAL
C**
LFILLT,15,17,0.05,,
LFILLT,16,18,0.05,,
LFILLT,7,9,0.1,,
LFILLT,8,10,0.1,,
LFILLT,9,11,0.1,,
LFILLT,10,12,0.1,,
ALLSEL,ALL
NUMMRG,KP, , , ,LOW
C**
C**      42 KEYPOINTS CREADOS
C**
C**      DIVIDIR BARAS DE LAS PUERTAS
C**
LSBL,36,37
LSTR,27,43
LSTR,43,21
LSBL,38,39
LSTR,28,44
LSTR,44,22
FITEM,2,28
ALLSEL,ALL

```

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```

NUMMRG,KP, , , ,LOW
C***
C*** REFUERZO PARABRISAS
C***
LSBL,37,30
LSTR,25,45
LSTR,45,13
LSBL,39,31
LSTR,26,29
LSTR,29,14
C***
C*** REFUERZO TECHO
C***
LSBL,33,32
LSTR,13,30
LSTR,30,16
C***
C*** REFUERZO TRASERO
C***
LSBL,34,35
LSTR,27,46
LSTR,46,16
C***
C*****
C*** 3- Mallado de la pieza ***
C*****
C***
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 2
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,2
SMRT,6
SMRT,5
SMRT,4
SMRT,3
FLST,2,13,4,ORDE,5
FITEM,2,15
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,40
FITEM,2,-41
LMESH,P51X
C***
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 3
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,3
FLST,2,22,4,ORDE,8
FITEM,2,1
FITEM,2,-14
FITEM,2,25
FITEM,2,-26
FITEM,2,-29
FITEM,2,42

FITEM,2,-45
LMESH,P51X
C***
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 4
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,4
FLST,2,22,4,ORDE,4
FITEM,2,30
FITEM,2,-39
FITEM,2,46
FITEM,2,-57
LMESH,P51X
C***
C*****
C*** 4- Condiciones de contorno ***
C*****
C***
C*** RESTRICCIONES ALL DOF
C***
/SOL
FLST,2,6,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
/GO
DK,P51X, , , ,0,ALL, , , , ,
C***
C*** RESTRICCIONES GRAVITACIONALES
C***
ACEL,0,0,9.8
C***
C*** CARGAS DEL ENSAYO 1
C***
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,16
FITEM,2,31
/GO
FK,P51X,FZ,-84940
C***
C*****
C*** 5- Solve ***
C*****
C***
/STATUS,SOLU
SOLVE
/REP,FAST
GPLOT
C***
C*****
C*** 6- Obtención de datos ***
C*****
C***
/POST1
C***
C*** TENSION MÁXIMA
C***
*DIM,tsqv,ARRAY,1,1,1

```


Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```
*GET,tsqv(1,1,1),secr,,s,eqv,max
*MWRITE,tsqv,'tenmax1','txt',,JIK
%G
C***
C***   DESPLAZAMIENTOS
C***
C***   Número de nodos
C***
*DIM,numnod,ARRAY,1,1,1
*GET,numnod(1,1,1),NODE,0,COUNT
C***
C***   Desplazamientos
C***
*DIM,des,ARRAY,numnod(1,1,1),1,1
*DO,INODE,1,numnod(1,1,1),1
*GET,des(INODE,1,1),NODE,INODE,U,SUM
*ENDDO
*MWRITE,des,'despla1','txt',,JIK
%G
```

A2. Macro para el Ensayo 2

```

C*****
C***  MACRO / CELDA SEGURIDAD      ***
C*****
C***                                     ***
C*** 1- Definición de elemento a utilizar, ***
C*** propiedades del material y secciones. ***
C***                                     ***
C*** 2- Definición de la geometría ***
C***                                     ***
C*** 3- Mallado de la pieza ***
C***                                     ***
C*** 4- Condiciones de contorno ***
C***                                     ***
C*** 5- Solve ***
C***                                     ***
C*** 6- Obtención de datos ***
C***                                     ***
C*****
C***  ENTRADA AL PREPROCESADOR
C***
/PREP7
/SHRINK,0
/ESHAPE,1.0
/EFACET,1
/RATIO,1,1,1
/CFORMAT,32,0
C***
C***  LECTURA DE LOS PARÁMETROS
C***
NVARIA=16
*DIM,VV,ARRAY,NVARIA,1,1
*VREAD,VV,'VARIABLE','DAT',,KJI,1,1,NVARIA
(G15.5)
C***
C***  Longitudes
C***
A=VV(1,1,1)
B=VV(2,1,1)
C=VV(3,1,1)
D=VV(4,1,1)
E=VV(4,1,1)+VV(5,1,1)
F=VV(6,1,1)
G=VV(4,1,1)+VV(5,1,1)+VV(7,1,1)
H=VV(8,1,1)
C***
C***  Material
C***
N=VV(9,1,1)
C***
C***  Sección 2
C***
Q=VV(10,1,1)
R=VV(11,1,1)
C***
C***  Sección 3
C***
S=VV(12,1,1)
T=VV(13,1,1)
C***
C***  Sección 4
C***
U=VV(14,1,1)
V=VV(15,1,1)
C***
C*****
C*** 1- Definición de elemento a utilizar, ***
C*** propiedades del material y secciones. ***
C*****
C***  DEFINICIÓN TIPO DE ELEMENTO
C***
ET,1,BEAM188
C***
C***  DEFINICIÓN DEL MATERIAL A UTILIZAR
C***
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,205E9
MPDATA,PRXY,1,,0.29
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7850
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,N,1450E6,,,
C***
C***  DEFINICIÓN DE SECCIONES TIPO "BEAM"
C***
SECTYPE, 2, BEAM, CTUBE, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,Q,R,10,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 3, BEAM, CTUBE, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,S,T,10,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 4, BEAM, CTUBE, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,U,V,10,0,0,0,0,0,0,0,0
C***
C*****
C*** 2- Definición de la geometría ***
C*****
C***
C***A=0.775
C***B=1.45
C***C=0.75
C***D=0.75
C***E=D+0.75
C***F=0.25
C***G=D+E+0.8
C***H=0.0005
C***
C***A=ARG1
C***B=ARG2

```

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```

C**C=0.75
C**D=0.75
C**E=D+0.75
C**F=0.25
C**G=D+E+0.8
C**H=0.0005
C**
C**A=ARG1
C**B=ARG2
C**C=ARG3
C**D=ARG4
C**E=(ARG4+ARG5)
C**F=ARG6
C**G=(ARG4+ARG5+ARG7)
C**H=ARG8
C**
I=(A-0.125)
J=(C+0.05)
K=(D-0.05)
L=(A-0.075)
M=(H+0.49)
C**
C**      KEYPOINTS
C**
K,1,A,0,0,
K,2,-A,0,0,
K,3,A,E,0,
K,4,-A,E,0,
K,5,I,G,F,
K,6,-I,G,F,
K,7,A,0,C,
K,8,-A,0,C,
K,9,A,0,J,
K,10,-A,0,J,
K,11,I,K,B,
K,12,-I,K,B,
K,13,I,D,B,
K,14,-I,D,B,
K,15,I,E,B,
K,16,-I,E,B,
K,17,L,E,B,
K,18,-L,E,B,
K,19,A,E,C,
K,20,-A,E,C,
K,21,A,0,M,
K,22,-A,0,M,
K,23,A,E,M,
K,24,-A,E,M,
K,25,A,0,H,
K,26,-A,0,H,
K,27,A,E,H,
K,28,-A,E,H,
K,29,A,D,B,
K,30,-A,D,B,
C**
C**      LINES
C**
LSTR,1,25
LSTR,2,26
LSTR,25,21
LSTR,26,22
LSTR,21,7
LSTR,22,8
LSTR,7,9
LSTR,8,10
LSTR,9,11
LSTR,10,12
LSTR,11,13
LSTR,12,14
LSTR,13,15
LSTR,14,16
LSTR,15,17
LSTR,16,18
LSTR,17,19
LSTR,18,20
LSTR,19,23
LSTR,20,24
LSTR,23,27
LSTR,24,28
LSTR,27,3
LSTR,28,4
LSTR,7,8
LSTR,13,14
LSTR,15,16
LSTR,15,5
LSTR,16,6
LSTR,25,29
LSTR,26,30
LSTR,13,16
LSTR,14,15
LSTR,15,28
LSTR,16,27
LSTR,25,23
LSTR,21,27
LSTR,26,24
LSTR,22,28
C**
C**      LINES FILLET - ESTRUCTURA PRINCIPAL
C**
LFILLT,15,17,0.05,,
LFILLT,16,18,0.05,,
LFILLT,7,9,0.1,,
LFILLT,8,10,0.1,,
LFILLT,9,11,0.1,,
LFILLT,10,12,0.1,,
ALLSEL,ALL
NUMMRG,KP, , , ,LOW
C**
C**      42 KEYPOINTS CREADOS
C**
C**      DIVIDIR BARAS DE LAS PUERTAS
C**
LSBL,36,37
LSTR,27,43
LSTR,43,21
LSBL,38,39
LSTR,28,44
LSTR,44,22
FITEM,2,28
ALLSEL,ALL

