



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

---

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA JAULA DE SEGURIDAD PARA UN  
VEHÍCULO DE COMPETICIÓN MODALIDAD RALLY”**

---

**AUTOR:** Edison Vinicio Caguana Paucar

**TUTOR:** Ing. Mg. César Hernán Arroba Arroba

**AMBATO - ECUADOR**

**Septiembre - 2022**

## CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Proyecto Técnico, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA JAULA DE SEGURIDAD PARA UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN MODALIDAD RALLY”**, elaborado por el Sr. Edison Vinicio Caguana Paucar, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 1805213160, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- El presente Proyecto Técnico es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, Septiembre 2022

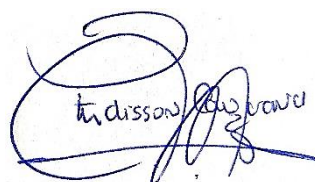


.....  
**Ing. Mg. César Hernán Arroba Arroba**  
**TUTOR**

## **AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

Yo, Edison Vinicio Caguana Paucar, con C.I: 1805213160, declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Proyecto Técnico con el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA JAULA DE SEGURIDAD PARA UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN MODALIDAD RALLY”**, así como también las ideas, contenidos, cálculos realizados, resultados, conclusiones y recomendaciones, son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Septiembre 2022



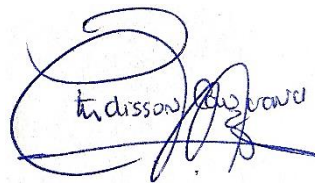
.....  
**Edisson Vinicio Caguana Paucar**  
**C.I.: 1805213160**  
**AUTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto Técnico con fines de difusión pública, además aprobamos la reproducción de este documento, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Septiembre 2022



.....  
**Edisson Vinicio Caguana Paucar**  
**C.I.: 1805213160**  
**AUTOR**

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por el estudiante Edison Vinicio Caguana Paucar de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA JAULA DE SEGURIDAD PARA UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN MODALIDAD RALLY”**.

Ambato, Septiembre 2022

Para constancia firman:

Ing. Francisco Agustín Peña Jordan, MSc.

**Miembro Calificador**

Ing. Diego Fernando Nuñez Nuñez, MSc.

**Miembro Calificador**

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo es dedicado a mis padres Sr. Juan Caguana y Sra. Nancy Paucar, personas a las que estoy eternamente agradecido por todas sus enseñanzas y su ardo esfuerzo para poder ayudarme a cumplir mi sueño de convertirme en un buen profesional.*

*A mi hermano Ing, Vladimir que desde pequeños pasamos un sinfín de acontecimientos que nos formaron como personas y logramos superarnos, a mi hermana Valeria por ser un motor más para salir adelante; ambos han sido un apoyo incondicional tanto en lo personal como en los momentos más exigentes de mi trayecto estudiantil.*

*A mis familiares que me vieron crecer y me apoyaron incondicionalmente para convertirme en el profesional de ahora.*

*A todos los buenos amigos que hice en el transcurso de esta etapa de mi vida por el apoyo y el soporte, ellos me apoyaron y dejaron huellas que me ayudaron a convertirme en el profesional de ahora.*

*Edisson Caguana*

## **AGRADECIMIENTO**

*A mis padres por haberme concebido y estar en cada paso que doy, por estar en los momentos difíciles y saber aconsejarme con las palabras correctas para no rendirme y seguir adelante.*

*A mis hermanos Ing. Vladimir que desde pequeño me sirvió de ejemplo y apoyo, a mi hermana Valeria que me da fuerza para continuar por que necesita otro buen ejemplo para que algún día sea otra buena profesional.*

*A la Universidad Técnica de Ambato quien a través de los docentes que me dieron cátedra para formarme como un buen profesional, especialmente al Ing. César Arroba que me ayudó en el desarrollo de este proyecto.*

*Y al Ing. Marco Miranda que me brindó su confianza y me abrió las puertas de su taller en donde se logró desarrollar con éxito este proyecto.*

*Edisson Caguana*

## ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

### PÁGINAS PRELIMINARES

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xix
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT .....	xxii
CAPÍTULO I.....	1
1.1. Antecedentes investigativos .....	1
1.1.1. Investigaciones previas.....	2
1.1.2. Justificación.....	4
1.2. Objetivos .....	4
1.2.1. General:.....	4
1.2.2. Específicos:.....	5
1.3. Marco Teórico .....	5
1.3.1. Rally .....	5
1.3.2. Seguridad.....	7
1.3.3. Seguridad Activa.....	8
1.3.4. Seguridad Pasiva.....	9
1.3.5. Jaula de seguridad .....	10
1.3.6. Tipos de jaula de seguridad .....	10
1.3.7. Normativa FIA .....	12
1.3.8. Ensayos de carga estática .....	25
1.3.9. Ensayos de carga dinámica.....	28
1.3.10. Teoría de falla.....	30



1.3.10.	Método de elementos finitos .....	31
1.3.11.	LS-DYNA .....	32
1.3.12.	Calidad de malla .....	34
1.3.13.	Ventajas y desventajas de diseños de jaulas de seguridad existentes ...	35
CAPÍTULO II .....		42
METODOLOGÍA.....		42
2.1.	Materiales, instrumentos y maquinaria .....	42
2.1.1.	Materiales.....	42
2.1.2.	Instrumentos.....	43
2.1.3.	Maquinaria.....	44
2.2.	Tipo de investigación.....	47
2.2.1.	Investigación bibliográfica .....	47
2.2.2.	Investigación tecnológica .....	47
2.3.1.	Diseño de la jaula de seguridad .....	47
2.3.2.	Modelado de la jaula de seguridad.....	48
2.3.1.	Modelado del vehículo .....	55
2.3.2.	Mallado del modelo.....	56
2.3.3.	Simulaciones .....	59
2.3.4.	Diseño de las conexiones soldadas .....	71
2.3.5.	Factor de seguridad a fatiga y a fluencia de los puntos de anclaje .....	72
2.3.6.	Construcción de la jaula de seguridad.....	76
CAPÍTULO III .....		78
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		78
3.1.	Resultados de simulaciones estáticas.....	78
3.1.1.	Simulación de carga vertical sobre el arco principal .....	78
3.1.2.	Simulación de carga lateral sobre el arco principal .....	80
3.1.3.	Simulación de carga vertical sobre el semiarco lateral .....	81
3.2.	Resultados de simulaciones dinámicas .....	84
3.2.1.	Simulación de impacto frontal .....	84
3.2.2.	Simulación de impacto lateral con poste .....	87
3.3.	Diseño de la conexión soldada .....	91
3.4.	Factor de seguridad a fluencia y fatiga de los puntos de anclaje.....	95

3.4. Resumen de resultados.....	101
CAPITULO IV .....	104
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
4.1. Conclusiones .....	104
4.2. Recomendaciones .....	106
ANEXOS .....	113
Anexo 1 .....	114
Anexo 2 .....	127

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vehículo de Rally en una pista de nieve [9].....	5
Figura 2. Descripción esquemática de los campos de flujo en vehículos de Rally [10]. .....	6
Figura 3. Vehículo de Rally modificado [12].....	7
Figura 4. Vehículo de Rally en competición con aficionados en lugares no permitidos para observar [9].....	7
Figura 5. Sistemas de protección en un auto de Rally [13].....	8
Figura 6. Elementos de seguridad activa en un vehículo de uso común [15]. ....	9
Figura 7. Elementos de seguridad pasiva [16].....	9
Figura 8. Diseño de una jaula de seguridad [17]. ....	10
Figura 9. Habitáculo desmontable [18].....	11
Figura 10. Habitáculo fijo [17].....	11
Figura 11. Disposición del arco principal y delantero; los tirantes longitudinales y posteriores dentro de la estructura base [22].....	13
Figura 12. Disposición del arco lateral y los tirantes dentro de la estructura base [22]. .....	14
Figura 13. Disposición de los semiarcos laterales en la estructura base [22].....	14
Figura 14. Placa de refuerzo soldada al chasis de un vehículo [21]. ....	15
Figura 15. Restricciones de las cartelas permitidas [22].....	16
Figura 16. Configuración básica 1 [22].....	16

Figura 17. Configuración básica 2 [22].....	17
Figura 18. Estructura base 3 [22].....	17
Figura 19. Tirantes diagonales indicados en color negro [23]. .....	18
Figura 20. Representación gráfica de las tres configuraciones permitidas para el refuerzo de las puertas [24]. .....	19
Figura 21. Representación gráfica de las tres configuraciones permitidas para el refuerzo de la parte superior [24].....	20
Figura 22. Representación gráfica de la dimensión "A" [24].....	20
Figura 23. La zona sombreada indica la zona límite de visión de los elementos de uniones superiores [26]. .....	22
Figura 24. Dimensiones que se deben respetar para obtener la homologación de la estructura lateral [26]. .....	22
Figura 25. Esquema del pie de anclaje para los arcos y semiarcos principales y laterales con placa de refuerzo [27]. .....	23
Figura 26. Esquema del pie de anclaje para los tirantes posteriores [27]. .....	24
Figura 27: Disposición de la carga vertical [29].....	26
Figura 28: Disposición de la carga lateral en el arco principal. ....	27
Figura 29. Disposición de carga delantera. ....	28
Figura 30. Esquema de impacto frontal con barrera fija [31].....	29
Figura 31. Esquema de impacto lateral con poste [33]. .....	29
Figura 32. Esquema del uso del método de elementos finitos [36]. .....	32

Figura 33. Ejemplo de impacto lateral simulado con Ls-Dyna [36].....	34
Figura 34. Calidad de malla según criterio jacobiano [39]. .....	35
Figura 35. Configuración de la jaula de seguridad para un Volkswagen Gol 2.0 [3].	36
Figura 36. Configuración de la jaula de seguridad para un Corsa Win 1.4 [1]. .....	36
Figura 37. Configuración 1 (a), 2 (b) y 3 (c) de la jaula de seguridad para un Citroën Saxo [2]. .....	37
Figura 38. Configuración 1 (a) y 2 (b) de la jaula de seguridad para un Seat [41]. ....	38
Figura 39. Configuración 1 (a) y 2 (b) de la jaula de seguridad para un Susuki Forza 1 [4]. .....	39
Figura 40. Configuración 1 (a) y 2 (b) de la jaula de seguridad del Volkswagen Golf V1.6 [42]. .....	39
Figura 41. Configuración de la jaula de seguridad para un Volkswagen Polo III Classic de 1996. [43].....	40
Figura 42. Configuración de la jaula de seguridad para un Peugeot 307cc [44]. .....	41
Figura 43. Flexómetro [46].....	43
Figura 44. Pie de rey [47]. .....	44
Figura 45. Tronzadora [48].....	45
Figura 46. Dobladora de tubos hidráulica [50]. .....	45
Figura 47. Máquina de soldar de la marca Cebora [51]. .....	46
Figura 48. Compresor de pintura [52]. .....	46
Figura 49. Dimensiones del vehículo Hyundai Grand i10 2017 [53]. .....	49

Figura 50. Diseño de la configuración lateral de la jaula de seguridad. ....	52
Figura 51. Diseño de la configuración posterior del arco principal.....	52
Figura 52. Diseño de la configuración posterior de los tirantes posteriores. ....	52
Figura 53. Esquema de simulaciones. ....	59
Figura 54. Hyundai Grand i10 con revisión técnica y pesajes aprobados.....	60
Figura 55. Hyundai Grand i10 con un peso de 920 kg.....	60
Figura 56. Restricciones de desplazamiento y rotación del sello rígido. ....	61
Figura 57. Carga aplicada en el eje “z” del sello rígido.....	61
Figura 58. Restricciones de desplazamiento y rotación del chasis del vehículo. ....	62
Figura 59. Número de nodos que contiene el sello del arco principal. ....	62
Figura 60. Restricciones de desplazamiento y rotación del sello rígido. ....	63
Figura 61. Carga aplicada en el eje “y” del sello rígido.....	64
Figura 62. Restricciones de desplazamiento y rotación del chasis del vehículo. ....	64
Figura 63. Número de nodos que contiene el sello del lateral del arco principal.....	65
Figura 64. Ubicación del nuevo subsistema de coordenadas. ....	66
Figura 65. Restricciones de desplazamiento y rotación del sello rígido. ....	66
Figura 66. Carga aplicada en el eje “z” del nuevo subsistema de coordenadas del sello rígido. ....	67
Figura 67. Restricciones de desplazamiento y rotación del chasis del vehículo. ....	67
Figura 68. Número de nodos que contiene el sello del semiarco principal.....	68

Figura 69. Impacto frontal del vehículo con la jaula de seguridad.....	68
Figura 70. Dimensiones de barrera CEPE R94 [56]. .....	69
Figura 71. Restricciones de desplazamiento y rotación de la barrera y el piso.....	69
Figura 72. Impacto lateral del vehículo con la jaula de seguridad. ....	70
Figura 73. Restricciones de desplazamiento y rotación de la barrera y el piso.....	71
Figura 74. Diámetro exterior e interior de la tubería. ....	72
Figura 75. Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad.....	78
Figura 76. Esfuerzo de Von Misses en los redondeos del arco principal.....	78
Figura 77. Punto de referencia en el arco principal para medir su desplazamiento. ..	79
Figura 78. Curva de desplazamiento del nodo de referencia en un tiempo de 5 ms con un desplazamiento en Z de -26 mm. ....	79
Figura 79. Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad.....	80
Figura 80. Máximo esfuerzo de Von Mises en la parte lateral del arco principal. ....	80
Figura 81. Punto de referencia en el arco principal para medir su desplazamiento. ..	81
Figura 82. Curva de desplazamiento del nodo de referencia en un tiempo de 5 ms con un desplazamiento en Y de -12.5 mm.....	81
Figura 83. Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad.....	82
Figura 84. Máximo esfuerzo de Von Misses en las uniones del pilar del parabrisas. 82	
Figura 85. Punto de referencia en el semiarco lateral para medir su desplazamiento. ....	83

Figura 86. Curva de desplazamiento del nodo de referencia en un tiempo de 5 ms con un desplazamiento en Z de -15.1 mm. ....	83
Figura 87. Impacto frontal del Hyundai Grand i10.....	84
Figura 88. Deformación final de la jaula de seguridad. ....	84
Figura 89. Vista superior del comportamiento del vehículo con jaula de seguridad al impacto lateral con poste.....	85
Figura 90. Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad impactada frontalmente.....	86
Figura 91. Valores de la Deformación plástica unitaria efectiva de la jaula de seguridad impactada frontalmente.....	86
Figura 92. Curvas de energías vs tiempo del impacto frontal. ....	87
Figura 93. Impacto frontal del Hyundai Grand i10.....	87
Figura 94. Deformación final de la jaula de seguridad. ....	88
Figura 95. Vista superior del comportamiento del vehículo con jaula de seguridad al impacto lateral con poste.....	88
Figura 96. Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad impactada lateralmente. ....	89
Figura 97. Valores de Deformación plástica unitaria efectiva de la jaula de seguridad impactada lateralmente.....	89
Figura 98. Curvas de energías vs tiempo del impacto lateral.....	90
Figura 99. Valores de esfuerzo de Von Mises y elementos seleccionados para obtener el promedio de sus esfuerzos (Elementos: 104007, 104001, 98371, 98358, 98356,104845, 104862, 104885, 104896, 98476).....	92



Figura 100. Promedio de las curvas de esfuerzos de los elementos seleccionados en un tiempo de 5 ms con un esfuerzo máximo de 162 MPa. ....	92
Figura 101. Diámetro exterior e interior de la tubería. ....	93
Figura 102. Desplazamiento de 1 mm del punto de anclaje en un tiempo de 25 ms. ....	95
Figura 103. Valores de esfuerzo principal máximo de 72 MPa (a) y mínimo de -145 MPa (b).....	95
Figura 104. Vista frontal del vehículo sin tapicería y asientos.....	114
Figura 105. Vista posterior del vehículo sin tapicería y asientos. ....	114
Figura 106. Parte interior del vehículo sin tapicería y asientos.....	115
Figura 107. Vista lateral del vehículo totalmente desmontado. ....	115
Figura 108. Parte inferior del vehículo totalmente desmontado.....	116
Figura 109. Cortadora manual .....	116
Figura 110. Dobladora hidráulica. ....	117
Figura 111. Poleas de diferentes diámetros.....	117
Figura 112. Semiarco lateral.....	118
Figura 113. Preparación de la carrocería interna del vehículo. ....	118
Figura 114. Modelo de suelda MIG.....	119
Figura 115. Equipo completo de suelda MIG.....	119
Figura 116. Proceso de soldadura en las uniones de los elementos de la estructura de seguridad. ....	120

Figura 117. Tirantes posteriores y refuerzos soldados a la parte superior de la suspensión posterior.....	120
Figura 118. Puntos de anclaje soldados a la carrocería interna del vehículo. ....	121
Figura 119. Empapelado de la parte exterior del vehículo.....	121
Figura 120. Vista lateral del empapelado del vehículo. ....	122
Figura 121. Pintado del interior del vehículo y la estructura de la jaula de seguridad. ....	122
Figura 122. Vista frontal del pintado de la estructura d seguridad. ....	123
Figura 123. Autopartes colocadas nuevamente en el vehículo.....	123
Figura 124. Tablero, volante y asientos de rally.....	124
Figura 125. Sistema eléctrico y de transmisión.....	124
Figura 126. Placa de identificación de la jaula de seguridad homologada. ....	125
Figura 127. Hyundai Grand i10 con jaula de seguridad instalada. ....	125
Figura 128. Sistema de ventilación instalada en el techo.....	126
Figura 129. Sistema de cortafuego y cortacorriente. ....	126

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de los tubos utilizados [27]. .....	24
Tabla 2. Teorías de falla [34].....	30
Tabla 3. Composición química del Acero ASTM A500 GR. A [45]. .....	42
Tabla 4. Propiedades físicas de ASTM A500 GR. A [45]. .....	43
Tabla 5. Índice de cumplimiento de diseños de jaulas de seguridad existentes .....	48
Tabla 6. Características técnicas del vehículo Hyundai Grand i10 2017 [54]. .....	49
Tabla 7. Descripción detallada de perfiles estructurales .....	53
Tabla 8. Descripción del modelado de la estructura de seguridad.....	54
Tabla 9. Descripción del modelado del vehículo.....	55
Tabla 10. Descripción del mallado del modelo final. ....	57
Tabla 11. Descripción y características del mallado.....	58
Tabla 12. Carga vertical resultante para cada nodo del sello .....	62
Tabla 13. Carga resultante final para cada nodo del sello.....	65
Tabla 14. Carga resultante final para cada nodo del sello.....	68
Tabla 15. Condiciones de simulación para impacto frontal. ....	70
Tabla 16. Condiciones de simulación para impacto lateral con poste. ....	71
Tabla 17. Parámetros en el factor de condición superficial de Marin [57]......	75
Tabla 18. Resultados de los factores de seguridad a fluencia y a fatiga de los puntos de anclaje. ....	97

Tabla 19. Resumen de resultados. ....101

## RESUMEN

El presente proyecto técnico se realizó con el fin de diseñar y construir una jaula de seguridad que cumpla con todos los parámetros descritos para estructuras de seguridad en el Artículo 253 del Anexo J de la Normativa de la Federación Internacional de Automovilismo (FIA) y el Reglamento de la Federación Ecuatoriana de Automovilismo y Kartismo (FEDAK).

Se investigó diferentes diseños existentes de jaulas de seguridad para poder obtener una configuración adecuada de la estructura y fue modelada mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD) en base al modelo del vehículo Hyundai Grand i10. Para la simulación se utilizó un software de ingeniería asistida por computador (CAE) en donde se realizaron ensayos de cargas aplicadas en la estructura para medir su desplazamiento en diferentes direcciones, también se realizaron ensayos de choque frontal y lateral con un poste para comprobar si la estructura ensamblada en el vehículo soporta estos impactos sin que se rompa ninguno de sus elementos.