```

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```

NUMMRG,KP, , , ,LOW
C***
C*** REFUERZO PARABRISAS
C***
LSBL,37,30
LSTR,25,45
LSTR,45,13
LSBL,39,31
LSTR,26,29
LSTR,29,14
C***
C*** REFUERZO TECHO
C***
LSBL,33,32
LSTR,13,30
LSTR,30,16
C***
C*** REFUERZO TRASERO
C***
LSBL,34,35
LSTR,27,46
LSTR,46,16
C***
C*****
C*** 3- Mallado de la pieza ***
C*****
C***
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 2
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,2
SMRT,6
SMRT,5
SMRT,4
SMRT,3
FLST,2,13,4,ORDE,5
FITEM,2,15
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,40
FITEM,2,-41
LMESH,P51X
C***
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 3
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,3
FLST,2,22,4,ORDE,8
FITEM,2,1
FITEM,2,-14
FITEM,2,25
FITEM,2,-26
FITEM,2,-29
FITEM,2,42

FITEM,2,-45
LMESH,P51X
C***
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 4
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,4
FLST,2,22,4,ORDE,4
FITEM,2,30
FITEM,2,-39
FITEM,2,46
FITEM,2,-57
LMESH,P51X
C***
C*****
C*** 4- Condiciones de contorno ***
C*****
C***
C*** RESTRICCIONES ALL DOF
C***
/SOL
FLST,2,6,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
/GO
DK,P51X, , , ,0,ALL, , , , ,
C***
C*** RESTRICCIONES GRAVITACIONALES
C***
ACEL,0,0,9.8
C***
C*** CARGAS DEL ENSAYO 2
C***
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,13
/GO
FK,P51X,FX,-33514
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,13
/GO
FK,P51X,FY,6264
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,13
/GO
FK,P51X,FZ,-71597
C***
C*****
C*** 5- Solve ***
C*****
C***
/STATUS,SOLU
SOLVE
/REP,FAST
GPLOT
C***
C*****
C*** 6- Obtención de datos ***

```

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```
C*****
C***
/POST1
C***
C***   TENSIÓN MÁXIMA
C***
*DIM,tsqv,ARRAY,1,1,1
*GET,tsqv(1,1,1),secr,,s,eqv,max
*MWRITE,tsqv,'tenmax2','txt',,JIK
%G
C***
C***   DESPLAZAMIENTOS
C***
C***   Número de nodos
C***
*DIM,numnod,ARRAY,1,1,1
*GET,numnod(1,1,1),NODE,0,COUNT
C***
C***   Desplazamientos
C***
*DIM,des,ARRAY,numnod(1,1,1),1,1
*DO,INODE,1,numnod(1,1,1),1
*GET,des(INODE,1,1),NODE,INODE,U,SUM
*ENDDO
*MWRITE,des,'despla2','txt',,JIK
%G
```

A3. Macro para obtener el Peso

```

C*****
C***  MACRO / CELDA SEGURIDAD      ***
C*****
C***                                     ***
C*** 1- Definición de elemento a utilizar, ***
C*** propiedades del material y secciones. ***
C***                                     ***
C*** 2- Definición de la geometría ***
C***                                     ***
C*** 3- Mallado de la pieza ***
C***                                     ***
C*** 4- Condiciones de contorno ***
C***                                     ***
C*** 5- Solve ***
C***                                     ***
C*** 6- Obtención de datos ***
C*****
C***  ENTRADA AL PREPROCESADOR
C***
/PREP7
/SHRINK,0
/ESHAPE,1.0
/EFACET,1
/RATIO,1,1,1
/CFORMAT,32,0
C***
C***  LECTURA DE LOS PARÁMETROS
C***
NVARIA=16
*DIM,VV,ARRAY,NVARIA,1,1
*VREAD,VV,'VARIABLE','DAT',,KJI,1,1,NVARIA
(G15.5)
C***
C***  Longitudes
C***
A=VV(1,1,1)
B=VV(2,1,1)
C=VV(3,1,1)
D=VV(4,1,1)
E=VV(4,1,1)+VV(5,1,1)
F=VV(6,1,1)
G=VV(4,1,1)+VV(5,1,1)+VV(7,1,1)
H=VV(8,1,1)
C***
C***  Material
C***
N=VV(9,1,1)
C***
C***  Sección 2
C***
Q=VV(10,1,1)
R=VV(11,1,1)
C***
C***  Sección 3
C***
S=VV(12,1,1)
T=VV(13,1,1)
C***
C***  Sección 4
C***
U=VV(14,1,1)
V=VV(15,1,1)
C***
C*****
C*** 1- Definición de elemento a utilizar, ***
C*** propiedades del material y secciones. ***
C*****
C***  DEFINICIÓN TIPO DE ELEMENTO
C***
ET,1,BEAM188
C***
C***  DEFINICIÓN DEL MATERIAL A UTILIZAR
C***
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,205E9
MPDATA,PRXY,1,,0.29
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7850
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,N,1450E6,,,
C***
C***  DEFINICIÓN DE SECCIONES TIPO "BEAM"
C***
SECTYPE, 2, BEAM, CTUBE, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,Q,R,10,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 3, BEAM, CTUBE, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,S,T,10,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 4, BEAM, CTUBE, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,U,V,10,0,0,0,0,0,0,0,0
C***
C*****
C*** 2- Definición de la geometría ***
C*****
C***
C***A=0.775
C***B=1.45
C***C=0.75
C***D=0.75
C***E=D+0.75
C***F=0.25
C***G=D+E+0.8
C***H=0.0005
C***
C***A=ARG1
C***B=ARG2

```

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```

C**C=0.75
C**D=0.75
C**E=D+0.75
C**F=0.25
C**G=D+E+0.8
C**H=0.0005
C**
C**A=ARG1
C**B=ARG2
C**C=ARG3
C**D=ARG4
C**E=(ARG4+ARG5)
C**F=ARG6
C**G=(ARG4+ARG5+ARG7)
C**H=ARG8
C**
I=(A-0.125)
J=(C+0.05)
K=(D-0.05)
L=(A-0.075)
M=(H+0.49)
C**
C**      KEYPOINTS
C**
K,1,A,0,0,
K,2,-A,0,0,
K,3,A,E,0,
K,4,-A,E,0,
K,5,I,G,F,
K,6,-I,G,F,
K,7,A,0,C,
K,8,-A,0,C,
K,9,A,0,J,
K,10,-A,0,J,
K,11,I,K,B,
K,12,-I,K,B,
K,13,I,D,B,
K,14,-I,D,B,
K,15,I,E,B,
K,16,-I,E,B,
K,17,L,E,B,
K,18,-L,E,B,
K,19,A,E,C,
K,20,-A,E,C,
K,21,A,0,M,
K,22,-A,0,M,
K,23,A,E,M,
K,24,-A,E,M,
K,25,A,0,H,
K,26,-A,0,H,
K,27,A,E,H,
K,28,-A,E,H,
K,29,A,D,B,
K,30,-A,D,B,
C**
C**      LINES
C**
LSTR,1,25
LSTR,2,26
LSTR,25,21
LSTR,26,22
LSTR,21,7
LSTR,22,8
LSTR,7,9
LSTR,8,10
LSTR,9,11
LSTR,10,12
LSTR,11,13
LSTR,12,14
LSTR,13,15
LSTR,14,16
LSTR,15,17
LSTR,16,18
LSTR,17,19
LSTR,18,20
LSTR,19,23
LSTR,20,24
LSTR,23,27
LSTR,24,28
LSTR,27,3
LSTR,28,4
LSTR,7,8
LSTR,13,14
LSTR,15,16
LSTR,15,5
LSTR,16,6
LSTR,25,29
LSTR,26,30
LSTR,13,16
LSTR,14,15
LSTR,15,28
LSTR,16,27
LSTR,25,23
LSTR,21,27
LSTR,26,24
LSTR,22,28
C**
C**      LINES FILLET - ESTRUCTURA PRINCIPAL
C**
LFILLT,15,17,0.05,,
LFILLT,16,18,0.05,,
LFILLT,7,9,0.1,,
LFILLT,8,10,0.1,,
LFILLT,9,11,0.1,,
LFILLT,10,12,0.1,,
ALLSEL,ALL
NUMMRG,KP, , , ,LOW
C**
C**      42 KEYPOINTS CREADOS
C**
C**      DIVIDIR BARAS DE LAS PUERTAS
C**
LSBL,36,37
LSTR,27,43
LSTR,43,21
LSBL,38,39
LSTR,28,44
LSTR,44,22
FITEM,2,28
ALLSEL,ALL

```

Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```

NUMMRG,KP, , , ,LOW
C***
C*** REFUERZO PARABRISAS
C***
LSBL,37,30
LSTR,25,45
LSTR,45,13
LSBL,39,31
LSTR,26,29
LSTR,29,14
C***
C*** REFUERZO TECHO
C***
LSBL,33,32
LSTR,13,30
LSTR,30,16
C***
C*** REFUERZO TRASERO
C***
LSBL,34,35
LSTR,27,46
LSTR,46,16
C***
C*****
C*** 3- Mallado de la pieza ***
C*****
C***
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 2
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,2
SMRT,6
SMRT,5
SMRT,4
SMRT,3
FLST,2,13,4,ORDE,5
FITEM,2,15
FITEM,2,-24
FITEM,2,27
FITEM,2,40
FITEM,2,-41
LMESH,P51X
C***
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 3
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,3
FLST,2,22,4,ORDE,8
FITEM,2,1
FITEM,2,-14
FITEM,2,25
FITEM,2,-26
FITEM,2,-29
FITEM,2,42

FITEM,2,-45
LMESH,P51X
C***
C*** MALLADO BARRAS SECCIÓN 4
C***
TYPE,1
MAT,1
REAL,
ESYS,0
SECNUM,4
FLST,2,22,4,ORDE,4
FITEM,2,30
FITEM,2,-39
FITEM,2,46
FITEM,2,-57
LMESH,P51X
C***
C*****
C*** 4- Condiciones de contorno ***
C*****
C***
C*** RESTRICCIONES ALL DOF
C***
/SOL
FLST,2,6,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
/GO
DK,P51X, , , ,0,ALL, , , , ,
C***
C*** RESTRICCIONES GRAVITACIONALES
C***
ACEL,0,0,9.8
C***
C*****
C*** 5- Solve ***
C*****
C***
/STATUS,SOLU
SOLVE
/REP,FAST
GPLOT
C***
C*****
C*** 6- Obtención de datos ***
C*****
C***
/POST1
C***
C*** PESO
C***
*DIM,pesos,ARRAY,6,1,1
*GET,pesos(1,1,1),NODE,NODE(A,0,0),RF,FZ
*GET,pesos(2,1,1),NODE,NODE(-A,0,0),RF,FZ
*GET,pesos(3,1,1),NODE,NODE(A,E,0),RF,FZ
*GET,pesos(4,1,1),NODE,NODE(-A,E,0),RF,FZ
*GET,pesos(5,1,1),NODE,NODE(I,G,F),RF,FZ
*GET,pesos(6,1,1),NODE,NODE(-I,G,F),RF,FZ
*MWRITE,pesos,'peso','txt',,JIK
%G

```


A4. Función algoritmo genético de Matlab

```
% ALGORITMOS GENETICOS
nvars = 12; % número de variables
LB_real = [0.7 1.4 0.65 0.65 0.75 0.2 0.7 .0001]; % Limites inferiores
UB_real = [0.8 1.55 0.75 0.75 0.85 0.4 0.8 0.0999]; % Limites superiores
Nvalor = 11;
LB = 1*ones(1,nvars);

Val_Variable{1} = linspace(LB_real(1),UB_real(1),Nvalor);
Val_Variable{2} = linspace(LB_real(2),UB_real(2),16);
for i = 3:5
    Val_Variable{i} = linspace(LB_real(i),UB_real(i),Nvalor);
end
Val_Variable{6} = linspace(LB_real(6),UB_real(6),21);
Val_Variable{7} = linspace(LB_real(7),UB_real(7),Nvalor);
Val_Variable{8} = linspace(LB_real(8),UB_real(8),22);

Val_Variable{9}=[355e6,430e6,700e6;490e6,600e6,800e6;1.4,1.6,3.5];
Val_Variable{10}=...
    [0.02,0.0215,0.023;0.0225,0.024,0.025];
Val_Variable{11}=...
    [0.0165,0.018,0.02,0.0215,0.023;0.019,0.02,0.0225,0.024,0.025];
Val_Variable{12}=...
    [0.0165,0.018,0.02,0.0215,0.023;0.019,0.02,0.0225,0.024,0.025];

for i = 1:nvars
    UB(i) = size(Val_Variable{i},2);
end
IntCon = 1:nvars;

options = optimoptions('ga','Display','iter','MaxGenerations',200,...
    'PopulationSize',100);
[x,fval,exitflag,output,population,scores] =...
    ga(@x
    Opt(x,Val_Variable),nvars,[],[],[],[],LB,UB,[],IntCon,options);
```

A5. Sub-rutina de la función objetivo en Matlab

```
function ObjValue = Opt(xIndex,Val_Variable)

% Nvars = length(xIndex);
Sy = Val_Variable{9}(1,xIndex(9));
Su = Val_Variable{9}(2,xIndex(9));
Precio = Val_Variable{9}(3,xIndex(9));
dS1 = Val_Variable{10}(1,xIndex(10));
DS1 = Val_Variable{10}(2,xIndex(10));
dS2 = Val_Variable{11}(1,xIndex(11));
DS2 = Val_Variable{11}(2,xIndex(11));
dS3 = Val_Variable{12}(1,xIndex(12));
DS3 = Val_Variable{12}(2,xIndex(12));

for i=1:8
    x(i) = Val_Variable{i}(1,xIndex(i));
end

x1 = x(1);
x2 = x(2);
x3 = x(3);
x4 = x(4);
x5 = x(5);
x6 = x(6);
x7 = x(7);
x8 = x(8);
x9 = Sy;
x10 = dS1;
x11 = DS1;
x12 = dS2;
x13 = DS2;
x14 = dS3;
x15 = DS3;

% Write parameters
fid = fopen('VARIABLE.DAT','w');
fprintf(fid,'%1.7e\n',x1);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x2);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x3);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x4);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x5);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x6);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x7);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x8);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x9);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x10);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x11);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x12);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x13);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x14);
fprintf(fid,'%1.7e\n',x15);
fclose(fid);
```