Los resultados de las simulaciones muestran que la jaula de seguridad cumple con los rangos establecidos en el Reglamento de homologación para jaulas de seguridad de la FIA y se obtuvo un buen rendimiento en condiciones normales de funcionamiento y en casos de impacto.

**Palabras claves:** Rally, Jaula de seguridad, Automovilismo, FIA, CAD, CAE.

## **ABSTRACT**

This technical project was carried out in order to design and build a safety cage that complies with all the parameters described for safety structures in Article 253 of Annex J of the International Automobile Federation (FIA) Regulations and the Regulations of the Ecuadorian Automobile and Karting Federation (FEDAK).

Different existing safety cage designs were investigated in order to obtain an adequate configuration of the structure and it was modeled using computer aided design (CAD) software based on the Hyundai Grand i10 vehicle model. A computer aided engineering (CAE) software was used for the simulation, where tests of loads applied on the structure were performed to measure its displacement in different directions, also frontal and lateral crash tests with a pole were performed to check if the structure mounted on the vehicle withstands these impacts without breaking any of its elements.

The results of the simulations show that the safety cage complies with the ranges established in the FIA homologation regulations for safety cages and a good performance was obtained under normal operating conditions and in cases of impact.

**Keywords:** Rally, safety cage, automobile, FIA, CAD, CAE.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA JAULA DE SEGURIDAD PARA UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN MODALIDAD RALLY”

#### **1.1. Antecedentes investigativos**

Para los vehículos de competencia el tema de seguridad es uno de los más complejos, puesto que esto implica competir en vías de diferente orden según las categorías. El Rally se lo realiza en la mayoría de carreteras de asfalto, tierra, nieve o mixtas entre las mencionadas, de igual manera puede presentarse zonas peligrosas o curvas en donde puede ocurrir algún accidente; debido a esto los vehículos deben contar con dispositivos adicionales para salvaguardar la integridad de los competidores [1].

Existen medidas de seguridad obligatorias como los overoles ignífugos, cinturones de seguridad de cinco puntos, cascos y sobre todo la estructura de la jaula seguridad la misma que está destinada a resistir cualquier tipo de golpe causado por vuelco o estrellamiento [1].

La evolución y preparación de estos vehículos conlleva a prepararlos para que sean más veloces y que no pierdan velocidad en lugares sinuosos o cerrados debido a que el tiempo es vital para definir las posiciones y con lograr la victoria [1].

Las jaulas de seguridad conocida bajo otros nombres como barras de seguridad o jaulas antivuelco se define como una estructura metálica la cual es diseñada y construida de tubos que pueden ser de una gran variedad de materiales, su finalidad principal es no permitir que la deformación de la carrocería en el momento que suceda un accidente aplaste o sea un riesgo para los ocupantes o competidores, es obligatorio que todos los vehículos de competencia Rally cuenten con su habitáculo los mismos que deben cumplir con las normas requeridas por este deporte; existe una gran variedad de habitáculos en donde los diseños dependen de la entidad que organiza estas competencias para este caso la Federación Internacional del Automóvil (FIA), los

mismos que están encargados de regular, controlar y prohibir todo lo referentes a las preparación de vehículos [1].

### **1.1.1. Investigaciones previas**

Desde varios años atrás se ha podido implementar el uso de software de CAD y métodos como el Análisis por Elementos Finitos (FEA) lo que minimiza los tiempos y costos de fabricación siempre teniendo en cuenta la aplicación de la normativa impuesta por la FIA para garantizar la seguridad de los tripulantes siendo de gran ayuda en el diseño óptimo; en el caso de no soportar las cargas dispuestas en el Reglamento de homologación de las jaulas de seguridad se rediseña con más elementos utilizando el criterio de rigidez de los elementos que lo conforman, al final se puede encontrar una configuración de la geometría que soporte las cargas con un amplio margen de seguridad [2].

La jaula de seguridad es indispensable para la protección de los ocupantes debido a que proporciona una fuerza adicional a la carrocería. Para su diseño es indispensable realizar pruebas de resistencia mecánica utilizando métodos de elementos finitos para evitar el gasto de recursos en pruebas reales, disminuyendo los costos y tiempos de fabricación [2].

En el año 2014 se realizaron pruebas en softwares más avanzados mediante el método de elementos finitos con resultados confiables para el diseño de una jaula de seguridad bajo normativa FIA vigente para ese año, la cual fue construida e instalada en un auto Corsa de rally. A partir de este análisis se puede evaluar ciertos factores como la funcionalidad, factibilidad y seguridad de este tipo de estructuras. En Ecuador se han utilizado materiales de manufactura nacional y modelos que no llegan al límite de sus propiedades mecánicas lo que brinda seguridad a sus ocupantes [1].

En el año 2015 estudios realizados en la Escuela Politécnica del Ejército se han mejorado los diseños anteriores e incluso se ha desarrollado más elementos para un



auto de rally con material nacional, cumpliendo con los factores de seguridad y validándolos con la normativa FIA [3].

En el mismo año investigaciones realizadas por la Universidad Politécnica Salesiana en un proyecto técnico basado en la normativa FIA, establecen los requisitos para la fabricación de una jaula de seguridad para un auto Suzuki de rally en donde se utilizó el método de elementos finitos con un tiempo de 0,05 segundos de análisis. La normativa exige un diseño basado en ensayos mecánicos donde se aplican las cargas que deben soportar en situaciones críticas de impacto frontal, vuelco o un impacto lateral, en donde se obtengan como resultados deformaciones máximas permitidas dentro del espacio de supervivencia de la tripulación. En Ecuador, la investigación en el diseño y construcción de una jaula de seguridad es mínima, por esta razón este tipo de estructuras presentan defectos derivados de su construcción y materiales que afectan la seguridad general del vehículo [4].

En el año 2016 una investigación italiana determinó que las características del material influyen en la rigidez del diseño, por lo general el material bajo en carbono no tiene la capacidad de satisfacer las condiciones de seguridad regidas por la norma (<50 mm de deformación) lo que obliga a modificar la geometría hasta obtener los refuerzos para evitar una deformación no permitida [5].

En el año 2018 se desarrolló un proyecto en la Universidad Técnica de Ambato enfocada en el diseño y construcción de una estructura de seguridad para un vehículo Chevrolet Corsa modalidad Trepada de montaña y Rally, se realizó y analizó bajo normativas oficiales FIA donde se observó que la jaula de seguridad tiene un buen comportamiento como estructura dentro del vehículo sin que se produzcan deformaciones ni rupturas en ninguna parte de la estructura [6].

En la actualidad las empresas internacionales dedicadas a la investigación y producción de jaulas de seguridad tienen como claro objetivo evitar la deformación de la carrocería derivado a la reducir daños en el caso de colisión o vuelcos [7].

### **1.1.2. Justificación**

Durante algunos años el deporte automovilístico se lo ha desarrollado con un bajo nivel de seguridad en todo lo relacionado con la protección de los pilotos en la cabina del vehículo, debido a esto a través de los años se han ido implementando reglamentos técnicos para la construcción de estructuras de seguridad. Existe interés por mejorar las condiciones de seguridad del automovilismo ecuatoriano aplicando el conocimiento de ingeniería para poder incrementar el nivel de calidad de las jaulas de seguridad.

Mediante el análisis CAD/CAE se requiere diseñar un modelo de jaula de seguridad que cumplan con los requisitos exigidos en el artículo 253 de la FIA para vehículos de producción de modalidad rally para su posterior construcción. Utilizar el método de elementos finitos para el diseño y validación resulta favorable, debido a que la calidad de los resultados nos proporcionará más confianza a la hora de validar el proyecto para su construcción.

La investigación busca mejorar la calidad de las jaulas de seguridad construidas en Mecánica Miranda mediante simulaciones estáticas y dinámicas para así garantizar el bienestar de sus clientes que en su mayoría son pilotos de Rally

Aplicando el conocimiento de ingeniería al automovilismo, no sólo va a mejorar la calidad de seguridad, sino que se puede mejorar el desarrollo tecnológico en esta industria y aumentar el nivel de competitividad de Mecánica Miranda.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General:**

Diseñar y construir una jaula de seguridad para un vehículo de competición modalidad Rally.

### 1.2.2. Específicos:

- Desarrollar una configuración adecuada de la jaula de seguridad analizando las ventajas y desventajas de diseños existentes.
- Diseñar la jaula de seguridad en base a las normativas FIA para determinar su comportamiento a las diferentes colisiones solicitadas aplicando análisis computacional por el método de elementos finitos.
- Comprobar si los resultados cumplen con los parámetros de la Normativa FIA Art 253 Anexo J.
- Construir e instalar la jaula de seguridad en un vehículo de competición modalidad Rally de la marca Hyundai Grand i10.

### 1.3. Marco Teórico

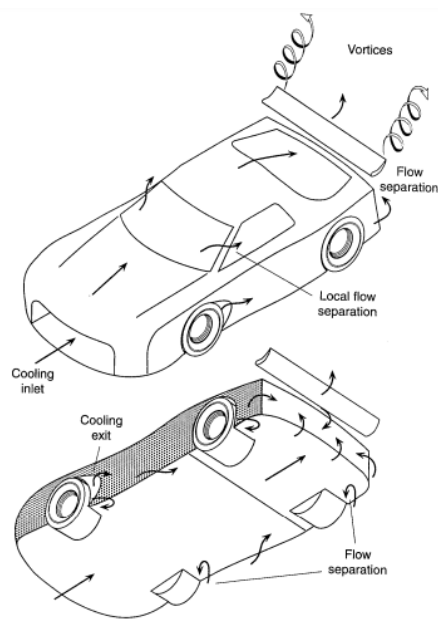
#### 1.3.1. Rally

Es un deporte automovilístico que inicia desde el año de 1911 en Montecarlo. Ha logrado acoger mucha afición que día a día va aumentando el interés por este deporte a nivel mundial. Tiene una durabilidad de algunos días dependiendo de la dificultad, la pista y el lugar donde se desarrolle; las pistas o trazados pueden ser de tierra, nieve o asfalto y mixtas donde se alternan entre asfalto y tierra, nieve o tierra y nieve en donde existan una gran variedad de obstáculos. La Figura 1 indica un vehículo de competición de Rally realizado en Monte Carlo en una pista de nieve [8].



**Figura 1.** Vehículo de Rally en una pista de nieve [9].

En 1950 la tecnología utilizada para el diseño de autos progresaba rápidamente con el fin de alcanzar mayor velocidad, pero en los años 60 la velocidad de los autos subió brutalmente lo que condujo a las agencias reguladoras de autos a limitar la potencia de los motores; lo que trajo como consecuencia que los diseñadores buscaran aprovechar el diseño aerodinámico de los vehículos. En los autos que participan en el Rally se da mayor importancia al flujo de aire. La Figura 2 indica las principales modificaciones que se realizan sobre los autos de pasajeros enfocados en optimizar su desempeño basado en el flujo [10].

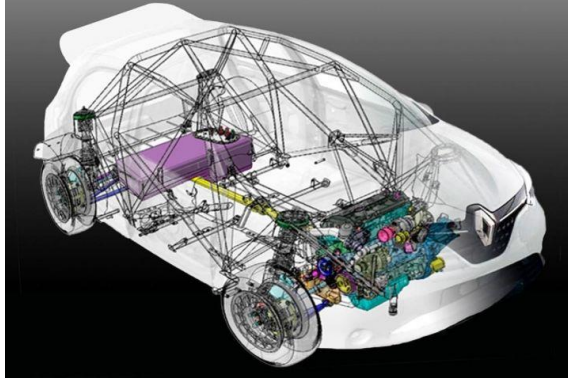


**Figura 2.** Descripción esquemática de los campos de flujo en vehículos de Rally [10].

En la Figura 3, se observa la actualidad de los vehículos de competición que sufren grandes modificaciones en su carrocería, transmisión, caja de velocidades, frenos y neumáticos, todo esto enfocado a cumplir la reglamentación de la FIA [11].

Existen carros que son homologados por FIA, es decir, cumplen con todos los anexos y artículos que conlleva esta homologación. Este tipo de vehículos sólo pueden

participar en categorías específicas debido a su gran potencia en el motor y la calidad de cada uno de los componentes que posee.



**Figura 3.** Vehículo de Rally modificado [12].

### 1.3.2. Seguridad

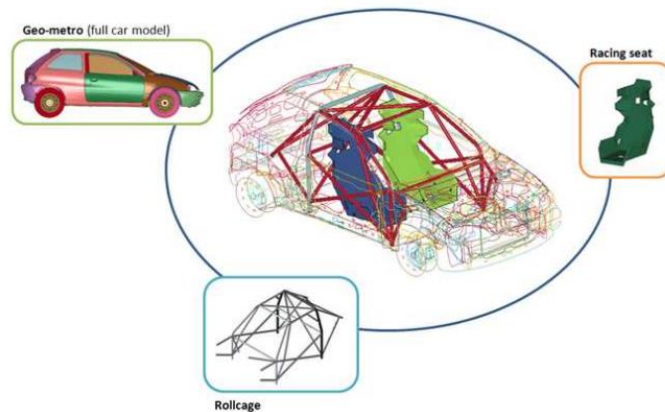
La seguridad en el Rally es muy importante debido a que es un deporte automovilístico que tiene muchos riesgos tanto para pilotos como para espectadores por los peligros existentes en los diferentes circuitos como se aprecia en la Figura 4, aunque en algunos casos se debe a la falta de cultura y educación de los asistentes; debe existir una buena organización por parte de las autoridades competentes para minimizar en lo posible los accidentes [11].



**Figura 4.** Vehículo de Rally en competición con aficionados en lugares no permitidos para observar [9].

La seguridad tiene un papel primordial porque es determinante en la integridad física del piloto y copiloto. Es importante contar con seguridad activa como con seguridad pasiva que gracias a los avances tecnológicos se pueden optimizar y así aumentar su eficacia al momento de afrontar daños físicos en los accidentes [13].

La seguridad de los autos de Rally ha mejorado notablemente en las últimas décadas esto debido a la exitosa innovación en la fabricación de los autos con materiales resistentes a los impactos, mejores asientos y la jaula de seguridad como se muestra en la Figura 5. En la jaula de seguridad los laterales son los más vulnerables debido a la cercanía de los ocupantes (200 mm aprox.) a la cubierta del auto, lo que disminuye el espacio para instalar ciertos sistemas de protección y disipación de energía [13].



**Figura 5.** Sistemas de protección en un auto de Rally [13].

### 1.3.3. Seguridad Activa

Es el conjunto de elementos que promueven una mayor eficacia y estabilidad al vehículo en marcha y en la medida de lo posible, evitar un accidente. En la Figura 6, se indican los sistemas de seguridad básicos que pueden existir en un vehículo de uso común [14].

- Frenos ABS (Anti-lock Breaking System).
- Neumáticos.

- Sistema de suspensión.
- Sistema de alumbrado.
- Sistema de control de estabilidad.



**Figura 6.** Elementos de seguridad activa en un vehículo de uso común [15].

#### 1.3.4. Seguridad Pasiva

Son todos los elementos que brindan seguridad al conductor y a sus ocupantes, disminuyendo el peligro y las consecuencias cuando el accidente es inevitable. En la Figura 7 se denotan los elementos de seguridad pasiva en acción [14].

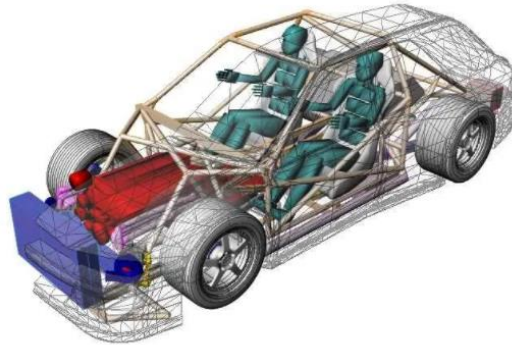
- Cinturón de seguridad
- El airbag
- Apoya cabezas



**Figura 7.** Elementos de seguridad pasiva [16].

### 1.3.5. Jaula de seguridad

La jaula de seguridad denominada también jaula antivuelco, barra de seguridad, barras anti vuelco o roll cage, es el elemento principal en cualquier coche de carreras cuyo fin es proteger al conductor y a su acompañante en el caso de un accidente por impacto o vuelco. En algunos vehículos forma parte de la estructura principal del chasis en donde se armoniza la rigidez, seguridad, peso y costo. Es uno de los elementos de seguridad más importantes por lo que debe ser construida implementando la norma de la FIA. En la Figura 8, se muestra un ejemplo de un diseño fundamental de una jaula de seguridad para el bienestar de los pilotos, así como para el desempeño del vehículo en una competición [17].



**Figura 8.** Diseño de una jaula de seguridad [17].

### 1.3.6. Tipos de jaula de seguridad

Existen dos tipos de jaulas o habitáculos de seguridad como son los desmontables y los habitáculos fijos [1].

#### **Habitáculos desmontables**

Este tipo de estructuras pueden ser fácilmente desmontables y usarse en otro vehículo de las mismas proporciones.



En la Figura 9, se observa un tipo de habitáculo que es armado y sujeto a la carrocería por medio de pernos de sujeción [1].



**Figura 9.** Habitáculo desmontable [18].

### **Habitáculos de fijos**

Este tipo de estructura va a modificar por completo la integridad del vehículo y su desmontaje va a ser muy difícil en caso de disponer dicha acción.

En la Figura 10, se observa un tipo de habitáculo fijo que está montado en el vehículo por medio del proceso de soldadura dependiendo del diseño y la necesidad. Estos se deben diseñar y construir de acuerdo a la norma y especificaciones de la FIA [1].



**Figura 10.** Habitáculo fijo [17].

### **1.3.7. Normativa FIA**

Es una organización mundial que cuyo fin es promover el automovilismo deportivo, la movilidad sostenible y accesible para los usuarios de carretera del mundo. En lo referente a movilidad, tiene el fin de garantizar que los sistemas de transporte sean seguros, asequibles y limpios para que estén disponibles para todos [19].

La Normativa no solo regula el diseño de las jaulas, sino que también abarca todo el equipamiento de un vehículo de competición. De la misma manera cada categoría (Rally, camiones, GT, Todo terreno, etc.) tienen su propia normativa y sus respectivos anexos [19].

#### **Regulación de la geometría de la estructura de seguridad**

Los habitáculos de seguridad se encuentran reglamentados en el Anexo J de la Reglamentación FIA, concretamente en el Artículo 253-8 y su instalación resulta de obligatorio cumplimiento [20].

Para que una jaula de seguridad sea legal tendrá que ser homologada por una Autoridad Deportiva Nacional (ADN) y disponer de una placa identificativa colocada por un instructor y que esta no pueda borrarse ni copiarse en donde deberá estar expuesta toda la información; o bien puede estar homologada por la FIA y de esta manera ser introducida como extensión en la ficha de homologación del vehículo [20, 6].

#### **Definición de sus elementos**

Según el Artículo 253-8.2 del Anexo J de la FIA, una estructura de seguridad puede estar constituida de los siguientes componentes:

- **Arco de seguridad**

Estructura tubular individual que forma un arco con dos bases de anclaje [21].

- **Arco principal**

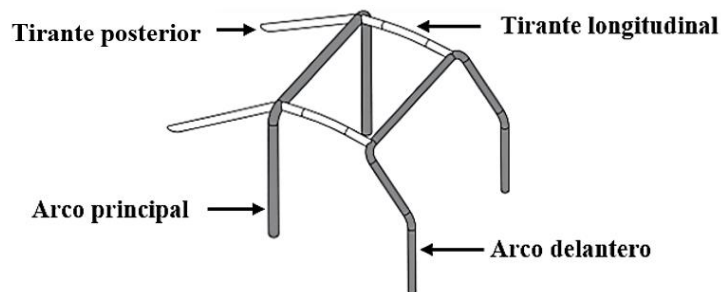
Es un componente vertical que está compuesto por un solo arco tubular el mismo que está posicionado a una inclinación máxima de  $\pm 10^\circ$  respecto al plano vertical como se observa en la Figura 11, está situado en un plano transversal al vehículo el cual en simultáneo deberá ubicarse detrás de los asientos delanteros [21].