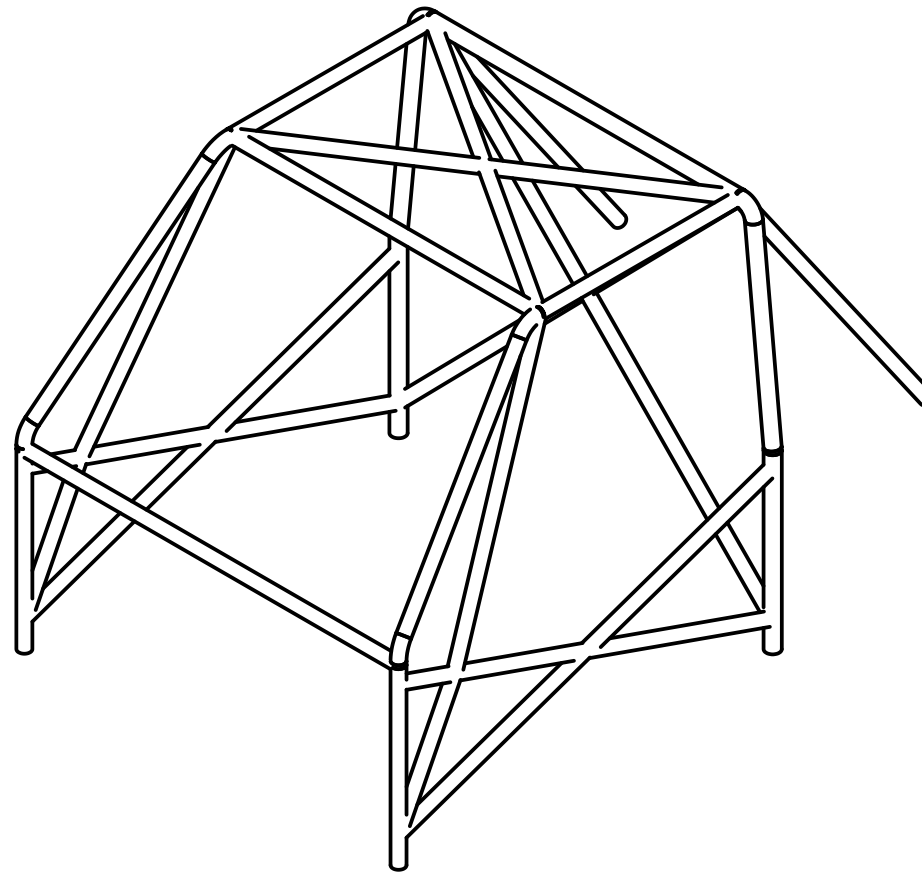
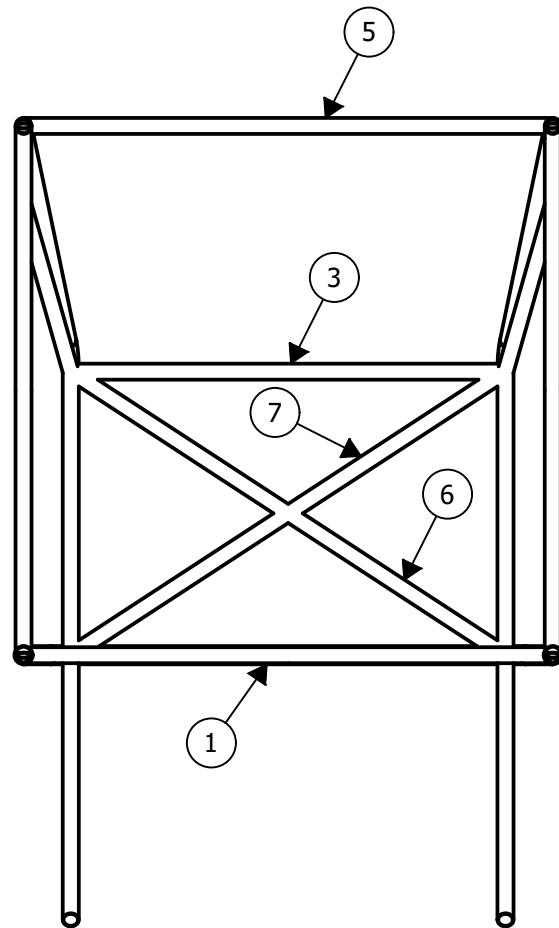
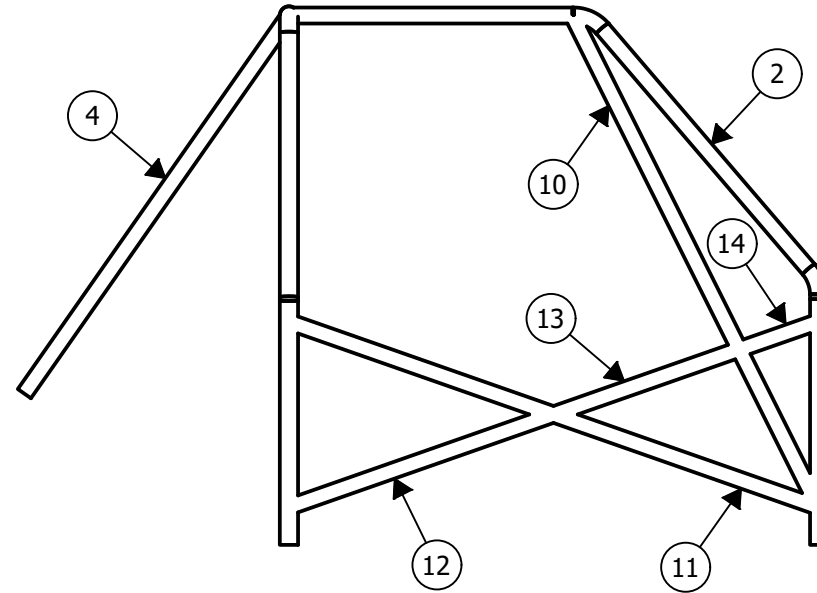
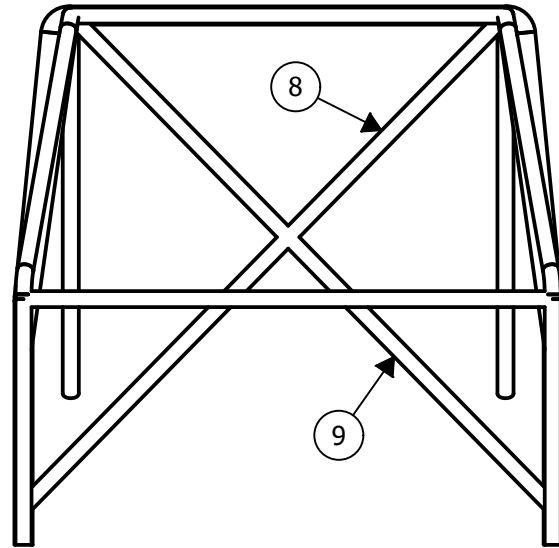
Diseño y optimización de una celda de seguridad para un automóvil según la normativa FIA

```
% Llamar a ANSYS
Stack = 'SET KMP_STACKSIZE=2048k & ';
ANSYS_Path = 'C:\Program Files\ANSYS
Inc\v171\ansys\bin\winx64\ansys171.exe';
Macro1 = 'C:\Users\Ferran\Documents\COLEGIO\UPV\Curso 2016-
2017\TFG\Macro\Mf1.dat';
Macro2 = 'C:\Users\Ferran\Documents\COLEGIO\UPV\Curso 2016-
2017\TFG\Macro\Mf2.dat';
Macrop = 'C:\Users\Ferran\Documents\COLEGIO\UPV\Curso 2016-
2017\TFG\Macro\Mfp.dat';
StringCall=[Stack ''' ANSYS_Path ''' -b -i ''' Macro1 ''' -o SALIDA1.DAT'];
[status,cout] = system(StringCall);
StringCall=[Stack ''' ANSYS_Path ''' -b -i ''' Macro2 ''' -o SALIDA2.DAT'];
[status,cout] = system(StringCall);
StringCall=[Stack ''' ANSYS_Path ''' -b -i ''' Macrop ''' -o SALIDAp.DAT'];
[status,cout] = system(StringCall);

% ANSYS ha resuelto
Desp1 = max(load('despla1.txt'));
Tens1 = load('tenmax1.txt');
Desp2 = max(load('despla2.txt'));
Tens2 = load('tenmax2.txt');
Peso = sum(load('peso.txt'));

if Desp1 < 0.05 && Tens1 < Su && Desp2 < 0.1 && Tens2 < Su
    ObjValue = Peso^(2)*Precio;
else
    ObjValue = NaN;
end
disp(['Valor objetivo: ' num2str(ObjValue)]);
```