- **Arco delantero**

Es un arco de seguridad similar al arco principal cuya geometría se rige por la forma de los montantes y el borde superior del parabrisas como se muestra en la Figura 11 [21].

- **Tirante longitudinal**

Son tubos casi longitudinales los mismos que pueden ser combinados ligeramente para amoldarse a la forma superior del vehículo que va a unir el arco principal con el arco delantero como se observa en la Figura 11 [21].



**Figura 11.** Disposición del arco principal y delantero; los tirantes longitudinales y posteriores dentro de la estructura base [22].

- **Tirante transversal**

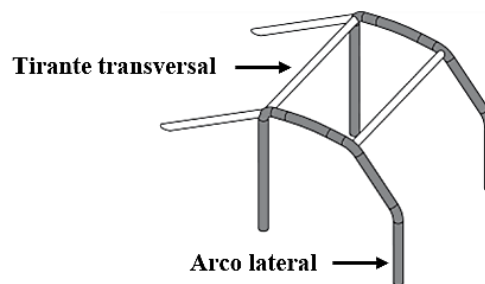
Es un tubo simple que une los componentes superiores de los arcos o semiarcos laterales como se observa en la Figura 12 [21].

- **Tirante diagonal**

Es un tubo transversal que une los ángulos superiores del arco principal o un extremo del arco transversal con el pie de anclaje opuesto del arco y el extremo superior de un tirante con el pie de anclaje del otro tirante trasero [21].

- **Arco lateral**

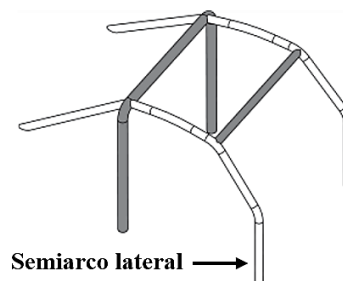
Es una estructura de geometría casi longitudinal y vertical la cual está constituida por un arco tubular individual como se indica en la Figura 12. Este arco arranca en la parte frontal del vehículo, siguiendo el pilar delantero del mismo montante del parabrisas para terminar con un pilar trasero el cual deberá ser completamente vertical a vista lateral y estará situado detrás de los asientos [21].



**Figura 12.** Disposición del arco lateral y los tirantes dentro de la estructura base [22].

- **Semiarco Lateral**

Se define de manera idéntica al arco lateral sin el pilar trasero como se observa en la Figura 13 [21].



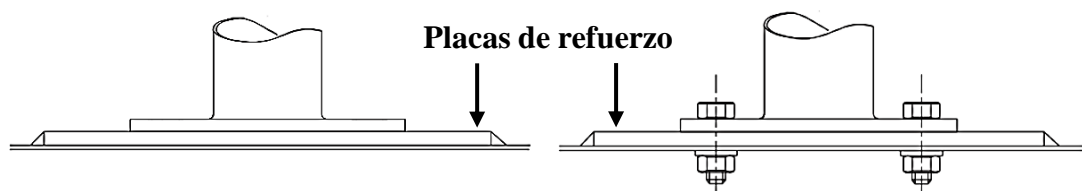
**Figura 13.** Disposición de los semiarcos laterales en la estructura base [22].

- **Punto de anclaje**

Es una placa soldada en los extremos inferiores de los arcos y los tirantes que va permitir unir su posterior unión al chasis o carrocería utilizando soldadura y/o uniones roscadas, también puede añadirse una placa de refuerzo que aumente la rigidez de la unión [21].

- **Placa de refuerzo**

Es una placa metálica fijada a la carrocería o al chasis bajo el punto de anclaje como se indica en la Figura 14 y su área mínima varía entre 60 y 120 cm<sup>2</sup> dependiendo de la estructura de seguridad que una [21].



**Figura 14.** Placa de refuerzo soldada al chasis de un vehículo [21].

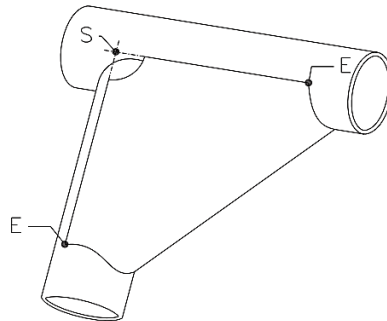
- **Cartela**

Es un elemento que sirve de refuerzo para las uniones entre arcos fabricada de chapa doblada en forma de “U” con un espesor mínimo de 1 mm, pero debido a la dificultad de soldar placas de este grosor se emplea un perfil laminado de espesor que varía entre 2 a 2,5mm.

Los extremos de dicho elemento de refuerzo del Punto “E” se situarán a una distancia del punto superior del ángulo Punto “S” de entre 2 y 4 veces al diámetro exterior del tubo de mayor grosor unidos como se indica en la Figura 15 [22].

Para aligerar la cartela es permitido hacer un orificio en el lado plano con un diámetro no superior al diámetro extremo del tubo de mayor diámetro que une, de igual manera

se podrá realizar un corte en la parte superior del ángulo siempre que no supere 1,5 veces el diámetro externo del mayor de los elementos tubulares [22].



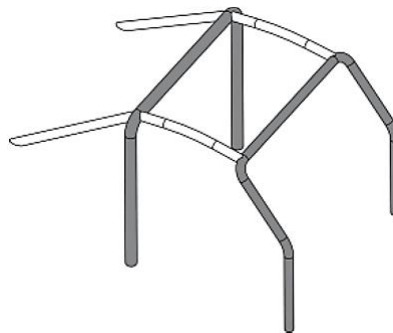
**Figura 15.** Restricciones de las cartelas permitidas [22].

### **Especificaciones geométricas**

Las especificaciones geométricas obligatorias para las estructuras de seguridad se establecen en el Artículo 253-8.3 del Anexo J de la FIA.

Existen tres configuraciones básicas de las cuales se va a poder desarrollar las estructuras de seguridad finales según el Artículo 253-8.3.1 del Anexo J de la FIA.

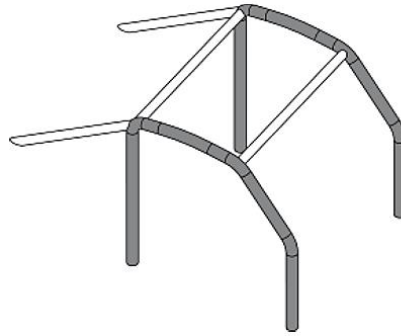
- **Configuración básica 1**



**Figura 16.** Configuración básica 1 [22].

Está compuesta por 1 arco principal, 1 arco frontal, 2 miembros longitudinales superiores, 3 tirantes longitudinales posteriores y cuenta con 6 puntos de anclaje como se indica en la Figura 16 [22].

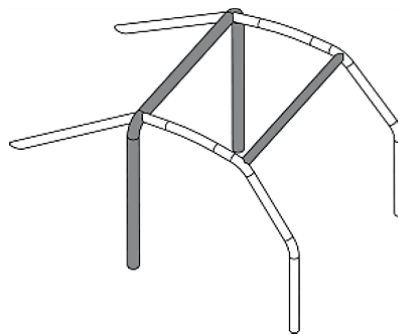
- **Configuración básica 2**



**Figura 17.** Configuración básica 2 [22].

Está compuesta por 2 arcos laterales, 2 miembros transversales superiores, 2 tirantes longitudinales en la parte trasera y cuenta con 6 punto de anclaje como se indica en la Figura 17 [22].

- **Configuración básica 3**



**Figura 18.** Estructura base 3 [22].

Está compuesta por 2 semiarcos laterales, un elemento transversal que se sitúa en la parte superior, 2 tirantes longitudinales posteriores y cuenta que 6 punto de anclaje como se indica en la Figura 18 [22].

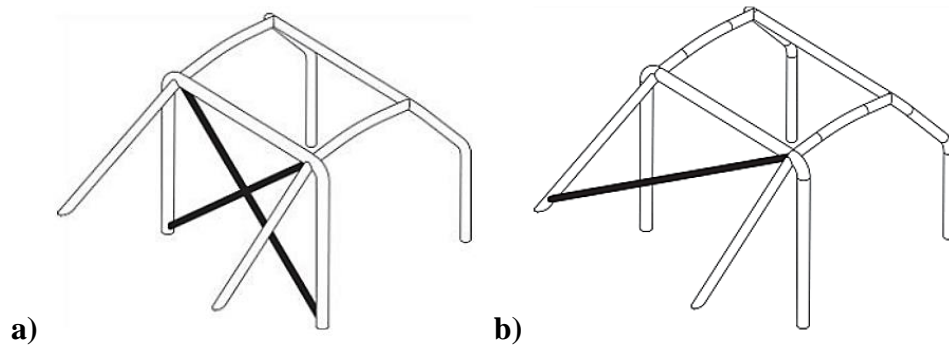
### **Refuerzos de obligada instalación**

Debido a que la estructura base no cumple con los requisitos mínimos de seguridad exigidos en la actualidad por las autoridades deportivas se debe instalar una serie de refuerzos obligatorios establecidos en el Artículo 253-8.3.2.1 del Anexo J de la FIA.

- **Tirante longitudinal**

El arco principal se reforzará con dos tirantes diagonales completamente rectos, esto se anclará en la parte inferior del arco principal a una distancia mínima de 100mm del punto de anclaje y en la parte superior no se podrá superar los 100mm de la unión del arco principal con el tirante superior como se indica en la Figura 19a [23].

Además, se podrá contar con un tirante que se ubique en la intersección superior del arco principal con el tirante trasero el cual se unirá a la parte inferior del tirante trasero opuesto a una distancia mínima de 100mm del punto de anclaje como se indica en la Figura 19b [23].

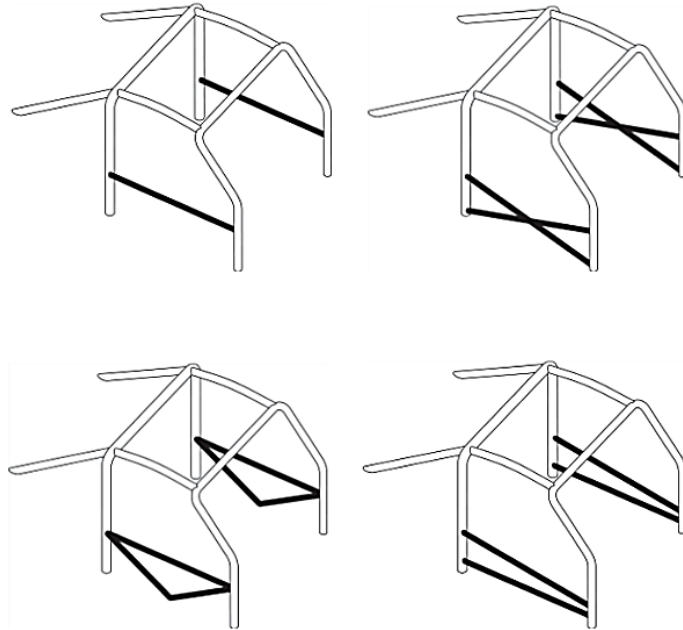


**Figura 19.** Tirantes diagonales indicados en color negro [23].



- **Barras en las puertas laterales**

La parte lateral delantera del vehículo se deberá reforzar utilizando elementos longitudinales siguiendo una de las tres configuraciones permitidas que se indican en la Figura 20 [23].



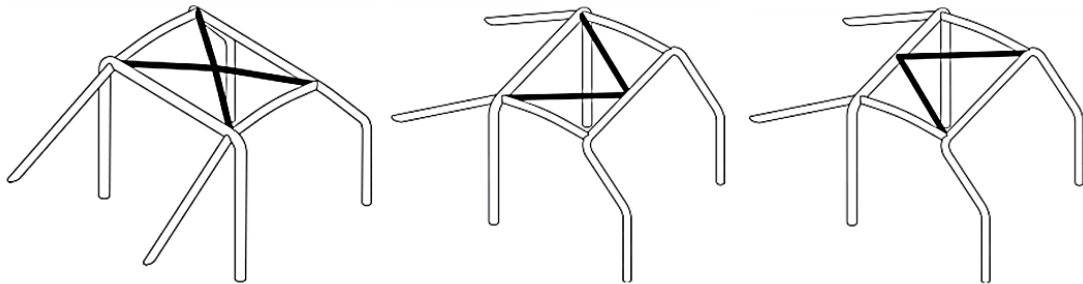
**Figura 20.** Representación gráfica de las tres configuraciones permitidas para el refuerzo de las puertas [24].

Hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los puntos de anclaje de los refuerzos superiores se deberán colocar lo más elevado posible sin sobrepasar la mitad de la altura total de la puerta [24].
- Si se realizara el refuerzo de configuración de las barras longitudinales en forma de “X” uno de los elementos deberá ser una barra de una sola pieza [24].
- Para los vehículos de competición modalidad rally la instalación de los refuerzos por ambos lados será obligatoria [24].

- **Refuerzo de techo**

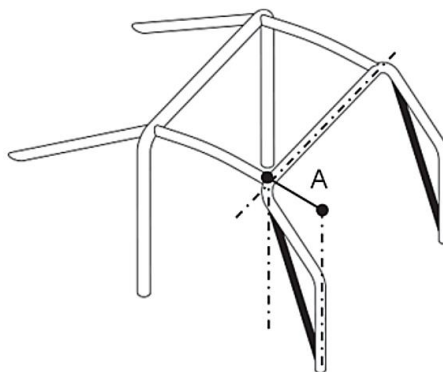
La parte superior de la estructura se deberá reforzar utilizando elementos longitudinales siguiendo una de las tres configuraciones permitidas e indicadas en la Figura 21 [24].



**Figura 21.** Representación gráfica de las tres configuraciones permitidas para el refuerzo de la parte superior [24].

Guiándonos en la Normativa, los extremos de los miembros no distarán más de 100mm de la unión entre arcos y miembros de la estructura base, en el caso de las configuraciones en “V” si los tubos no se juntan entre sí, la distancia entre ellos no debe ser mayor a 100mm en el momento de la unión con el arco o elemento transversal superior [24].

- **Pilar del refuerzo del parabrisas**



**Figura 22.** Representación gráfica de la dimensión "A" [24].

Es obligatorio la instalación cuando la Dimensión “A” es superior a 200mm, este elemento podrá ser curvado en un ángulo no superior a 20° siempre que de manera lateral sea rectilíneo [24].

La parte superior deberá situarse a una distancia no mayor a 100mm de la unión entre el arco delantero y el miembro longitudinal transversal en cambio la parte inferior deberá estar a menos de 100mm del pie de anclaje del arco frontal como se indica en la Figura 22 [24].

- **Ángulos y uniones**

Según el Artículo 253-8.3.2.1.5 del Anexo J de la FIA, se deberá instalar 2 cartelas de refuerzo en:

- Uniones entre los miembros diagonales del arco principal [24].
- Uniones entre los refuerzos del techo de las puertas y cuenten con una configuración en “X” [23].

### **Especificaciones complementarias**

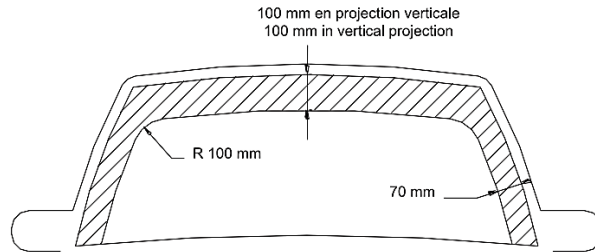
La estructura de seguridad en su posición longitudinal debe estar totalmente contenida entre los anclajes de los elementos de las suspensiones delanteras y traseras que van a soportar las cargas verticales (muelles y amortiguadores) [25].

Los refuerzos suplementarios que superen estos límites se permiten entre la estructura de seguridad y los puntos de anclaje de las barras estabilizadoras traseras en la carrocería/chasis. Cada uno de los puntos de anclaje podrán estar conectados a la estructura de seguridad mediante tuberías de dimensiones de 30x1,5 mm [25].

### **Representaciones geométricas en las estructuras de protección**

Según el Artículo 253-8.3.2.5 del Anexo J de la FIA, para la proyección frontal de un vehículo, los ángulos y uniones de los elementos superiores de la estructura de

seguridad solamente podrán ser visibles si se encuentran dentro de la zona delimitada por la Figura 23 [26].



**Figura 23.** La zona sombreada indica la zona límite de visión de los elementos de uniones superiores [26].

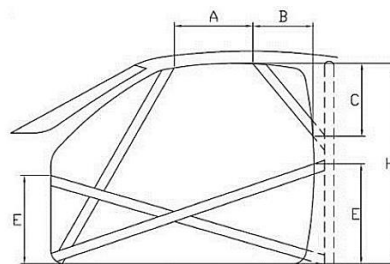
Por otra parte, los refuerzos laterales de la estructura de la zona de la puerta deberán respetar las dimensiones estipuladas que se indican en la Figura 24, en donde:

- La dimensión “A” tendrá una longitud mínima de 300mm [26].
- La cota “B” no superará los 250mm [26].
- La cota “C” tendrá un máximo de 300mm [26].
- La altura “E” no superará la mitad de la altura total de la puerta (H) medida desde su base [26].

De esta manera:

$$E = 0,5 * H$$

**Ecuación 1.**



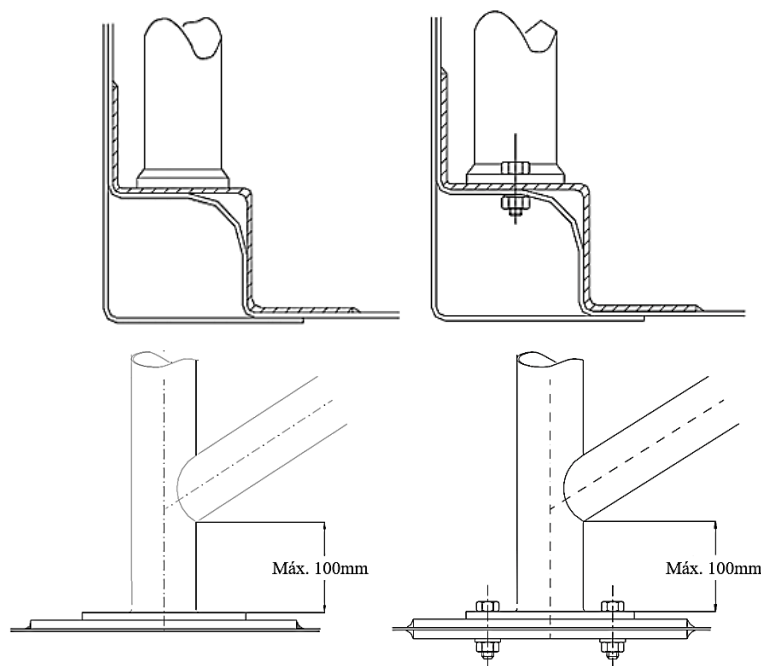
**Figura 24.** Dimensiones que se deben respetar para obtener la homologación de la estructura lateral [26].

## Anclajes de la estructura de seguridad a la carrocería o chasis

Se encuentra reglamentado en el Artículo 253-8.3.2.6. del Anexo J de la FIA en donde se va a esclarecer el número mínimo de pies de anclaje para cualquier configuración de la estructura de seguridad [26].

Existe un número mínimo de puntos anclajes en donde se deberán colocar en las siguientes proporciones [26]:

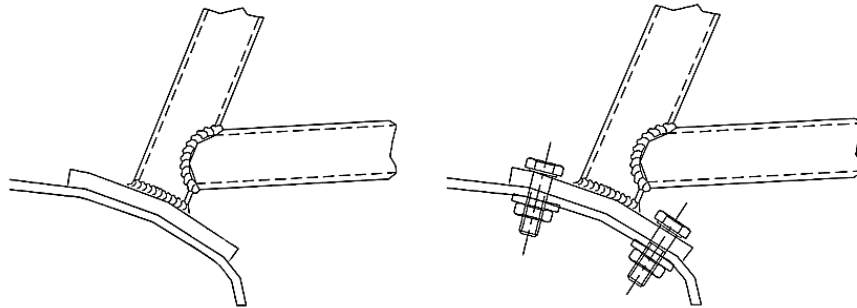
- Uno para cada montante del arco delantero, de los arcos o semiarcos laterales y del arco principal; estos elementos deberán fijarse por medio de tres tornillos autoblocantes y/o soldadura en una placa de refuerzo de un espesor mínimo de 3mm y de una superficie mínima de 120 cm<sup>2</sup> que estará soldada a la carrocería como se indica en la Figura 25 [26].



**Figura 25.** Esquema del pie de anclaje para los arcos y semiarcos principales y laterales con placa de refuerzo [27].

- Uno para cada uno de los extremos inferiores de los tirantes longitudinales posteriores; estos elementos deberán fijarse por medio de tres tornillos

autoblocantes y/o soldadura en una placa de refuerzo de un espesor mínimo de 3mm y de una superficie mínima de 60 cm<sup>2</sup> que estará soldada a la carrocería como se indica en la Figura 26 [26].



**Figura 26.** Esquema del pie de anclaje para los tirantes posteriores [27].

### Especificaciones del tubo

Partiendo de los componentes de la estructura de seguridad que se vaya a diseñar, la geometría del perfil de acero va a variar de acuerdo a los requisitos geométricos mínimos que se mencionan en el Artículo 253-8.3.3 del Anexo J de la FIA indicados en la Tabla 1, en donde se debe resaltar que solo se autorizan tubos de sección circular [27].

**Tabla 1.** Especificaciones de los tubos utilizados [27].

Material	Resistencia mínima a la tracción	Dimensiones mínimas	Aplicación
Acero al carbono no aleado conteniendo un máximo del 0,3% de carbono.	350 N/mm <sup>2</sup>	45 x 2.5 (1.75"x0.095") o 50 x 2.0	Arco principal o arcos laterales y miembros transversales posteriores según la construcción

		(2"x0.083")	
		38 x 2.5 (1.5"x0.095") o 40 x 2.0 (1.6"x0.083")	Semiarcos laterales y otras partes de la estructura de seguridad (a menos que se indique lo contrario en algún apartado del Artículo 253)

### **Restricciones de Tubo**

- El tubo de acero no aleado debe tener un contenido máximo de aditivos de 1,7% en peso de Manganeso (Mn) y el 0,6% en peso para otros químicos [28].
- Los dobleces de la tubería deben realizarse en frío con una radio de curvatura al menos tres veces el diámetro del tubo [28].
- Las curvaturas de los dobleces deber tener una superficie uniforme sin arrugas ni fisuras [28].

### **Indicaciones para la soldadura**

La soldadura de preferencia deber ser por Arco metálico y gas inerte (MIG) con un cordón de soldadura que deberá cubrir todo el perímetro del tubo. Todas las soldaduras deberán ser de la mejor calidad posible y tener una penetracion total, además de contar con un buen acabado superficial [28].

#### **1.3.8. Ensayos de carga estática**

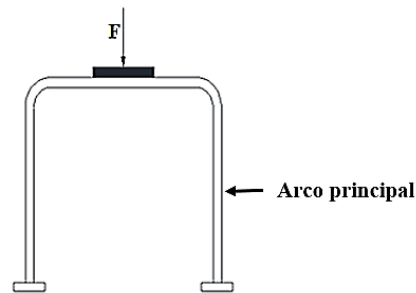
##### **Prueba de carga vertical en el arco principal**

La jaula de seguridad completa deber ser capaz de soportar una carga vertical de  $7,5W$  daN (Sin aplicación del factor de la gravedad) donde W es el peso del vehículo + 150

kg. La fuerza aplicada debe estar en la parte superior del arco principal a través de un sello rígido como se indica en la Figura 27 [29].

El sello debe tener las siguientes dimensiones [29]:

- Longitud: ancho del arco principal + min. 100mm.
- Ancho:  $250\text{mm} \pm 50\text{mm}$ .
- Espesor: min. 40mm.



**Figura 27:** Disposición de la carga vertical [29].

El sello deberá seguir el perfil transversal del arco principal. En la estructura de seguridad no deberá producirse ninguna rotura o cualquier deformación plástica superior a 50mm medidos a lo largo del eje de aplicación de la carga [29].

### **Prueba de carga lateral del arco delantero**

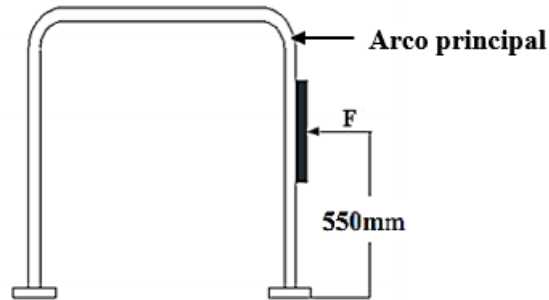
La jaula de seguridad completa deberá soportar una carga de  $3,5W$  daN (sin aplicación del factor de gravedad) donde  $W$  es el peso del vehículo + 150 kg. La fuerza aplicada debe estar en la parte lateral del arco principal a través de un sello rígido como se indica en la Figura 28 [29].

El sello debe tener las siguientes dimensiones [29]:

- Longitud:  $450\text{mm} \pm 50\text{mm}$ .
- Ancho:  $250\text{mm} \pm 50\text{mm}$ .



- Espesor: min. 40mm.



**Figura 28:** Disposición de la carga lateral en el arco principal.

El anclaje de la jaula de seguridad en la instalación de prueba se autoriza sólo en los pies del arco delantero, a los pies del arco principal y en los pies de los tirantes posteriores [29].

La carga se deberá aplicar horizontalmente a  $550\text{mm} \pm 50\text{mm}$  encima del punto más bajo de la barra antivuelco principal. En la estructura de seguridad no deberá producirse ninguna rotura o cualquier deformación plástica superior a 50mm medidos a lo largo del eje de aplicación de la carga [29].

### **Prueba de carga en el arco delantero**

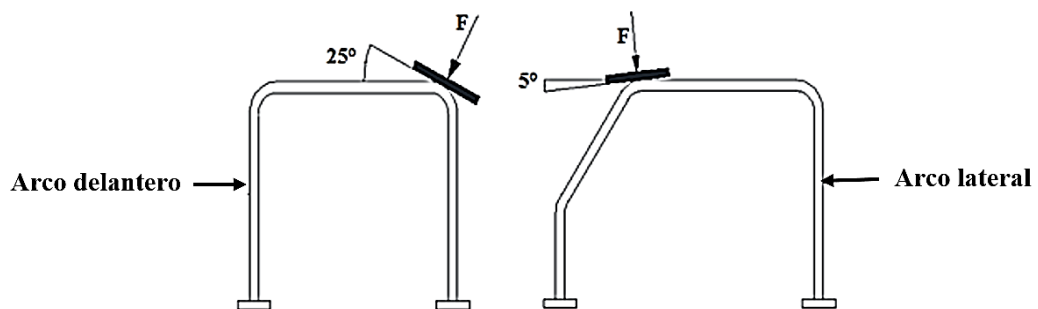
La jaula de seguridad debe soportar una carga de  $3.5W$  (sin aplicación del factor de seguridad), donde  $W$  es el peso del coche + 150 kg. La fuerza se aplica en la parte superior de la barra antivuelco frontal a través de un sello rígido, debe estar en el lado del conductor, en la intersección del semiarco delantero y el tirante transversal como se indica en la Figura 29 [29].

El sello debe tener las siguientes dimensiones [29]:

- Longitud:  $450\text{mm} \pm 50\text{mm}$ .
- Ancho:  $250\text{mm} \pm 50\text{mm}$ .
- Espesor: min. 40mm.

Se deberá realizar el diseño de manera que permanezca en el área de la intersección con el miembro transversal delantero cuando la carga es aplicada. El eje longitudinal del sello debe estar dirigida a la parte delantera y hacia abajo con un ángulo de  $5^\circ \pm 1^\circ$  respecto a la horizontal y del eje transversal deberá estar dirigida hacia el exterior y hacia abajo con un ángulo de  $25^\circ \pm 1^\circ$  con respecto a la horizontal [29].

En la estructura de la jaula de seguridad no se deberá producir ninguna distorsión de más de 100mm medidos en carga a lo largo del eje de aplicación de la carga [29].



**Figura 29.** Disposición de carga delantera.

### 1.3.9. Ensayos de carga dinámica

#### Impacto frontal

El impacto frontal se produce a 64 km/h (40 mph), donde el vehículo se impacta frontalmente contra una barrera deformable que no está centrada, es un ensayo que pretende simular el tipo más frecuente de colisión en carreteras que resulta con lesiones graves o mortales. Este impacto simula la colisión que existiría entre dos autos de similar masa y debido a que la mayoría de choques involucra sólo una parte del frente del vehículo este ensayo se simula haciendo que sólo un 40% se choque contra la barrera como se indica en la Figura 30 [30].

La velocidad de 64 km/h representa los efectos que tiene un vehículo en un estudio de colisión entre dos que viajan a 55 km/h, la diferencia de velocidad es debido a la energía absorbida por el frente deformable. El análisis de siniestralidad ha demostrado

que esta velocidad de impacto abarca proporciones significativas de las colisiones graves y fatales [30].



**Figura 30.** Esquema de impacto frontal con barrera fija [31].

### **Impacto lateral de poste**

Ciertos casos de impactos laterales se ven involucrados vehículos que se desplazan de manera lateral hacia objetos rígidos como árboles o postes. Estos accidentes son graves y la frecuencia de muertes o lesiones graves es muy alta [32].

En este impacto el vehículo es lanzado lateralmente a 29 km/h hacia un poste rígido y estrecho de 254 mm de diámetro. El vehículo se coloca con un ángulo recto en la dirección del movimiento o en un pequeño ángulo alejado de la perpendicular que puede ser de  $15^\circ$  como se indica en la Figura 31 [32].



**Figura 31.** Esquema de impacto lateral con poste [33].

La carga sobre el vehículo es altamente concentrada lo que provocaría una deformación altamente pronunciada lo que haría que el mástil pueda penetrar profundamente en el compartimiento de los acompañantes [32].

### 1.3.10. Teoría de falla

Se describe la falla como la pérdida de función de un elemento que se produce tanto por deformación (fluencia) como por separación de sus partes (fractura). Han existido diversas teorías sobre falla con el fin de poder predecir con eficacia el comportamiento del material en los ensayos de tensión o compresión simple, así como las condiciones en que se producirá la ruptura bajo cualquier tipo de cargas combinadas. No se considerará la falla producida por una desarticulación local de la estructura o por falla de estabilidad estática (pandeo o flexión lateral en columnas). [34]

La deformación plástica (fluencia), en esfuerzo simple comienza cuando las deformaciones plásticas empiezan a ser apreciables y en esfuerzos combinados en varias direcciones dependerá de la combinación de estas componentes de esfuerzo. [34]

Los mecanismos de falla dependerán de la estructura microscópica del material y de la forma que tengan sus enlaces atómicos. Para poder predecir la falla de materiales que estén sometidos a cargas estáticas y poder realizar diseños que sean confiables se desarrollaron varias teorías para 2 grupos de materiales indicados en la Tabla 2 los cuales se basaron en diferentes observaciones experimentales. [34]

**Tabla 2.** Teorías de falla [34].

<b>Teoría de falla</b>	
<b>Materiales dúctiles</b>	<b>Materiales frágiles</b>
Material que en el Ensayo de Tensión haya tenido más del 5% de deformación antes de la fractura.	Material que en el Ensayo de Tensión haya tenido menos del 5% de deformación antes de la fractura.

La falla se presenta cuando el material empieza a fluir (falla por deformación)	La falla se presenta cuando el material sufre separación de sus partes (falla por fractura)
<b>Teoría del Esfuerzo Cortante</b> <b>Máximo:</b> Teoría de Tresca	<b>Teoría del Máximo Esfuerzo Normal:</b>  Teoría de Rankine
<b>Teoría de la Energía de Distorsión:</b> Teoría de Von Misses	Teoría de Coulumb – Mohr Frágil
<b>Teoría de la Fricción Interna:</b> Teoría Coulumb – Mohr Dúctil	

### 1.3.10. Método de elementos finitos

El principio del MEF (Método de Elementos Finitos) se basa en la reducción del problema con infinitos grados de libertad en un problema finito en donde exista la intervención de un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos conocidos como nodos [35].

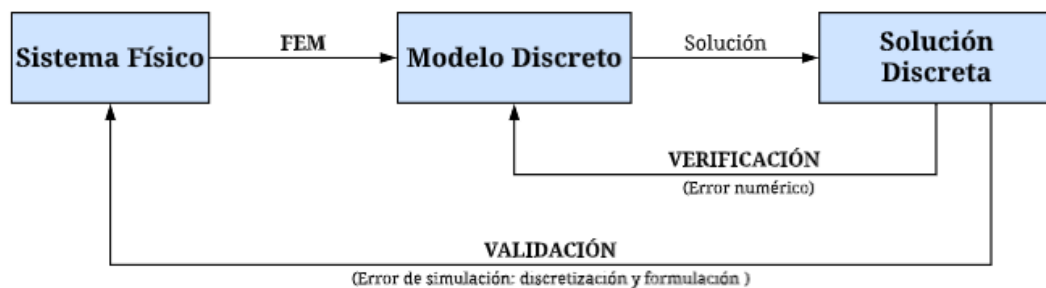
En todos los modelos de elementos finitos, el dominio (el sólido en problemas de mecánica de sólidos), se va a dividir en un número finitos de formas denominadas elementos. Para definir el comportamiento que existe en el interior de cada elemento, se tendrá que partir de una buena función de interpolación en los nodos [35].

En el MEF, son esenciales los conceptos de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado (discretización) y aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos (interpolación). Entonces se trata de un método aproximado en donde la precisión de los resultados va a depender de la densidad de elementos utilizada que se expresa en números, los mismos que dependiendo del problema específico se puede variar o no para observar el cambio de los resultados [35].

En la actualidad el MEF se ha generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico que es capaz de resolver cualquier problema de la física formulado como un sistema de ecuaciones, incluyendo los problemas de mecánica de fluidos, la transferencia de calor, del magnetismo, etc. Hay que tener en cuenta que este método es una virtualización de un problema real, existen muchos fenómenos e interacciones, procesos de fabricación, propiedades de los materiales, condiciones de contorno y carga que nos imposibles de medir y/o caracterizar. Por lo tanto, es importante que se consiga la mejor aproximación a la solución del problema en un corto tiempo, usando los recursos adecuados y una precisión que esté acorde a los datos iniciales de partida y a los objetivos principales [35].

Finalmente se destaca la importancia de este método al abordar problemas altamente no lineales en donde existen contactos entre los componentes, grandes deformaciones, modos de fallos y efectos dinámicos [35].

La Figura 32 muestra un esquema de los pasos que se deben seguir en la ejecución de un análisis por elementos finitos.



**Figura 32.** Esquema del uso del método de elementos finitos [36].

### 1.3.11. LS-DYNA

Ls-Dyna se considera como un código de elementos finitos de propósito general que tiene la capacidad de simular problemas complejos del mundo real. Tiene la capacidad de analizar grandes deformaciones de problemas de tipo dinámico y estático. Puede

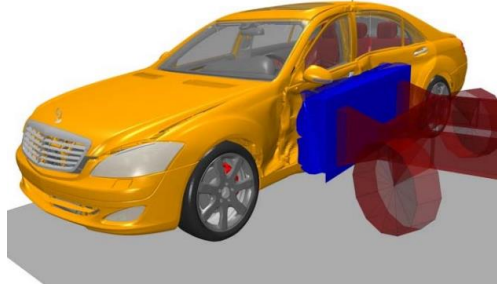
incorporar elementos explícitos bidimensionales y tridimensionales, análisis automáticos de contacto (superficie única, superficie – superficie y nodo – superficie), cuenta con una gran variedad de modelos de materiales y ecuaciones constitutivas, así como posibilidades de simulación [37]. Las características generales que destaca Illescas [36], se enmarcan a continuación:

- Su metodología se basa en integración explícita [36].
- El algoritmo de impacto y contacto permite realizar problemas complejos de la realidad en donde se incluye transferencia de calor a través de superficies de contacto [36].
- La determinación del algoritmo de contacto permite que no sea necesario mallar las zonas de transición para obtener resultados coherentes [36].
- En elementos bi-dimensionales es capaz de refinar la malla durante el procesado en función de los resultados lo que permite obtener una mayor precisión en las zonas que se requieran [36].

Ls-Prepost, se caracteriza por ser una herramienta intuitiva que prepara los datos de entrada de Ls-Dyna y procesa los resultados de análisis del programa. La interfaz es fácil de usar lo permite editar elementos sin mucha dificultad. Como pre procesador contiene aplicaciones que están enfocadas para el sector automoción como la implementación de airbags, cinturones de seguridad, modelos dummy, sensores, entre otros. Como post procesador permite la rápida y cómoda visualización de resultados como velocidades, aceleraciones, tensiones de Von Misses, gráficas de desplazamientos de nodos, entre otros. Además, se pueden calcular parámetros más específicos como el HIC (Head Injury Criterion) y el CSI (Chest Severity Index) los cuales nos permitirán evaluar los daños a nivel de cabeza y tórax respectivamente [38].

Actualmente, se pueden realizar simulaciones de choques que coinciden con la realidad, lo que permite que las compañías automovilísticas puedan probar sus diseños obviando la construcción de un prototipo evitando pérdida de tiempo y dinero.

La Figura 33 muestra una simulación en Ls-Dyna del choque lateral de un vehículo contra un carro cuyo frontal se ha fijado en la parte del conductor.



**Figura 33.** Ejemplo de impacto lateral simulado con Ls-Dyna [36].

### **1.3.12. Calidad de malla**

La calidad de malla cumple un papel fundamental en la precisión de los resultados. Para una malla que es sólida la precisión numérica se puede lograr por medio de una malla con elementos tetraédricos y uniformes en donde las aristas tengan la misma longitud. En una geometría general no hay la posibilidad de crear una malla con elementos tetraédricos perfectos debido a que tienen geometrías curvas, operaciones de lámina y aristas pequeñas y vivas en donde puede existir algunas aristas más largas que otras. Cuando exista una visible diferencia en las aristas de un elemento lo más probable es que los resultados puedan salir afectados de manera negativa. [39].

### **Criterio Jacobiano**

El criterio jacobiano nos permitirá determinar la calidad de malla mediante cálculos y pruebas a los elementos existentes exceptuando a los triángulos y tetraedros. Cuando se tiene una alta proporción se entiende que la correspondencia que existe entre el espacio y el espacio real del elemento se está convirtiendo en computacionalmente poco fiable [40].

Para Villafuerte [39], un cuadrilátero tiene una relación jacobiana en un rango de -1.0 a 1.0, en donde el 1.0 indica un elemento de malla perfecto como se indica en la Figura



34, en donde se realiza una comparación entre los elementos que componen una malla y si el promedio se acerca a 1 indica que el elemento es computacionalmente fiable en un alto nivel.



Inaceptable	Malo	Aceptable	Bueno	Muy bueno	Excelente
-1,00 / -0,6	-0,5 / -0,2	-0,1 / 0,00	0,00 / 0,1	0,2 / 0,5	0,6 / 1,00

**Figura 34.** Calidad de malla según criterio jacobiano [39].

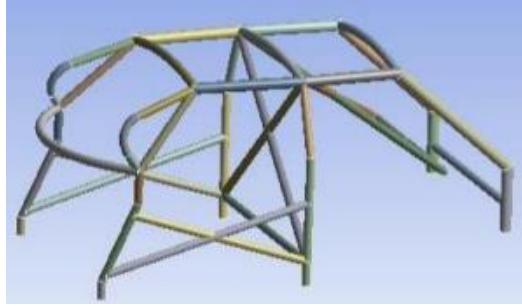
Para Esmeraldas [40], cuando un nodo se desplaza desde una esquina hacia el centro de un elemento de línea, la proporción hará que el jacobiano aumente y que pueda ocasionar con el tiempo que por algún movimiento adicional el elemento falle

### 1.3.13. Ventajas y desventajas de diseños de jaulas de seguridad existentes

#### Diseño de jaula de seguridad para un Volkswagen Gol 2.0

La Figura 35 indica una estructura de seguridad diseñada por Rivadeneira *et al.* [3] y Tovar parten de un diseño base a medias, pues dispone de ciertos elementos que no se contempla en el Artículo 253-8 como son dos tirantes longitudinales en la parte posterior del arco principal y no se define bien la forma del semiarco lateral.