PLANOS



PIEZA	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
1	ARCO PRINCIPAL	1
2	SEMI-ARCO LATERAL	2
3	MIEMBRO TRANSVERSAL SUPERIOR	1
4	TIRANTE LONGITUDINAL TRASERO	2
5	MIEMBRO TRANSVERSAL DEL PARABRISAS	1
6	REFUERZO TECHO GRANDE	1
7	REFUERZO TECHO PEQUEÑO	2
8	REFUERZO TRASERO GRANDE	1
9	REFUERZO TRASERO PEQUEÑO	2
10	REFUERZO PARABRISAS	2
11	REFUERZO PUERTAS GRANDE	2
12	REFUERZO PUERTAS MEDIO	2
13	REFUERZO PUERTAS PEQUEÑO	2
14	REFUERZO PUERTAS PROLONGACIÓN	2

GRADO INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DISEÑADO POR : **FERRAN GIL CASTELLBLANCH**

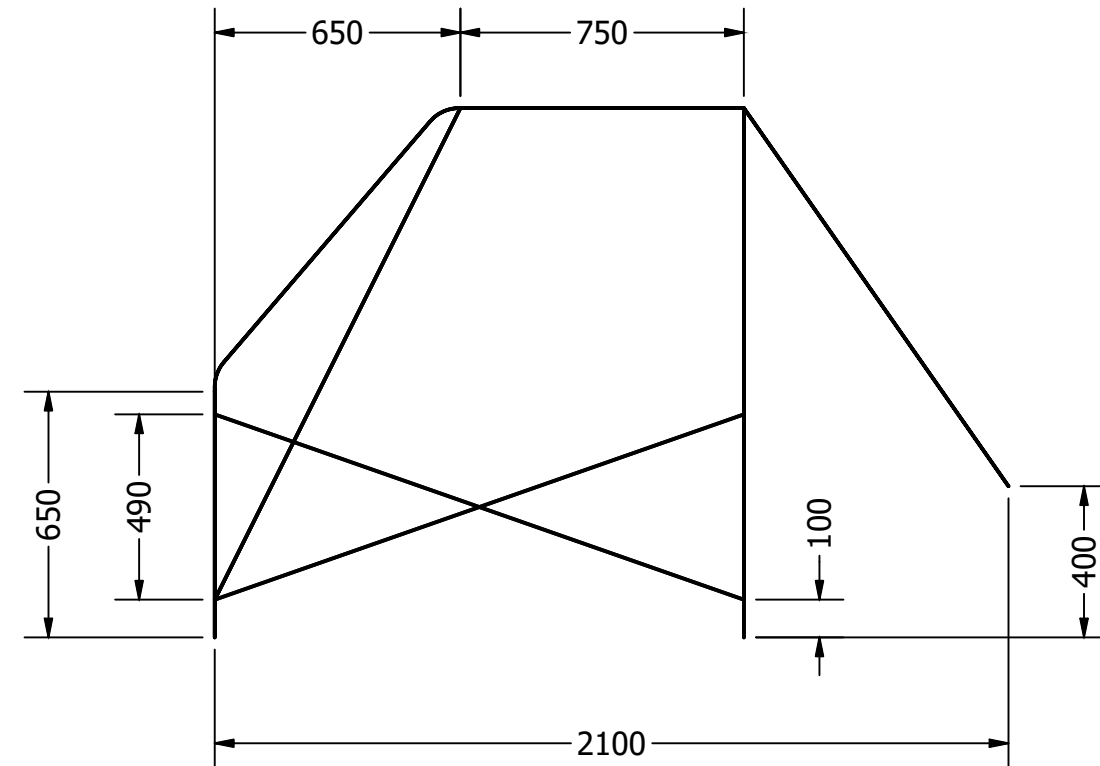
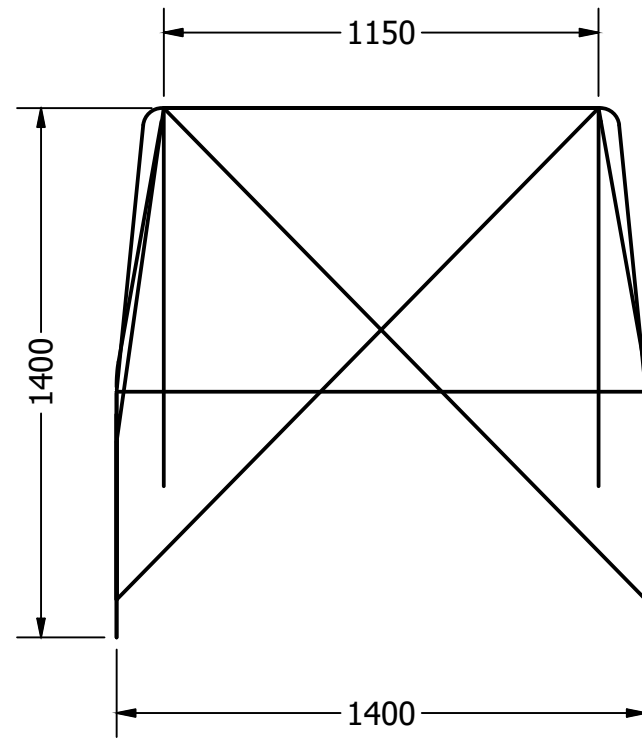
ESCALA **1 : 20**

PLANO Nº :

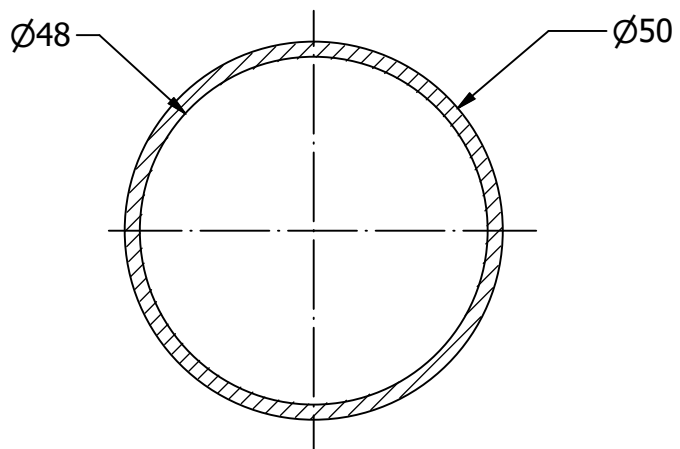
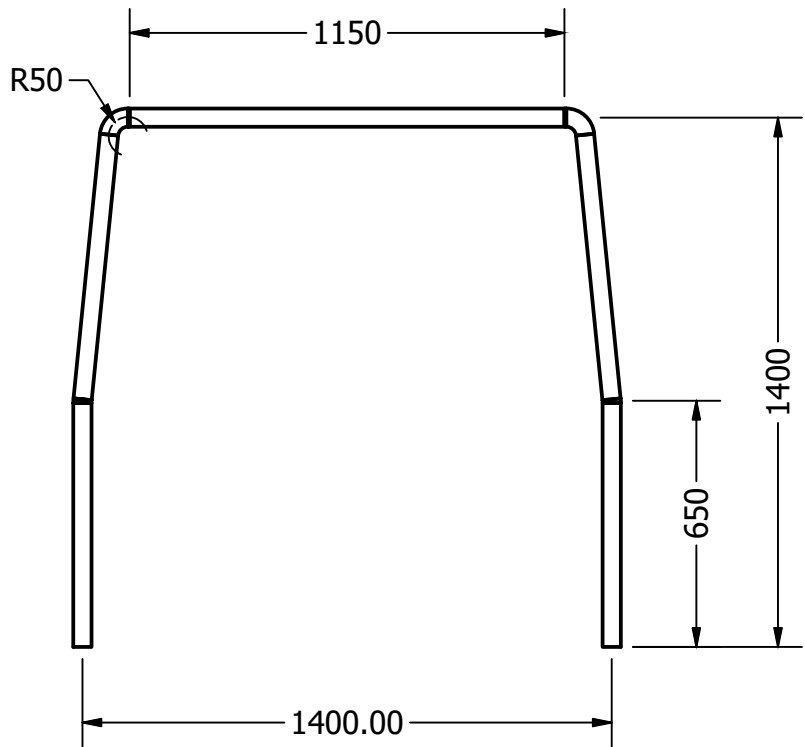
PLANO: **PLANO DE CONJUNTO**