Esta estructura puede fallar en un impacto frontal al no seguir la forma lateral del vehículo y puede causar graves lesiones en las extremidades inferiores de la tripulación. Además, que no cuenta con refuerzos en el techo por lo que su resistencia podría disminuir en el caso de un vuelco.

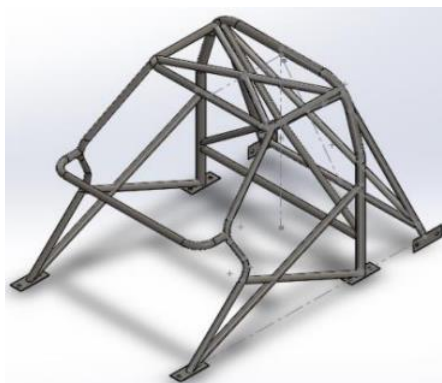


**Figura 35.** Configuración de la jaula de seguridad para un Volkswagen Gol 2.0 [3].

#### **Diseño de jaula de seguridad para un Corsa Win 1.4**

La Figura 36 indica una estructura de seguridad diseñada por Pastaz *et al.* [1] y Toro parten de un diseño base contemplado en el Artículo 253-8 mostrado en la Figura 16, pero con una forma del arco delantero que no tiene la forma lateral del vehículo lo que provocaría fallar en un impacto frontal. Sin embargo, esta jaula de seguridad posee todos los refuerzos distribuidos y colocados de manera adecuada, generando mayor seguridad en toda su estructura.

En cuanto a los puntos de anclaje, los que se encuentran en los tirantes posteriores tienen una manera inadecuada de anclarse a la suspensión trasera, debido a que el Artículo 253-8 indica que se deben encontrar en la base de los tirantes, más no en los laterales pues sería una manera ineficaz de soportar las cargas.



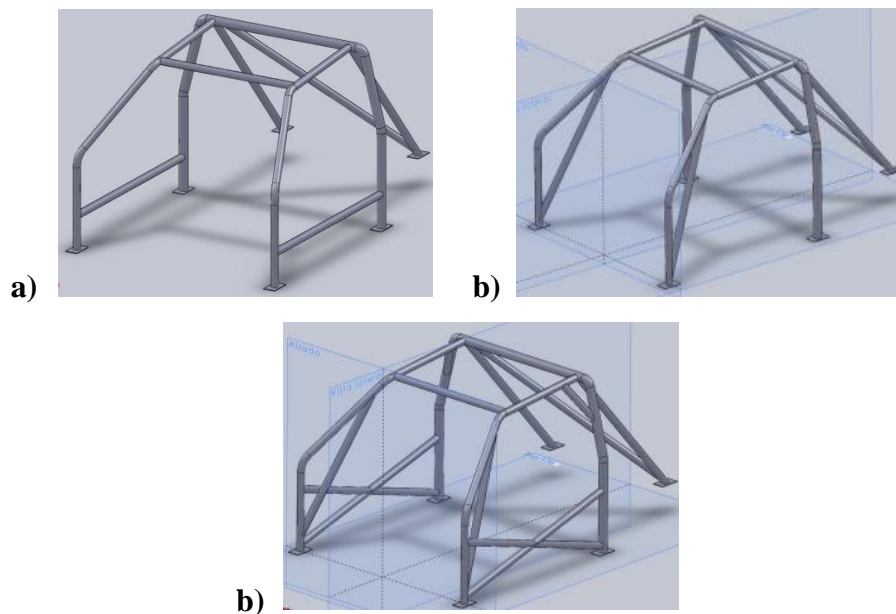
**Figura 36.** Configuración de la jaula de seguridad para un Corsa Win 1.4 [1].

## Diseño de jaula de seguridad para un Citroën Saxo

En la Figura 37 se indica la estructura de seguridad diseñada por García [2], la misma que parten de un diseño base contemplado en el Artículo 253-8 mostrado en la Figura 18. Este diseño cumple con la configuración base, pero carece de elementos de refuerzo en los puntos críticos como son el arco principal y el techo.

En las estructuras que se muestran de la Figura 37 García [2] realiza una transición en su diseño, quita un refuerzo lateral y coloca un pilar de refuerzo en el parabrisas en su lugar, esto es inadecuado porque al quitar el primer refuerzo se estaría debilitando la zona lateral de protección que en un caso de impacto lateral sería fatal para la tripulación.

La estructura mostrada en la Figura 37 (c) se realiza un diseño que mejora la resistencia de toda la estructura al combinar el pilar de refuerzo del parabrisas con las barras de las puertas, esto es lo correcto pues añade otro refuerzo sin comprometer otra parte de la estructura.

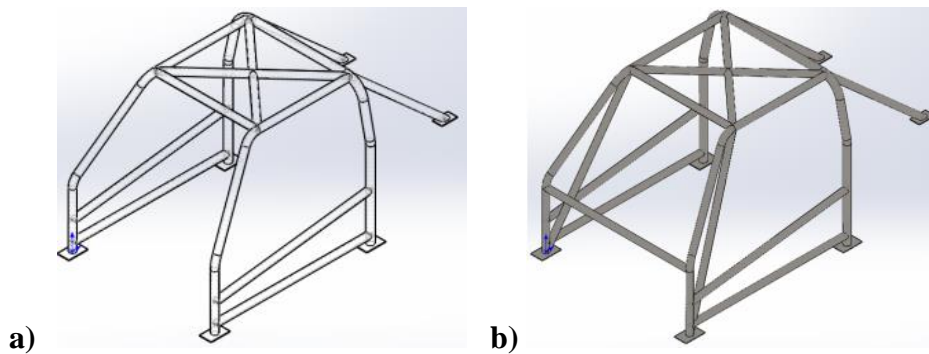


**Figura 37.** Configuración 1 (a), 2 (b) y 3 (c) de la jaula de seguridad para un Citroën Saxo [2].

### Diseño de jaula de seguridad para un Seat

La Figura 38 indica la estructura de seguridad diseñada por Morales [41], la misma que parte de un diseño base contemplado en el Artículo 253-8 mostrado en la Figura 18. Este diseño cumple con la configuración base, pero carece de elementos de refuerzo en el punto crítico que en este caso es el arco principal.

En las estructuras que se muestran en la Figura 38, Morales [41] realiza una transición en su diseño, colocando un pilar de refuerzo en el parabrisas que es lo adecuado debido a que estaría reforzando toda la estructura sin afectar ni comprometer otra parte de la misma.



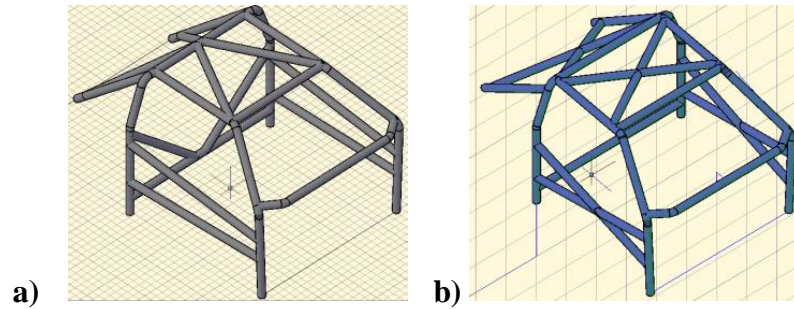
**Figura 38.** Configuración 1 (a) y 2 (b) de la jaula de seguridad para un Seat [41].

### Diseño de jaula de seguridad para un Suzuki Forza 1

La Figura 39 indica una estructura de seguridad diseñada por Cárdenas [4], la misma que parte de un diseño base contemplado en el Artículo 253-8 mostrado en la Figura 18.

Este diseño cumple con la configuración base y tiene bien colocado los refuerzos en los puntos críticos de la estructura. Cárdenas [4] realiza una transición en su diseño como se muestra en la Figura 39, en donde se analiza la mejor configuración de barra de puertas que para este caso existen en “V” y “X”, resultando la mejor opción la

configuración en “X” debido a que proporciona una mejor resistencia a toda la estructura.

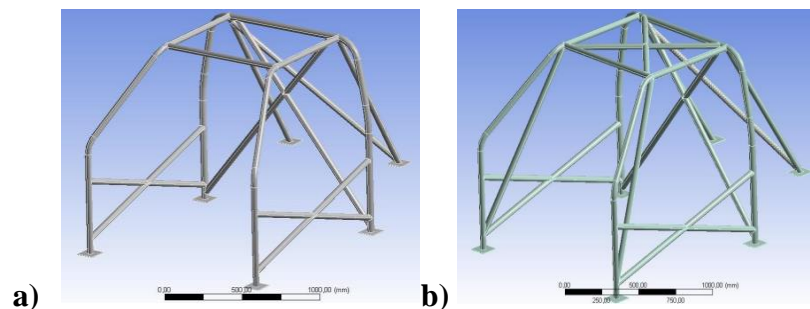


**Figura 39.** Configuración 1 (a) y 2 (b) de la jaula de seguridad para un Suzuki Forza 1 [4].

### Diseño de la jaula de seguridad para un Volkswagen Golf V1.6i

La Figura 40 indica una estructura de seguridad diseñada por Iglesias [42], la misma que parte de un diseño base contemplado en el Artículo 253-8 mostrado en la Figura 18.

Este diseño cumple con la configuración base y tienen bien colocados y distribuidos los refuerzos en los puntos críticos de la estructura. Iglesias [42] realiza una transición en su diseño como se muestra en la Figura 40, colocando un pilar de refuerzo en el parabrisas que es lo adecuado debido a que estaría reforzando toda la estructura sin afectar ni comprometer otra parte de la misma.

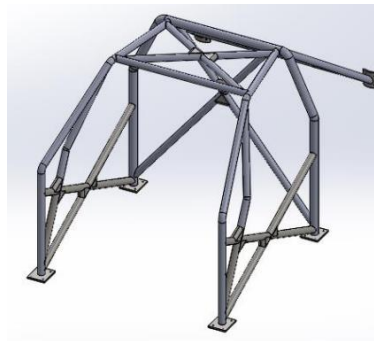


**Figura 40.** Configuración 1 (a) y 2 (b) de la jaula de seguridad del Volkswagen Golf V1.6 [42].

### **Diseño de jaula de seguridad para un Volkswagen Polo III Classic**

La Figura 41 indica una estructura de seguridad diseñada por Torres [43] la cual parte de un diseño que se contempla en el Artículo 253-8 mostrada en la Figura 18. Este diseño cumple con la configuración base y tienen bien colocados los refuerzos en todos los puntos críticos de la estructura.

Se muestra que también se pueden colocar refuerzos adicionales en los ángulos o uniones que existan en la estructura, en este caso se conocen como cartelas las mismas que tienen el fin de aumentar la resistencia de la estructura de seguridad; cabe mencionar que estos refuerzos adicionales deben tener un espesor mínimo a partir de 1mm y hay que considerar no utilizar un espesor muy grande pues comprometería el peso de la estructura.

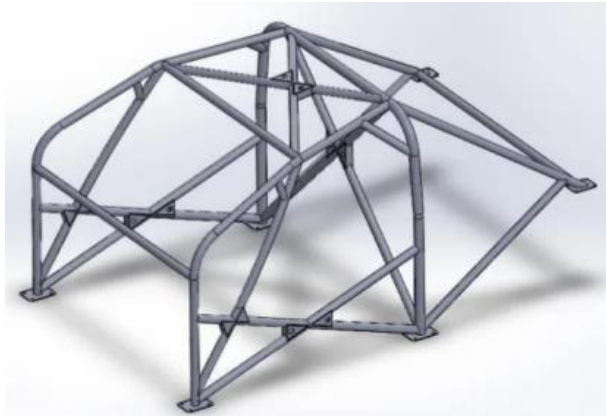


**Figura 41.** Configuración de la jaula de seguridad para un Volkswagen Polo III Classic de 1996. [43]

### **Diseño de jaula de seguridad para un Peugeot 307cc**

La Figura 42 indica una estructura de seguridad diseñada por Cerrudo [44] la misma que parte de un diseño que se contempla en el Artículo 253-8 mostrada en la Figura 18. Este diseño cumple con la configuración base y tienen bien colocados los refuerzos en todos los puntos críticos de la estructura.

Se muestra que también se pueden colocar refuerzos opcionales adicionales que en este caso es el que une la parte del techo del semiarco lateral con el arco principal, el refuerzo que une el techo del semiarco principal con el pilar de refuerzo del parabrisas, el refuerzo que une los tirantes posteriores con el arco principal, el miembro transversal que une los dos tirantes posteriores y los refuerzos adicionales en los ángulos o uniones que existan en la estructura conocidas como cartelas; todos los elementos tienen el fin de aumentar la resistencia de la estructura de seguridad; cabe mencionar que estos refuerzos adicionales deben tener el menor diámetro y espesor de la estructura para no comprometer el peso de la misma.



**Figura 42.** Configuración de la jaula de seguridad para un Peugeot 307cc [44].

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

#### 2.1. Materiales, instrumentos y maquinaria

##### 2.1.1. Materiales

El Artículo 253-8 de la Normativa FIA dispone los requisitos mínimos indicados que deberá cumplir la tubería redonda para ser utilizada en la construcción de la jaula de seguridad.

Debido a la no disponibilidad en el mercado de tubería redonda que cumpla con la resistencia mínima solicitada por la normativa FIA se propone como alternativa la tubería de acero al carbono soldada para aplicaciones estructurales y usos generales – ASTM A500 Gr. A de la marca FUJI. Además, se resalta que esta marca es fabricada por la empresa Conduit - Kubiec del Ecuador la misma que cuenta con certificaciones del sistema de gestión de calidad ISO 9001:2015, además de varias certificaciones de producto tubería tanto nacionales como internacionales (INEN, RETIE, UL).

A continuación, se corroborará que el material que se va a utilizar cumple con los requerimientos mínimos que se indican en la Tabla 3.

- Su presentación de tubería de sección circular hueca HSS, está formada en frío y viene con o sin costura [45].
- Su composición química mostrada en la Tabla 3, indica que contiene un valor que está en el rango permitido de un máximo de carbono del 0,3%.

**Tabla 3.** Composición química del Acero ASTM A500 GR. A [45].

Material	C, máx.	Mn, máx.	P, máx.	S, máx.	Cu, min.
A500 GR. A	0,26	1,35	0,035	0,035	0,2

- Su resistencia mínima a la tracción se muestra en la Tabla 4.



**Tabla 4.** Propiedades físicas de ASTM A500 GR. A [45].

<b>Resistencia a la tracción, mn, ps (MPA)</b>	45000 (310)
<b>Límite elástico, mn, psi (MPA)</b>	39000 (230)
<b>Alargamiento en 2 pulg. (50.8 mm), min, % A</b>	25

### 2.1.2. Instrumentos

#### Flexómetro

Es un instrumento de medida directa de longitudes que está fabricado de un material flexible para que se puede enrollar, lo que hace muy versátil. Por lo general viene graduado en centímetros y milímetros por una cara o por una lado y pulgadas por el otro como se observa en la Figura 43 [46].



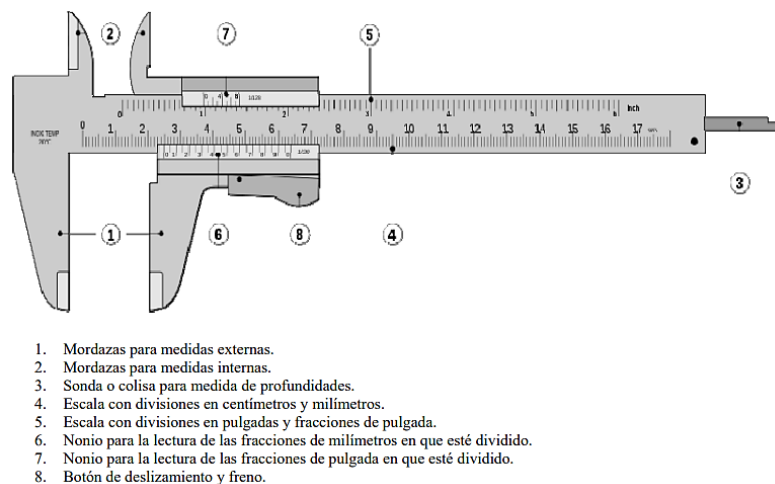
**Figura 43.** Flexómetro [46].

Su longitud puede variar de acuerdo a la finalidad. Los flexómetros de uso doméstico que usualmente son hechos de plástico tienen dimensiones que varían entre 1,50 y 2 m de largo y alrededor de 1,5 a 2,5 cm de ancho. Los que se usan para medir superficies de grandes dimensiones, evidentemente se pueden encontrar en valores que rondan desde los 5 hasta 20 m de longitud [46].

## Calibrador pie de rey

Es un instrumento de acero aleado que es empleado para la medición de longitudes, catalogado como el más universal que existe. Contiene una “regla” con una escuadra en el extremo, sobre la cual se desliza otra destinada a indicar la medida en una escala [47].

Permite medir longitudes que van desde 1/10, 1/20 y 1/50 mm utilizando el nonio. Mediante partes especiales en su parte superior y su extremo puede medir dimensiones internas y profundidades. Tiene dos escalas la superior en pulgadas y la inferior en milímetros. En la Figura 44, se puede observar las partes lo conforman [47].



**Figura 44.** Pie de rey [47].

### 2.1.3. Maquinaria

#### Tronzadora

Es una herramienta que se utiliza para la realización de cortes longitudinales y transversales mediante hojas de sierras adecuadas con un corte recto u oblicuo en materiales de construcción y se observa en la Figura 45. Por lo general este equipo es utilizado para el corte de piezas con perfiles estrechos tipo tubos, barras, ferralla, entre

otros, y su ubicación podrá ser fija o transitoria según las necesidades que el proceso requiera [48].



**Figura 45.** Tronzadora [48].

### **Dobladora de tubos hidráulica**

Es una máquina – herramienta que se emplea para realizar moldeos y curvaturas en tubos metálicos, son capaces de manipular metales con la suficiente tensión como para no dañar una pieza y evitar su rotura. Esta herramienta mediante un proceso en frío produce un curvado con forma de la matriz al tiempo que conserva la sección transversal de los tubos [49]. En la Figura 46, se puede observar una dobladora de tubos hidráulica de la marca y modelo HUTH 2806 Heavy-duty.



**Figura 46.** Dobladora de tubos hidráulica [50].

## Soldadora MIG

Es una máquina – herramienta que permite mediante soldeo por fusión por arco que usa un alambre de electrodo macizo fusionar dos o más materiales principalmente metálicos, en donde el arco y el baño de soldadura se protegen de la atmósfera por medio de un gas suministrado por una fuente externa que se muestra en la Figura 47. En la actualidad es el proceso más utilizado por su alta productividad y velocidad [51].



**Figura 47.** Máquina de soldar de la marca Cebora [51].

## Compresor de pintura

Es una herramienta básica que se muestra en la Figura 48 indispensable para pintura, se usan en proyectos de diferentes índoles. Con este equipo se podrá lograr trabajos en el menor tiempo posible con acabados de primera. Además, se podrá aprovechar las ventajas de las herramientas neumáticas, obteniendo mejor potencia, menor consumo eléctrico y mayor seguridad en comparación con las clásicas herramientas [52].



**Figura 48.** Compresor de pintura [52].

## **2.2. Tipo de investigación**

La presente investigación será de tipo bibliográfica y tecnológica por el hecho que implica el análisis e investigación acerca de la preparación de un vehículo de competición modalidad rally en donde se utilizarán materiales, procesos y diferentes métodos para la construcción de una jaula de seguridad.

### **2.2.1. Investigación bibliográfica**

Se consultará los diseños de jaulas de seguridad ya existentes para conocer la mejor configuración en base a las normativas establecidas, además se podrá conocer los materiales, procesos y métodos adecuados para obtener un diseño adecuado.

### **2.2.2. Investigación tecnológica**

El diseño resultante será sometido a diferentes análisis para verificar su validez en base a ensayos establecidos por entes competentes representantes de la FIA en el país, esto enfocado a determinar la factibilidad del proyecto en base al análisis de los resultados y su respectiva construcción.

## **2.3. Procedimiento**

### **2.3.1. Diseño de la jaula de seguridad**

En este punto se va a tomar como referencia diferentes diseños en donde se va a enmarcar los puntos fuertes de cada una para obtener un diseño óptimo en base a su comportamiento y factibilidad, además se va a seguir al Artículo 253-8 del Anexo J de la Normativa FIA y el Reglamento de FEDAK (Federación Ecuatoriana de Automovilismo y Kartismo) para estructuras de seguridad, este último difiere solamente en los puntos de anclaje que la jaula de seguridad tener.

Para el diseño de la jaula de seguridad se tomaron como referencias diseños existentes que fueron concebidos en base a la Normativa FIA Artículo 253-8 del Anexo J, en donde se indica el diseño base que deben de tener estas estructuras.

### 2.3.2. Modelado de la jaula de seguridad

Una vez analizado las ventajas y desventajas de los diferentes diseños existentes de jaulas de seguridad y leído los parámetros que indica en Artículo 253-8 del Anexo J de la Normativa FIA y el Reglamento de FEDAK se pudo llegar a un modelo adecuado que cumple con todos los requisitos geométricos como se indica en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Índice de cumplimiento de diseños de jaulas de seguridad existentes

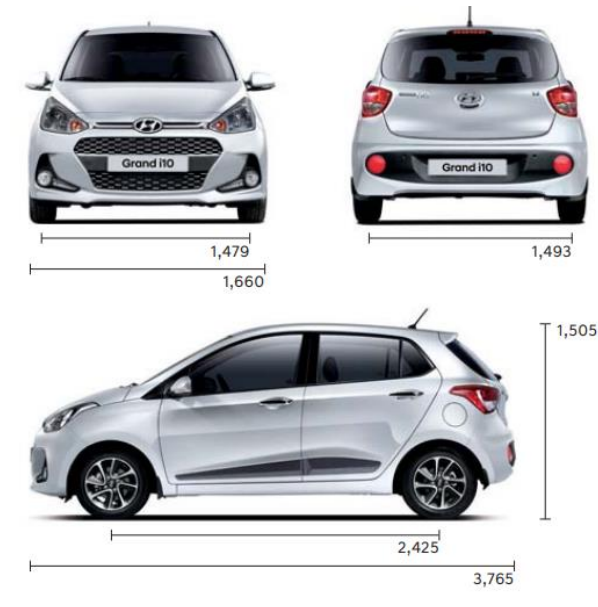
Parámetros	Diseños existentes							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Configuración base FIA			X	X	X	X	X	X
Refuerzo del techo		X		X	X	X	X	X
Barra de puertas	X	X	X	X	X	X	X	X
Tirante diagonal en el arco principal	X	X				X	X	X
Pilar de parabrisas			X	X		X	X	X
Cartelas							X	X
Refuerzos de uniones y ángulos	X							X
Refuerzo de la suspensión posterior								X
Índice de cumplimiento (%)	37,5	37,5	37,5	50	37,5	62,5	75	100

El diseño existente 8 que indica la jaula de seguridad para un Peugeot 307cc cumple al 100% con los parámetros obligatorios y adicionales lo que nos garantiza el máximo

desempeño de esta configuración, la misma que será tomada en cuenta para nuestro diseño.

Un punto importante es que la jaula de seguridad deberá tener la mayor resistencia y el menor peso posible, por lo que es importante controlar la cantidad de refuerzos y cartelas que tendrá nuestro modelo.

La jaula de seguridad se modeló a partir de las dimensiones y forma del vehículo Hyundai Grand i10 Hatchback 2017 que se indican en la Figura 49 y cuya información se encuentra detallada en la Tabla 6.



**Figura 49.** Dimensiones del vehículo Hyundai Grand i10 2017 [53].

**Tabla 6.** Características técnicas del vehículo Hyundai Grand i10 2017 [54].

<b>Información general</b>	
<b>Marca</b>	Hyundai
<b>Modelo</b>	i10
<b>Generación</b>	Grand i10 II (facelit 2017)
<b>Modificación (motor)</b>	1.2 VTVT (83 CV)

<b>Año de la puesta en producción</b>	2017
<b>Arquitectura de la unidad de potencia</b>	Motor de combustión interna
<b>Tipo de carrocería</b>	Hatchback
<b>Número de plazas</b>	5
<b>Número de puertas</b>	5
<b>Rendimiento</b>	
<b>Combustible</b>	Gasolina
<b>Motor</b>	
<b>Potencia máxima</b>	83 CV @ 6000 rpm
<b>Potencia por litro</b>	69.3 CV/l
<b>Par máximo</b>	114 Nm @ 4000 rpm
<b>Posición del motor</b>	Frontal, transversal
<b>Modelo del motor / Código del motor</b>	Kappa
<b>Cilindrada -real-</b>	1197 $cm^3$
<b>Número de cilindros</b>	4
<b>Distribución de cilindros</b>	En línea
<b>Número de válvulas por cilindro</b>	4
<b>Sistema de combustible</b>	Inyección indirecta multipunto
<b>Aspiración del motor</b>	Motor atmosférico
<b>Distribución</b>	DOHC
<b>Volumen y peso</b>	
<b>Capacidad de depósito</b>	43 l
<b>Medidas</b>	
<b>Longitud</b>	3765 mm
<b>Anchura</b>	1660 mm
<b>Altura</b>	1520 mm
<b>Distancia entre ejes</b>	2425 mm
<b>Vía delantera</b>	1479 mm
<b>Vía trasera</b>	1493 mm



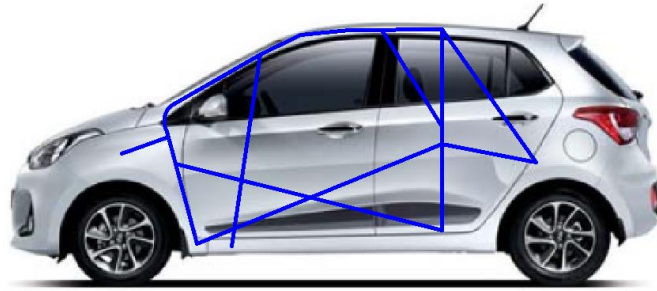
<b>Cadena cinemática, frenos y suspensión</b>	
<b>Arquitectura de propulsión</b>	El motor de combustión interna propulsa las ruedas delanteras del vehículo.
<b>Tracción</b>	Tracción delantera
<b>Número de velocidades (t. manual)</b>	5
<b>Suspensión delantera</b>	Independencia de tipo McPherson
<b>Suspensión trasera</b>	Torsión
<b>Frenos delanteros</b>	Discos
<b>Frenos traseros</b>	Tambor
<b>Sistemas de asistencia</b>	ABS (Sistema antibloqueo de ruedas)
<b>Dirección, tipo</b>	Cremallera de dirección
<b>Tamaño de neumáticos</b>	165/65 R14
<b>Tamaño de llantas</b>	14

Las Figuras 50, 51 y 52 indican el modelo del vehículo y la ubicación de los elementos básicos de la configuración básica 3 de una jaula de seguridad que se puede observar en la Figura 18. A partir del modelo base se pudo ir añadiendo los diferentes refuerzos obligatorios y opcionales.

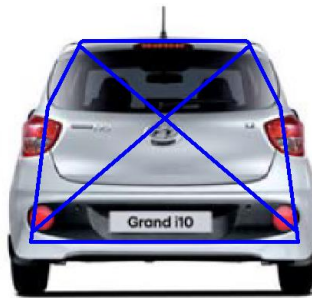
La estructura de seguridad debe brindar la mayor resistencia posible para salvaguardar a la tripulación, por lo cual se trata de adaptar nuestro modelo al diseño que se muestra en la Figura 42, este diseño que además de cumplir con la configuración que es apta para una homologación FIA, tiene todos los refuerzos obligatorios y opcionales que se muestran el Artículo 253-8, lo que hace que esta estructura tenga la mayor resistencia posible.

Además, se va adoptar lo dispuesto en el Reglamento Nacional de Rally de FEDAK para estructuras de seguridad, en donde se indica que la estructura podrá tener más de 8 puntos de anclaje beneficiando aún más su resistencia [55]. Los puntos de anclaje de los tirantes posteriores y de los refuerzos adicionales se ubicarán en la parte de la carrocería que están por encima de las suspensiones delanteras y posteriores del

vehículo; los puntos de anclaje del semiarco lateral, del pilar de refuerzo del parabrisas y del arco principal se ubicarán en tres zonas diferentes del piso, pero no a la misma altura como se indica en la Figura 50. El arco principal deberá contar con un refuerzo en X como se indica en la Figura 51 y los tirantes posteriores deberán contar con un tirante diagonal y un refuerzo transversal como se indica en la Figura 52.



**Figura 50.** Diseño de la configuración lateral de la jaula de seguridad.



**Figura 51.** Diseño de la configuración posterior del arco principal.



**Figura 52.** Diseño de la configuración posterior de los tirantes posteriores.

Se procede a asignar valores de diámetros y espesores conforme a los valores mínimos permitidos para los elementos que conforman la estructura de seguridad que se indican en la Tabla 1 y en parte del Artículo 253-8 del Anexo J de la Normativa FIA, estos elementos se describirán en la Tabla 7.

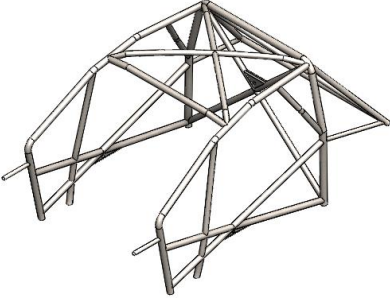
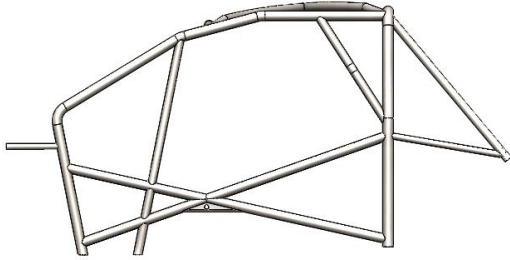
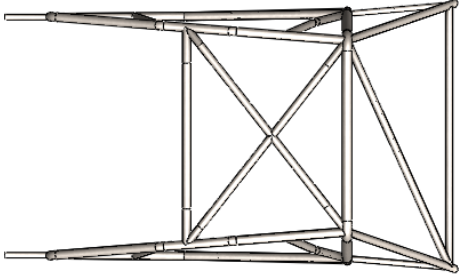
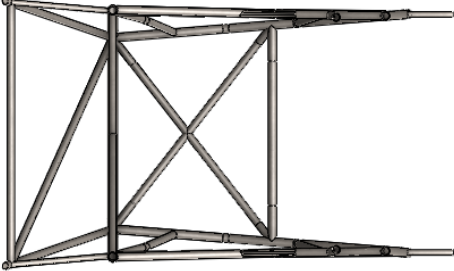
**Tabla 7.** Descripción detallada de perfiles estructurales



<b>Elemento</b>	<b>Unidades</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>
<b>Arco principal</b>	1	50	2
<b>Semiarco lateral</b>	2	44	2
<b>Tirante transversal (Techo)</b>	1	44	2
<b>Barras de las puertas</b>	4	42	1,8
<b>Tirantes posteriores</b>	2	42	1,8
<b>Refuerzo del techo</b>	2	38	2
<b>Tirante diagonal (Tirantes posteriores)</b>	1	38	1,5
<b>Tirante transversal (Tirantes posteriores)</b>	1	38	1,5
<b>Refuerzo de ángulos o uniones</b>	2	38	1,5
<b>Pilar de refuerzo del parabrisas</b>	2	38	1,5
<b>Tirante diagonal (Arco principal)</b>	2	38	1,5
<b>Refuerzo del punto de anclaje de la suspensión delantera</b>	2	28	2
<b>Refuerzo del punto de anclaje de la suspensión posterior</b>	2	28	1,5

En base a los diseños y configuraciones de jaulas de seguridad que se analizaron y a partir de modelo del vehículo se procedió a tomar y asignar medidas reales a los elementos de la estructura de seguridad, resultando en un modelo en 3D realizado con el módulo de superficies en SolidWorks donde los espesores correspondientes de cada

componente se asignaran en el software CAE. El modelo final y sus características se describen en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Descripción del modelado de la estructura de seguridad.

Figuras	Descripción
	<p>Vista isométrica, estructura completa de la jaula de seguridad.</p>
	<p>Vista lateral derecha, semiarco principal, arco principal, barras de puertas, pilar de refuerzo del parabrisas, refuerzo de la suspensión delantera y posterior, tirantes posteriores y cartelas.</p>
	<p>Vista superior, refuerzo en X del techo y tirante transversal.</p>
	<p>Vista inferior, puntos de anclaje de la estructura de seguridad.</p>

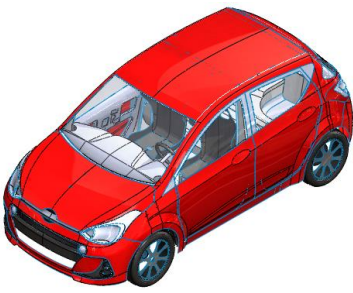
	<p>Vista frontal, tirantes diagonales en X del arco principal, puntos de anclaje del refuerzo de la suspensión delantera y cartela.</p>
	<p>Vista posterior, tirantes posteriores, tirante diagonal de refuerzo y tirante transversal.</p>

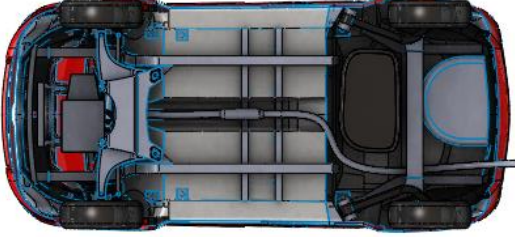


### 2.3.1. Modelado del vehículo

El vehículo que se modeló es un Hyundai Grand i10 2017 utilizando las medidas que se muestran en la Figura 49 y cuyas características se indican en la Tabla 4.

Se utilizó el programa de SolidWorks con su módulo de superficies y todos los métodos característicos como extrusiones, revoluciones y barridos, además otras funciones como proyectar curva, croquis en 3D, línea de partición, eliminar recorte, extender y coser. Los espesores correspondientes de cada componente se asignarán en el software CAE. El modelo final y sus características se describen en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Descripción del modelado del vehículo.


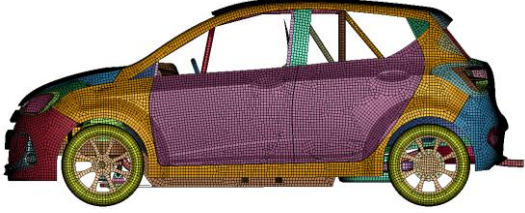
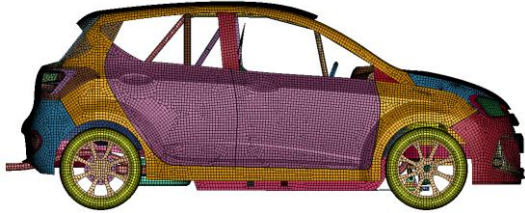
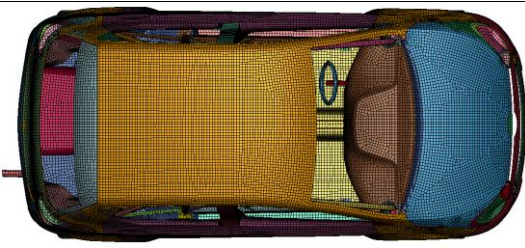
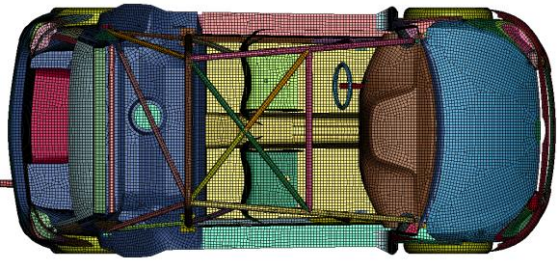
Figuras	Descripción
	<p>Vista isométrica, estructura completa del vehículo y asientos de rally.</p>

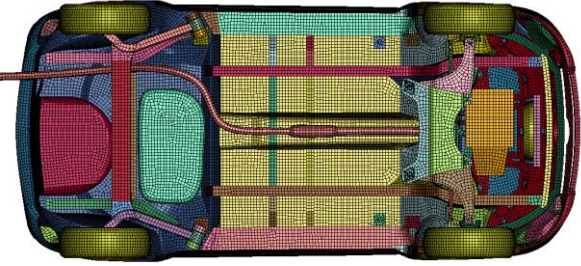

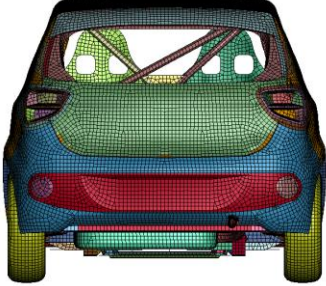
	<p>Vista inferior, bastidor, sistema de suspensión, sistema de dirección, sistema de escape y bomba de gasolina.</p>
	<p>Vista frontal, faros delanteros y capó.</p>
	<p>Vista posteriores, faros traseros y puerta posterior.</p>

### 2.3.2. Mallado del modelo

Para realizar el mallado se ensambló la jaula de seguridad en el vehículo modelado con el fin de obtener un solo modelo para las simulaciones estáticas y dinámicas. En base al modelo final se depuró un modelo liviano con un tamaño de malla de 20 mm y un índice de jacobiano de 0.3 obteniendo así altos índices de calidad de malla, con mayor cantidad de elementos tipos cuadriláteros y menor cantidad de elementos triangulares como se muestra en la Tabla 10. Se generaron operaciones de uniones compartidas de nodos para indicar una soldadura entre los elementos de la estructura de la jaula de seguridad e indicar unión de las autopartes del vehículo. Finalmente, se obtuvo un elevado número de elementos y nodos que se describen en la Tabla 11.