FECHA **24/05/2017**

1

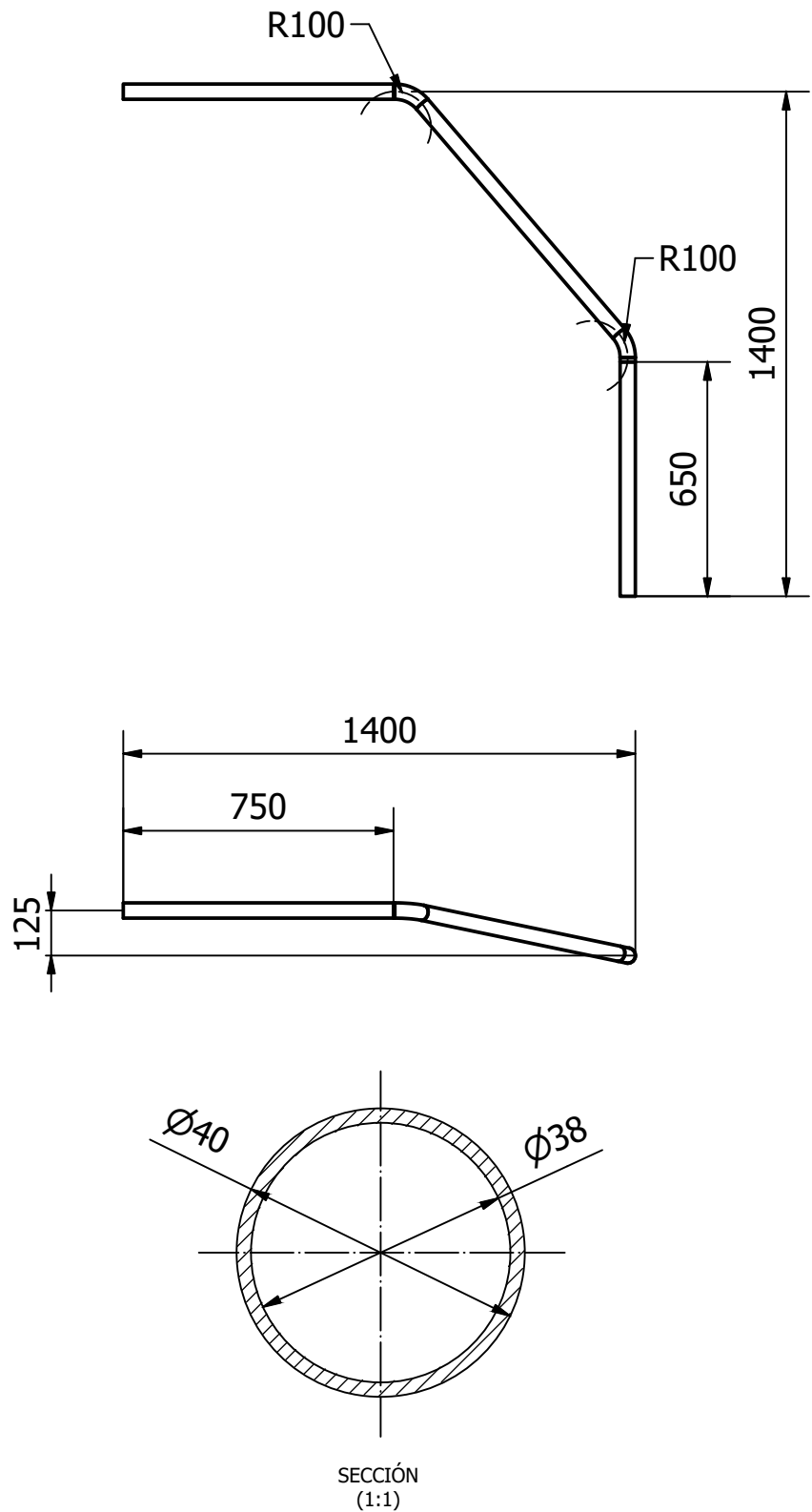


GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR: FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 20	PLANO Nº : 2
PLANO: PLANO DE LOS PARÁMETROS	FECHA 24/05/2017	

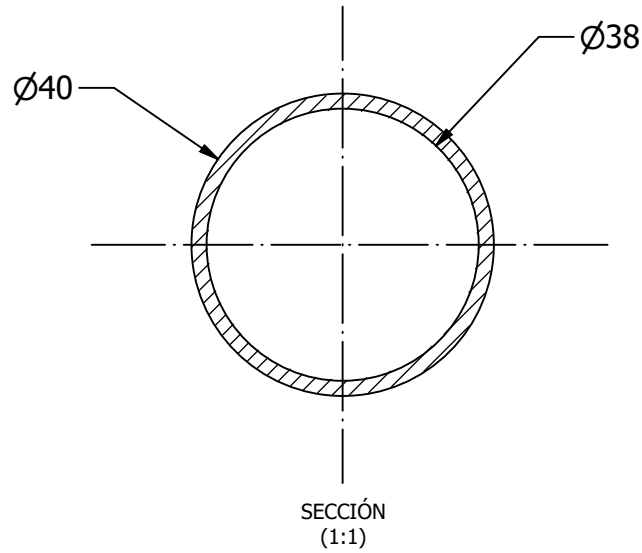
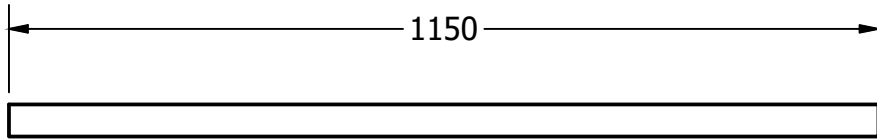


SECCIÓN
(1:1)

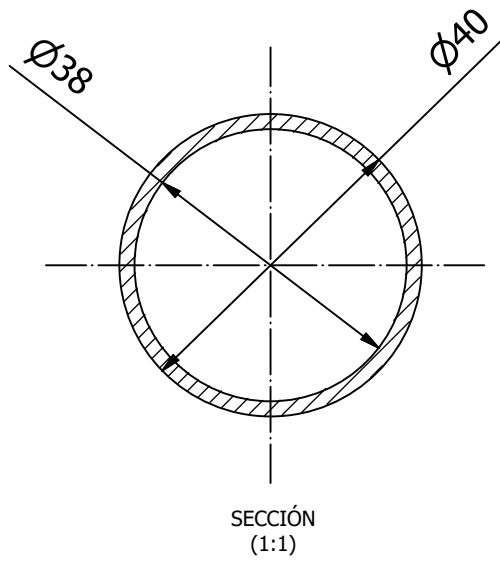
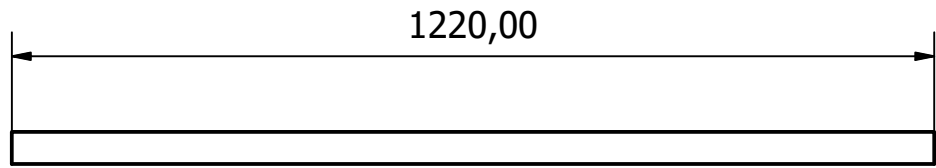
GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 20	3
PLANO: ARCO PRINCIPAL	FECHA 24/05/2017	