**Tabla 10.** Descripción del mallado del modelo final.

Figuras	Descripción
	<p>Vista isométrica del mallado.</p>
	<p>Vista lateral derecha del mallado.</p>
	<p>Vista lateral izquierda del mallado.</p>
	<p>Vista superior del mallado.</p>
	<p>Vista superior del mallado (Jaula de seguridad).</p>

	<p>Vista inferior del mallado.</p>
	<p>Vista frontal del mallado.</p>
	<p>Vista posterior del mallado.</p>

**Tabla 11.** Descripción y características del mallado.

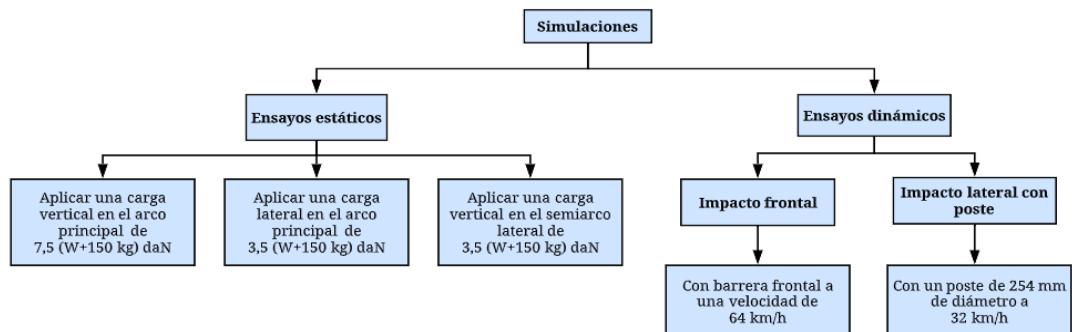
<b>Propiedad</b>	<b>Cantidad o Característica</b>	<b>Observaciones</b>
Número de elementos	115254	Aplicación de carga vertical sobre el arco principal. (Vehículo + jaula de seguridad + piso + sello)
Número de nodos	187398	
Número de elementos	125972	Aplicación de carga lateral en el arco principal. (Vehículo + jaula de seguridad + piso + sello)
Número de nodos	140378	
Número de elementos	109614	Aplicación de carga vertical sobre la intersección entre el semiarco
Número de nodos	151562	



		principal, refuerzo en X del techo y el tirante transversal.
Número de elementos	144158	Impacto frontal entre el vehículo + jaula de seguridad + barrera + piso.
Número de nodos	138100	
Número de elementos	144798	Impacto lateral entre el vehículo + jaula de seguridad + poste + piso.
Número de nodos	138756	
Longitud de elementos máx.	20 mm	
Índice de jacobiano mín.	0.3	
Tipos de elementos	Shell 2D quad/tri con formulación de tipo Belytschko-Tsay.	Se utilizó este tipo de malla por ser la más óptima al contar con una excelente calidad y la menor cantidad de nodos y elementos, además que es la recomendada para realizar análisis no lineales de impacto.

### 2.3.3. Simulaciones

Se debe tener en cuenta las condiciones que se enmarcan en la Figura 53 para las diferentes simulaciones estáticas y dinámicas que se tienen que realizar en la jaula de seguridad y el vehículo más la jaula de seguridad.



**Figura 53.** Esquema de simulaciones.

## Simulación de aplicación de carga vertical al arco principal

La jaula de seguridad completa deberá ser capaz de soportar una carga vertical indicada en la Ecuación 2 sin aplicación del factor de la gravedad:

$$7,5 (W + 150 \text{ kg}) \text{ daN} \quad \text{Ecuación 2.}$$
$$(7,5 ((920 + 150) \text{ kg})) \text{ daN} = 80,25 \text{ kN}$$

Donde:

W: Es el peso del vehículo en kg.

Nota: El peso del vehículo de 920 kg fue tomado como referencia de uno real, pesado y aprobado para el Rally Bicentenario de Cuenca 2021 (octubre 01 y 02) como se indican en las Figuras 54 y 55.

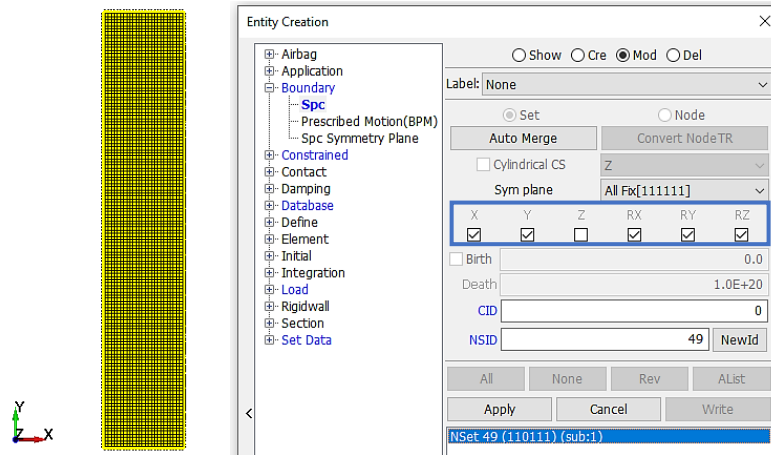


**Figura 54.** Hyundai Grand i10 con revisión técnica y pesajes aprobados.



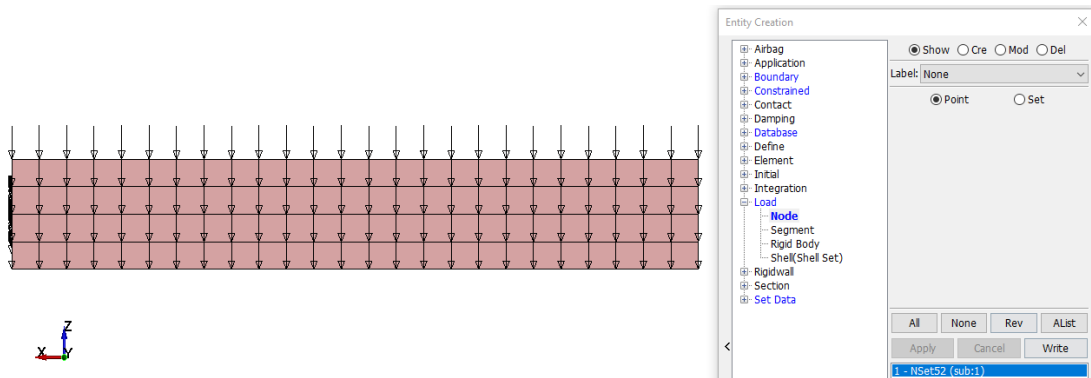
**Figura 55.** Hyundai Grand i10 con un peso de 920 kg.

La carga deberá ser aplicada en la parte superior del arco principal a través de un sello rígido en donde a todos sus nodos se restringe el desplazamiento en los ejes “x” y “y”, además restringe su rotación en los todos sus ejes como se muestra en la Figura 56.



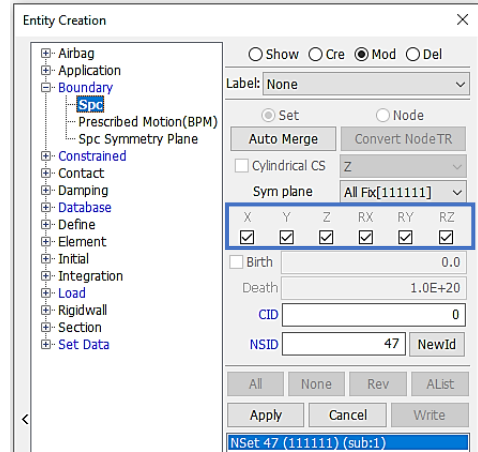
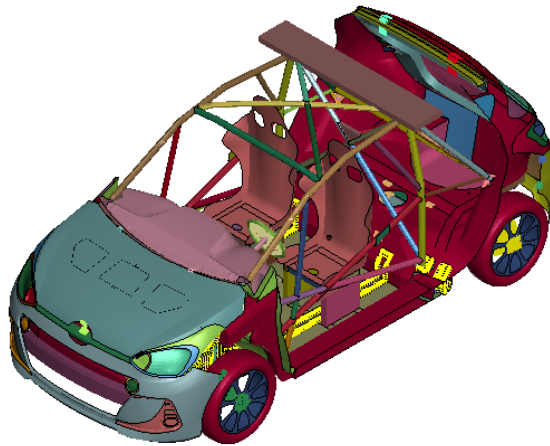
**Figura 56.** Restricciones de desplazamiento y rotación del sello rígido.

La carga se podrá aplicar en todos los nodos del sello rígido sólo en el eje “z” cómo se muestra en la Figura 57.



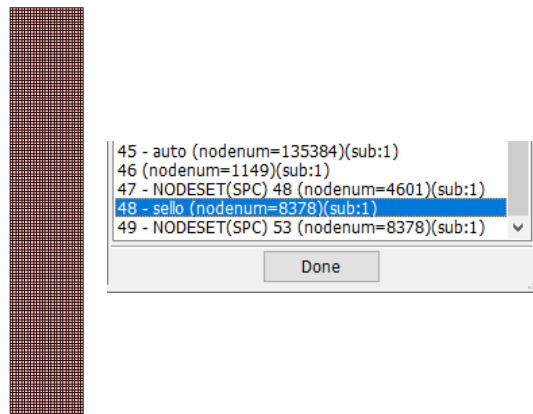
**Figura 57.** Carga aplicada en el eje “z” del sello rígido.

Los puntos de anclaje para la simulación se asignaron a los nodos del soporte del chasis del vehículo en donde se restringió su desplazamiento y rotación en todos los ejes como se muestra en la Figura 58.



**Figura 58.** Restricciones de desplazamiento y rotación del chasis del vehículo.

Para ejercer la fuerza resultante en el sello, se debe dividir dicha fuerza para los nodos que se muestran en la Figura 59 como se indica en la Tabla 12.



**Figura 59.** Número de nodos que contiene el sello del arco principal.

**Tabla 12.** Carga vertical resultante para cada nodo del sello

Carga aplicada (daN)	kN	nodos	Carga resultante (kN)
80250	80,25	8378	0,0095787

### Simulación de aplicación de carga lateral en el arco principal

La jaula de seguridad completa deberá ser capaz de soportar una carga vertical indicada en la Ecuación 3:

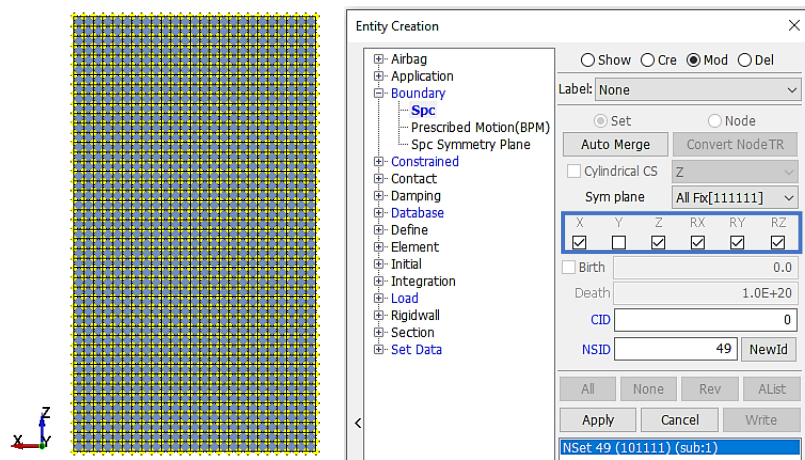
$$3,5 (W + 150 \text{ kg}) \text{ daN} \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$(3,5 ((920 + 150) \text{ kg}) \text{ daN}) = 37,45 \text{ kN}$$

Donde:

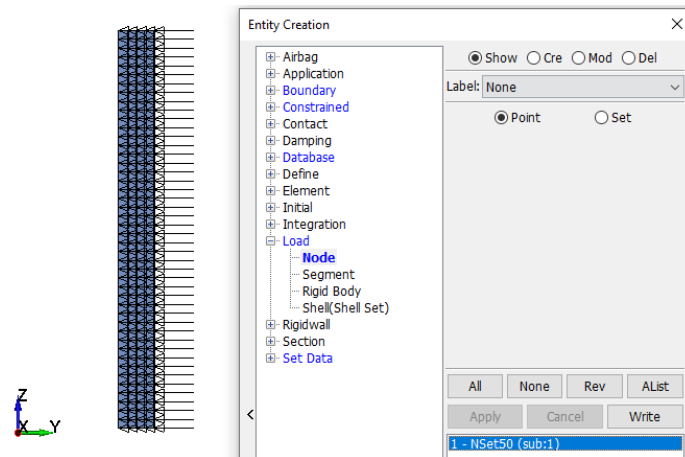
W: Es el peso del vehículo en kg.

La carga deberá ser aplicada horizontalmente a  $550\text{mm} \pm 50\text{mm}$  encima del punto más bajo de la barra antivuelco principal a través de un sello rígido en donde a todos sus nodos se restringe el desplazamiento en los ejes “x” y “z”, además se restringe su rotación en los todos sus ejes como se muestra en la Figura 60.



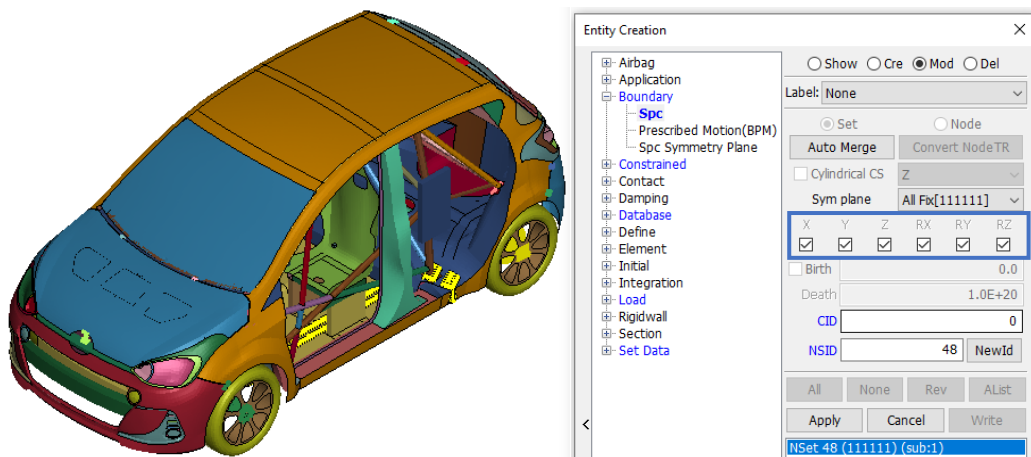
**Figura 60.** Restricciones de desplazamiento y rotación del sello rígido.

La carga se podrá aplicar en todos los nodos del sello rígido sólo en el eje “y” cómo se muestra en la Figura 61.



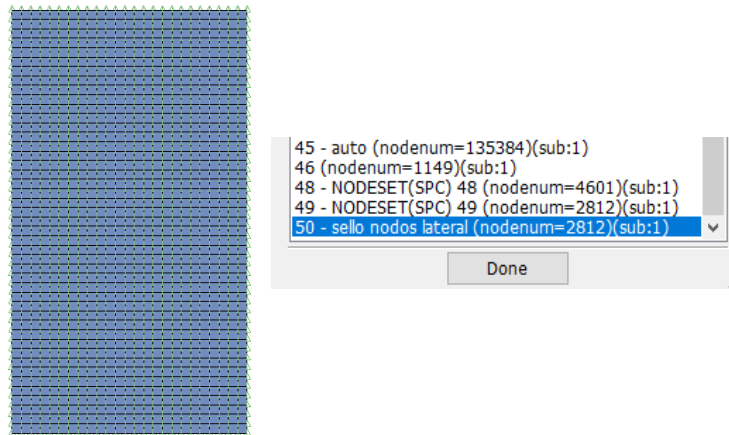
**Figura 61.** Carga aplicada en el eje “y” del sello rígido.

Los puntos de anclaje para la simulación se asignaron a los nodos del soporte del chasis del vehículo en donde se restringió su desplazamiento y rotación en todos los ejes como se muestra en la Figura 62.



**Figura 62.** Restricciones de desplazamiento y rotación del chasis del vehículo.

Para ejercer la fuerza resultante en el sello, se debe dividir dicha fuerza para los nodos que se muestran en la Figura 63 como se indica en la Tabla 13.



**Figura 63.** Número de nodos que contiene el sello del lateral del arco principal.

**Tabla 13.** Carga resultante final para cada nodo del sello

Carga aplicada (daN)	kN	nodos	Carga resultante (kN)
37450	37,45	2812	0,01331792

### Simulación de aplicación de carga en el semiarco lateral

La jaula de seguridad completa deberá ser capaz de soportar una carga vertical indicada en la Ecuación 4:

$$3,5 (W + 150 \text{ kg}) \text{ daN} \quad \text{Ecuación 4.}$$

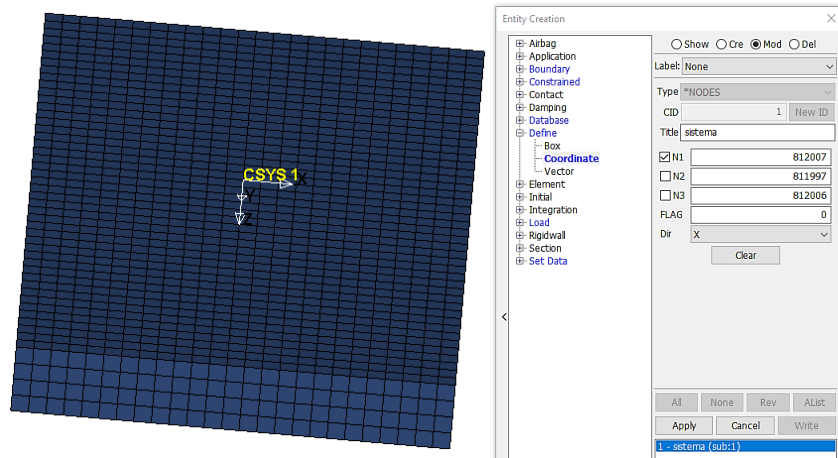
$$(3,5 ((920 + 150) \text{ kg}) \text{ daN}) = 37,45 \text{ kN}$$

Donde:

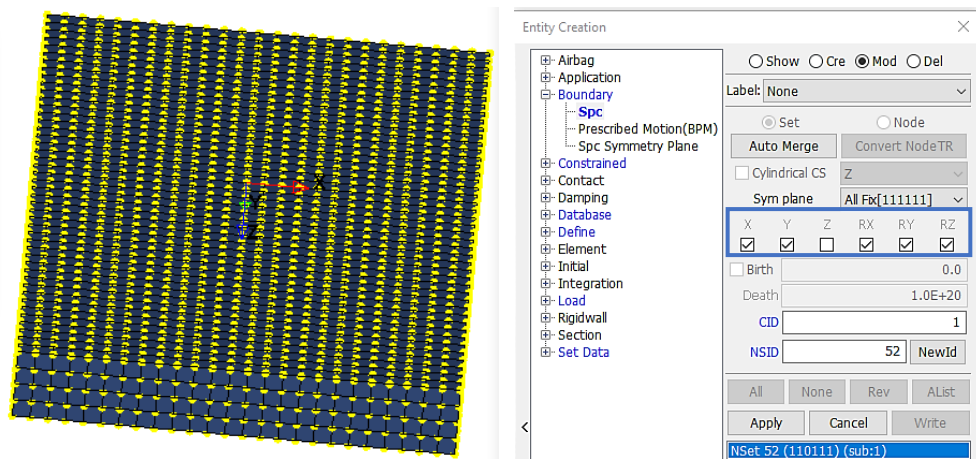
W: Es el peso del vehículo en kg.

La carga deberá ser aplicada en la parte delantera del semiarco lateral, hacia abajo con un ángulo de  $5^\circ \pm 1^\circ$  respecto a la horizontal y del eje transversal deberá estar dirigida hacia el exterior y hacia abajo con un ángulo de  $25^\circ \pm 1^\circ$  a través de un sello rígido con un nuevo subsistema de coordenadas que se indica en la Figura 64, en donde a

todos sus nodos se restringe el desplazamiento en los nuevos ejes “x” y “y”, además de su rotación en los todos los nuevos sus ejes como se muestra en la Figura 65.



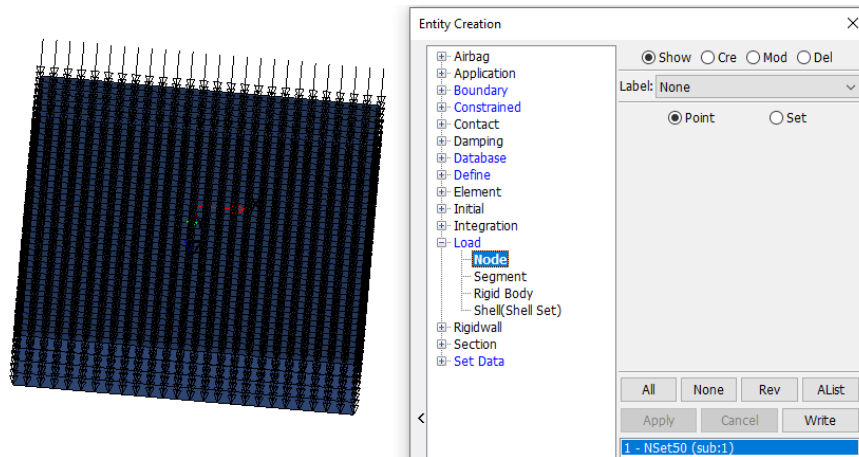
**Figura 64.** Ubicación del nuevo subsistema de coordenadas.