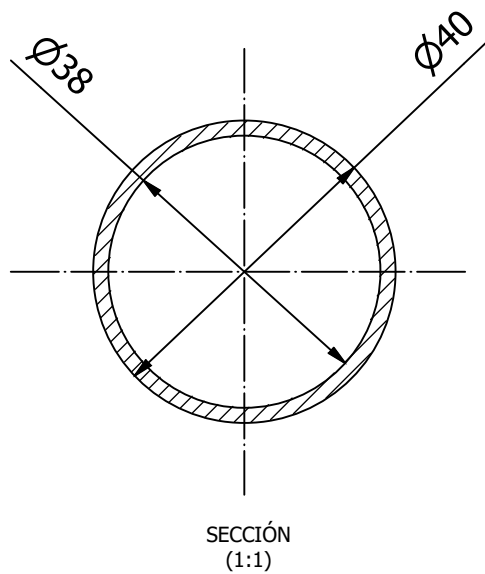
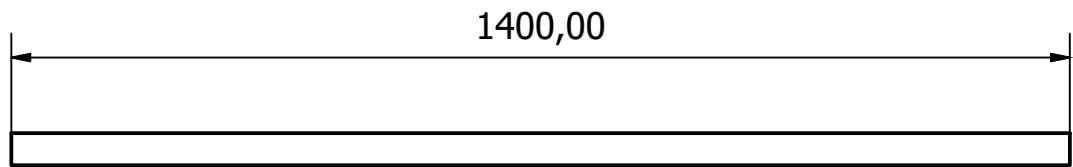
GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR :	FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 20
PLANO:	SEMI-ARCO LATERAL	FECHA 24/05/2017
		4



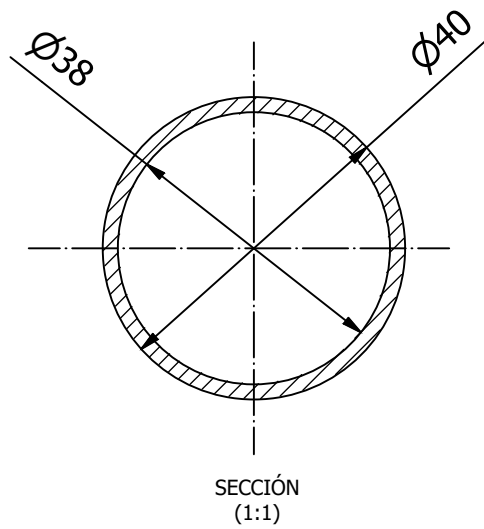
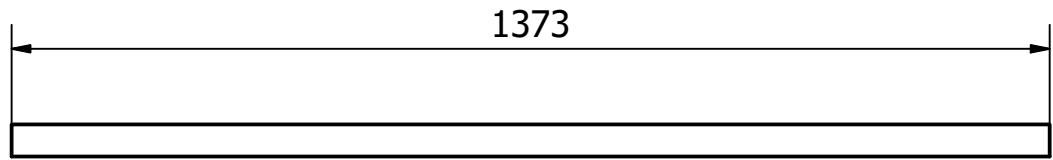
GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH		ESCALA 1 : 10
PLANO: MIEMBRO TRANSVERSAL SUPERIOR		FECHA 24/05/2017
		5



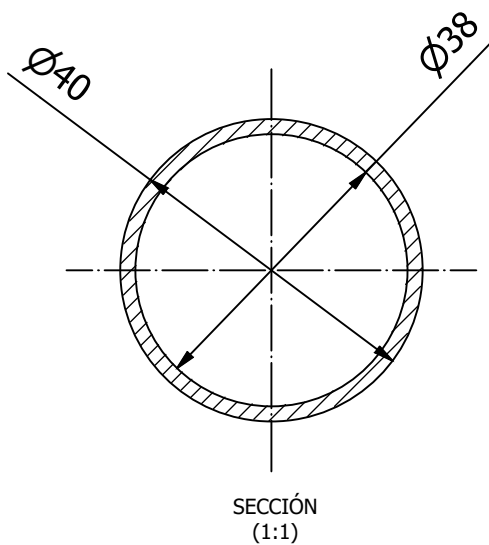
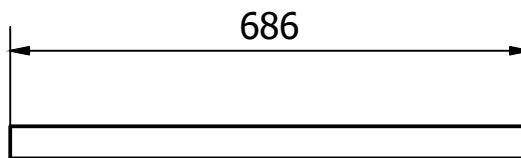
GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 10	6
PLANO: TIRANTE LONGITUDINAL TRASERO	FECHA 24/05/2017	



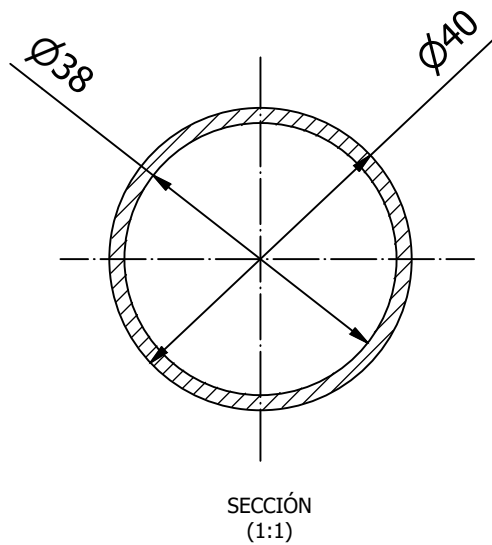
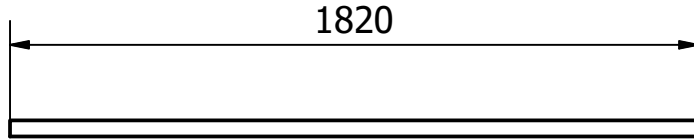
GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 10	PLANO Nº : 7
PLANO: MIEMBRO TRANSVERSAL PARABRISAS	FECHA 24/05/2017	



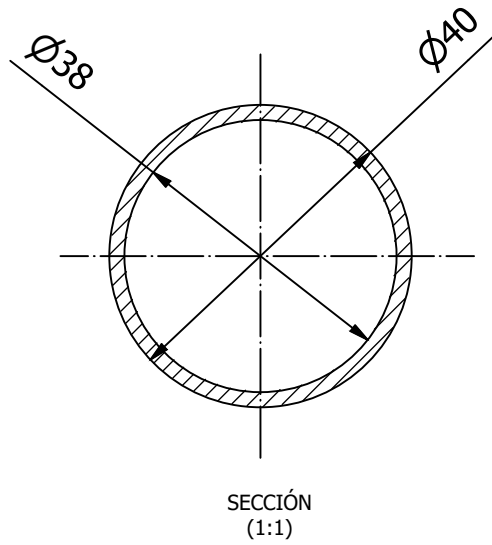
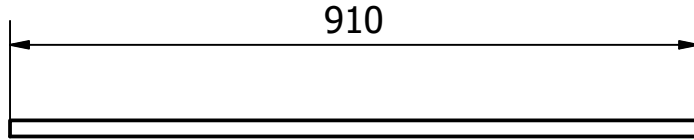
GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 10	8
PLANO: REFUERZO TECHO GRANDE	FECHA 24/05/2017	



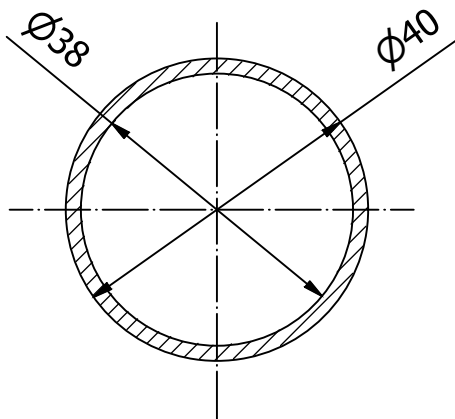
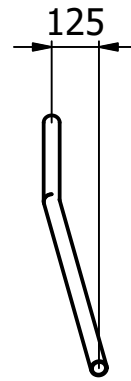
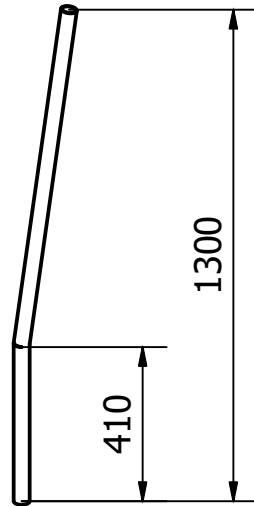
GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 10	9
PLANO: REFUERZO TECHO PEQUEÑO	FECHA 24/05/2017	



GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 20	PLANO Nº : 10
PLANO: REFUERZO TRASERO GRANDE	FECHA 24/05/2017	

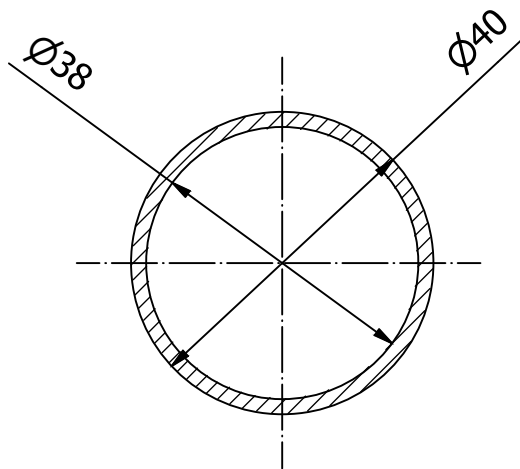
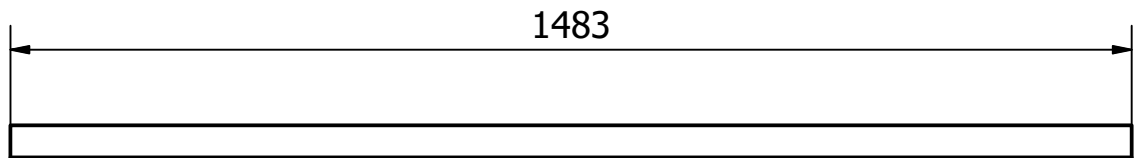


GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 10	PLANO Nº : 11
PLANO: REFUERZO TRASERO PEQUEÑO	FECHA 24/05/2017	



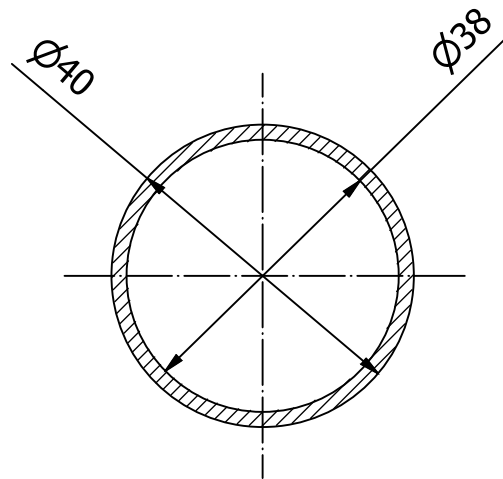
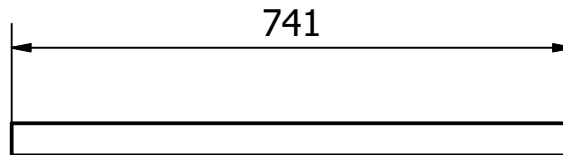
SECCIÓN
(1:1)

GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 20	PLANO Nº : 12
PLANO: REFUERZO PARABRISAS	FECHA 24/05/2017	



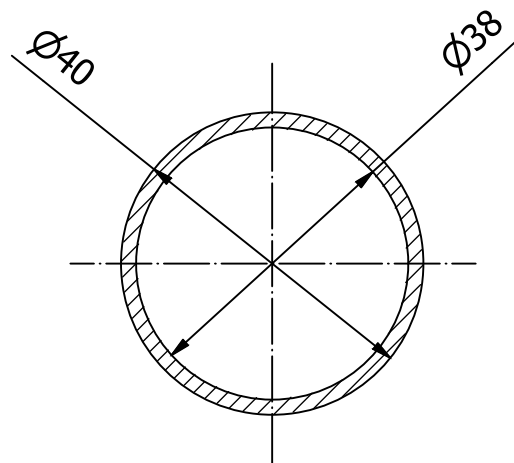
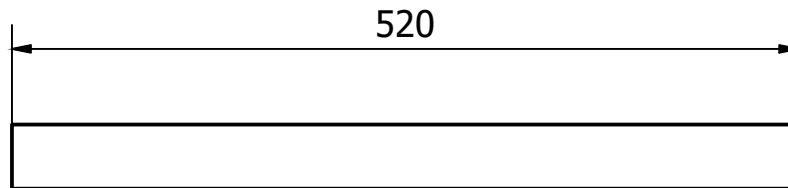
SECCIÓN
(1:1)

GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR :	FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 10
PLANO:	REFUERZO PUERTAS GRANDE	FECHA 24/05/2017
		13




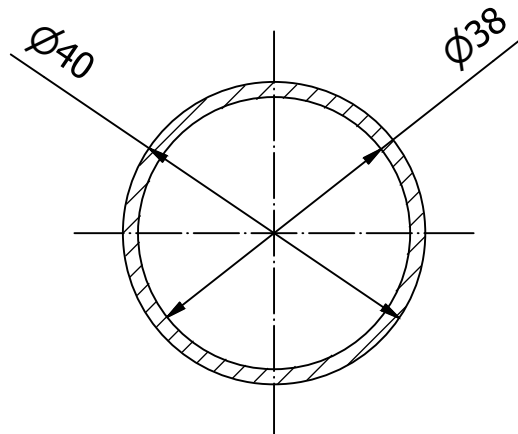
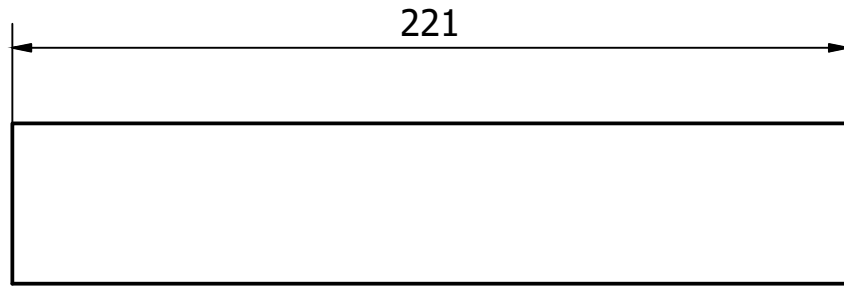
SECCIÓN
(1:1)

GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 10	PLANO Nº : 14
PLANO: REFUERZO PUERTAS MEDIO	FECHA 24/05/2017	



SECCIÓN
(1:1)

GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR :	FERRAN GIL CASTELLBLANCH	ESCALA 1 : 5
PLANO:	REFUERZO PUERTAS PEQUEÑO	FECHA 24/05/2017
		15



SECCIÓN
(1:1)

GRADO INGENIERÍA MECÁNICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE SEGURIDAD PARA AUTOMÓVIL SEGÚN LA NORMATIVA FIA		
DISEÑADO POR : FERRAN GIL CASTELLBLANCH		ESCALA 1 : 2
PLANO: REFUERZO PUERTAS PROLONGACIÓN		FECHA 24/05/2017
		16