**Figura 65.** Restricciones de desplazamiento y rotación del sello rígido.

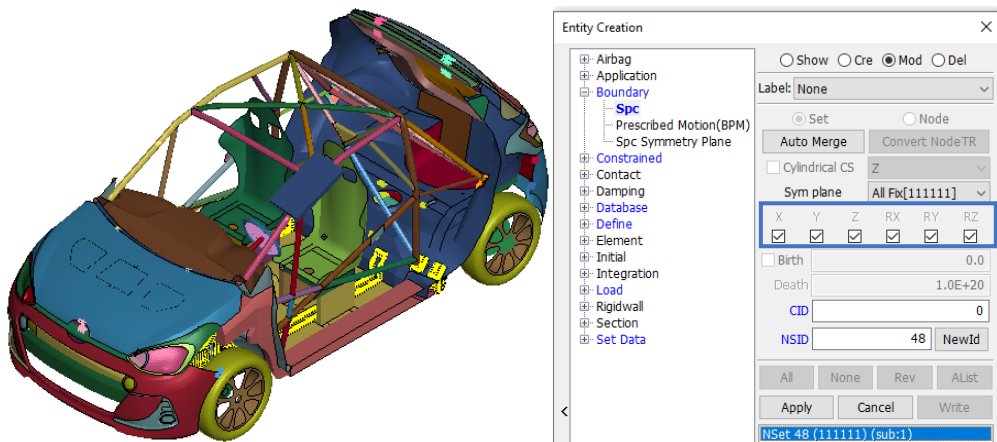
La carga se podrá aplicar en todos los nodos del sello rígido sólo en el eje “z” del nuevo subsistema de coordenadas cómo se muestra en la Figura 66.





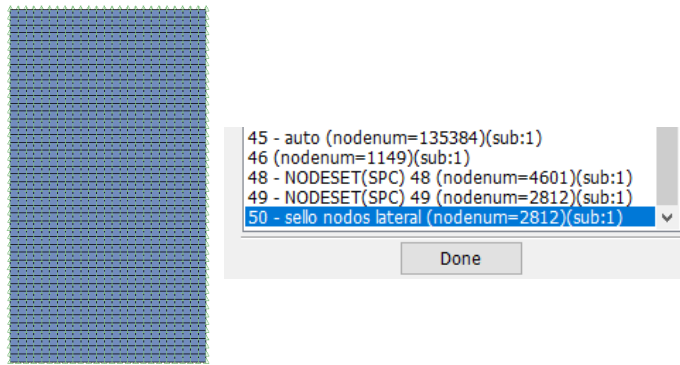
**Figura 66.** Carga aplicada en el eje “z” del nuevo subsistema de coordenadas del sello rígido.

Los puntos de anclaje para la simulación se asignaron a los nodos del soporte del chasis del vehículo en donde se restringió su desplazamiento y rotación en todos los ejes como se muestra en la Figura 67.



**Figura 67.** Restricciones de desplazamiento y rotación del chasis del vehículo.

Para ejercer la fuerza resultante en el sello, se debe dividir dicha fuerza para los nodos que se muestran en la Figura 68 como se indica en la Tabla 14.



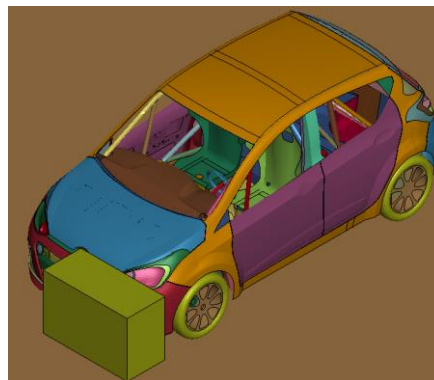
**Figura 68.** Número de nodos que contiene el sello del semiarco principal.

**Tabla 14.** Carga resultante final para cada nodo del sello

Carga aplicada (daN)	kN	nodos	Carga resultante (kN)
37450	37,45	2812	0,01331792

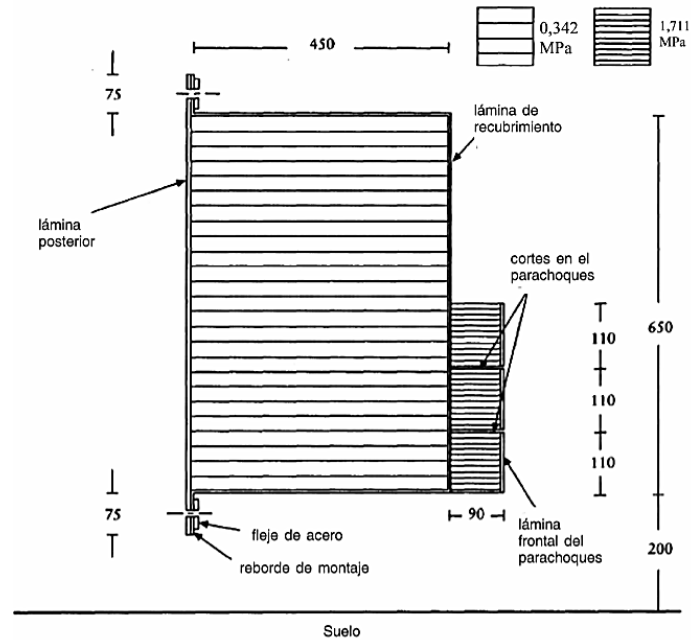
### Simulación de impacto frontal

Se colocó al vehículo montado con la jaula de seguridad en una posición que indica un choque del 40% de su parte frontal contra una barrera como se indica en la Figura 69, en esta simulación se podrá verificar el nivel de impacto y la deformación que el vehículo ensamblado con la jaula de seguridad presentará. Es importante que la jaula de seguridad pueda soportar el impacto de manera que no se deforme exageradamente ni supere la zona de supervivencia que existe dentro de la estructura.



**Figura 69.** Impacto frontal del vehículo con la jaula de seguridad.

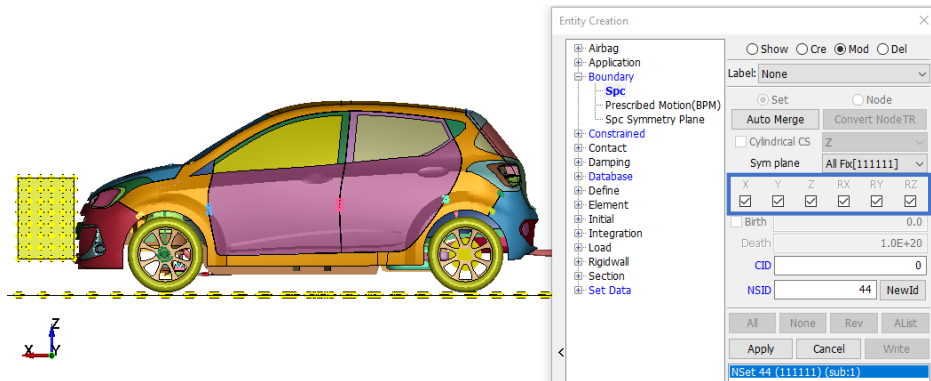
Las dimensiones de la barrera se indican en la Figura 70, las cuales son descritas en el Reglamento n°94 de la Comisión Económica para Europa y específicas para estas simulaciones.



Anchura de la barrera = 1 000 mm  
 Todas las dimensiones están en milímetros

**Figura 70.** Dimensiones de barrera CEPE R94 [56].

A los nodos de la barrera y del piso se restringe el desplazamiento y su rotación en los todos sus ejes como se muestra en la Figura 71.



**Figura 71.** Restricciones de desplazamiento y rotación de la barrera y el piso.

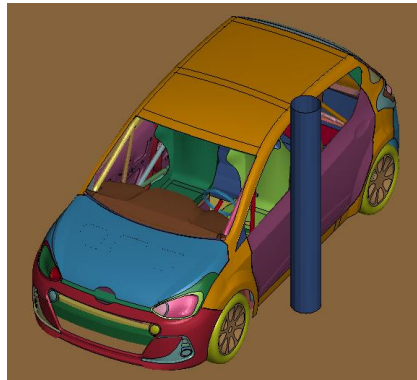
En la Tabla 15 se presentan las condiciones de simulación para el impacto frontal.

**Tabla 15.** Condiciones de simulación para impacto frontal.

Condición	Valor cantidad
Velocidad	64 km/h
Dimensiones de la barrera	450x650x1000 mm

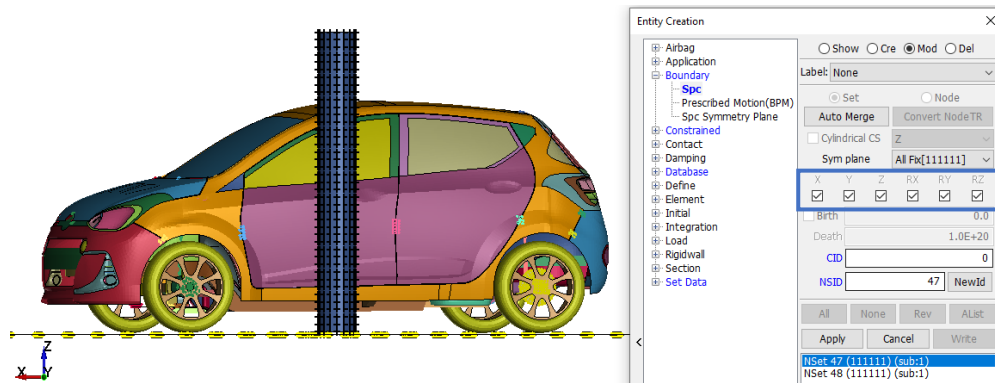
### Simulación de impacto lateral con poste

Se colocó al vehículo con un pequeño ángulo alejado de la perpendicular de 15° del poste de 254 mm como se muestra en la Figura 72, en esta simulación se podrá verificar si el vehículo sufre una deformación que sobrepase el límite de supervivencia de la jaula de seguridad. Este impacto es uno de los más comunes en la competición de rally por lo que es importante verificar el buen funcionamiento de la estructura del vehículo conjuntamente con la jaula de seguridad.



**Figura 72.** Impacto lateral del vehículo con la jaula de seguridad.

A los nodos del poste lateral y del piso se restringe el desplazamiento y su rotación en los todos sus ejes como se muestra en la Figura 73.



**Figura 73.** Restricciones de desplazamiento y rotación de la barrera y el piso.

En la Tabla 16 se presentan las condiciones de simulación para el impacto lateral.

**Tabla 16.** Condiciones de simulación para impacto lateral con poste.

Condición	Valor cantidad
Velocidad	32 km/h
Dimensiones del poste	D250x2000mm

### 2.3.4. Diseño de las conexiones soldadas

Se deberán considerar ciertos factores para realizar el cálculo del tamaño de soldadura por lo que se obtendrán los datos necesarios a partir del esfuerzo máximo que genere en una parte de la soldadura al aplicar la carga vertical en el arco principal cuyos parámetros de aplicación se describen en la Tabla 12.

Para el cálculo del tamaño de soldadura se procederá a aplicar la siguiente fórmula para el esfuerzo de Von Mises máximo descrita en la Ecuación 5.

$$\sigma = 0.623 x \frac{F}{h l} \quad \text{Ecuación 5.}$$

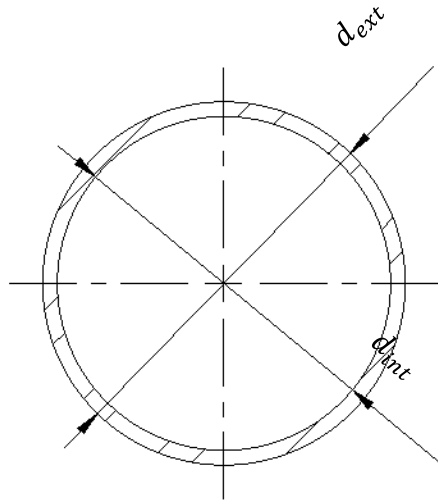
Donde:

*F*: carga de tensión o compresión.

*h: garganta de soldadura.*

*l: longitud de la soldadura.*

Para el cálculo de la fuerza descrita en la Ecuación 5, es importante calcular el área transversal con los diámetros exterior e interior de la tubería que se muestran en la Figura 74 mediante la Ecuación 6.



**Figura 74.** Diámetro exterior e interior de la tubería.

$$A_{total} = A_1 - A_2 \quad \text{Ecuación 6.}$$

*Donde:*

$A_1$ : *área del diametro exterior.*

$A_2$ : *área del diámetro interior.*

### **2.3.5. Factor de seguridad a fatiga y a fluencia de los puntos de anclaje**

En esta parte se procede a desplazar 1 mm a cada punto de anclaje individualmente, para obtener los esfuerzos máximos y mínimos que nos servirán para calcular los respectivos factores de seguridad.

### Factor de seguridad a la fluencia

El factor de seguridad a la fluencia ( $n_y$ ) se calcula mediante la Ecuación 7.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{S_y}{n_y} \quad \text{donde} \quad n_y = \frac{S_y}{\sigma_{m\acute{a}x}} \geq 1 \quad \text{Ecuaci3n 7.}$$

Donde:

$S_y$ : Resistencia a la fluencia.

$\sigma_{m\acute{a}x}$ : esfuerzo máximo.

### Factor de seguridad a la fatiga

El factor de seguridad a la fatiga ( $n_f$ ) se obtiene al aplicar la ecuaci3n 8 indicada para Goodman modificado.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n_f} \quad \text{donde} \quad n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad \text{Ecuaci3n 8.}$$

Donde:

$\sigma_a$ : componente de la amplitud.

$\sigma_m$ : componente de esfuerzo medio.

$S_e$ : límite de resistencia a la fatiga.

$S_{ut}$ : límite de resistencia a la tracci3n.

- Calculamos la componente amplitud del esfuerzo ( $\sigma_a$ ) con la Ecuaci3n 9.

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad \text{Ecuaci3n 9.}$$

- Calculamos la componente del esfuerzo medio ( $\sigma_m$ ) con la Ecuación 10.

$$\sigma_m = \left( \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right) \quad \text{Ecuaci3n 10.}$$

- Calculamos el l3mite de resistencia a la fatiga ( $S_e$ ) mediante la siguiente Ecuaci3n 11.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad \text{Ecuaci3n 11.}$$

*Donde:*

$k_a$ : *factor de modificaci3n por la condici3n superficial.*

$k_b$ : *factor de modificaci3n por el tama1o.*

$k_c$ : *factor de modificaci3n por la carga.*

$k_d$ : *factor de modificaci3n por la temperatura.*

$k_e$ : *factor de confiabilidad.*

$k_f$ : *factor de modificaci3n por efectos varios.*

$S'_e$ : *l3mite de resistencia a la fatiga en la ubicaci3n cr3tica.*

Obtenemos el factor de modificaci3n de la condici3n superficial ( $k_a$ ) mediante la Ecuaci3n 12.

$$k_a = a S_{ut}^b \quad \text{Ecuaci3n 12.}$$



Los valores de a y b se obtienen a partir de la Tabla 17.

**Tabla 17.** Parámetros en el factor de condición superficial de Marin [57].

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	$S_{utr}$ kpsi	$S_{utr}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

$$k_a = 4.51 (310)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.986$$

El factor de modificación por tamaño ( $k_b$ ) para carga axial al no tener efecto de tamaño se tiene:

$$k_b = 1$$

Para obtener el factor de modificación por carga ( $k_c$ ) se selecciona el tipo de carga que mediante la Ecuación 13.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases} \quad \text{Ecuación 13.}$$

Debido a que no se tiene más información para obtener el factor de modificación por la temperatura ( $k_d$ ), el factor de confiabilidad ( $k_e$ ) y el factor de modificación por efectos varios ( $k_f$ ) se los considerará como 1 para este caso en particular.

$$k_d = k_e = k_f = 1$$

Calculamos el valor de resistencia a la fatiga en el punto crítico mediante la Ecuación 14.

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$S'_e = 0.5 S_{ut}$$

$$S'_e = 0.5 (310 \text{ MPa})$$

$$S'_e = 155 \text{ MPa}$$

Con los datos obtenidos calculamos el valor del límite de resistencia a la fatiga ( $S_e$ ):

$$S_e = (0.986)(1)(0.85) (1) (1) (1) (155 \text{ MPa})$$

$$S_e = 129.90 \text{ MPa}$$

- Finalmente obtenemos el valor del factor de seguridad a la fatiga ( $n_f$ ) que se obtiene mediante la ecuación 8.

Para el cálculo de los factores de seguridad de los puntos de anclaje van a cambiar únicamente los valores de esfuerzo máximos ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) y mínimos ( $\sigma_{m\acute{i}n}$ ), entonces únicamente van a variar los valores de la componente amplitud del esfuerzo ( $\sigma_a$ ) y la componente del esfuerzo medio ( $\sigma_m$ ), para el cálculo del valor de límite de resistencia a la fatiga ( $S_e$ ), sus factores y su resultado final van a ser los mismos para todos los puntos de anclaje.

### 2.3.6. Construcción de la jaula de seguridad

Para la construcción de la jaula de seguridad se deberá desmontar el carro de todas las autopartes internas y externas que posea el vehículo a excepción del sistema del motor y las llantas. El vehículo desmontado deberá estar sin su tapicería y su sistema eléctrico con el fin de tener el espacio suficiente para poder armar la estructura. La estructura se deberá construir por partes de acuerdo a los planos que se indican en el Anexo 2 y utilizando las herramientas correspondientes. Las partes de la estructura se deberán

soldar con soldadura MIG siguiendo la configuración que se diseñó. Una vez terminado el proceso de soldado se procede empapelar para luego pintar la estructura de seguridad y el interior del vehículo. Terminado el proceso de pintura se deberá montar nuevamente todas las autopartes y sistemas del vehículo, además que se instalan todos los sistemas de seguridad que se requiere para esta competición. Para una mejor comprensión y visualización ver el Anexo 1 en donde se describe más a detalle y gráficamente todo el proceso de construcción.

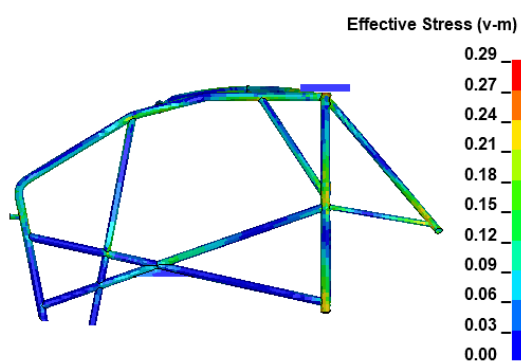
## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

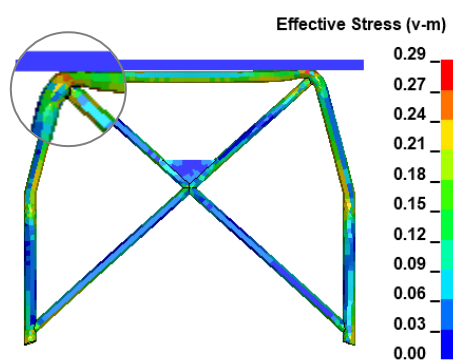
#### 3.1. Resultados de simulaciones estáticas

##### 3.1.1. Simulación de carga vertical sobre el arco principal

El valor máximo del esfuerzo de Von Mises es 290 MPa como se muestra en la Figura 75, este valor está por encima del límite de fluencia y es menor al del límite de resistencia última a la tracción del material ASTM A500 Gr. A (230 MPa y 310 MPa respectivamente) por lo que se considera un análisis no lineal. Los valores máximos de esfuerzo se presentan en los redondeos del arco principal como se indica en la Figura 76.

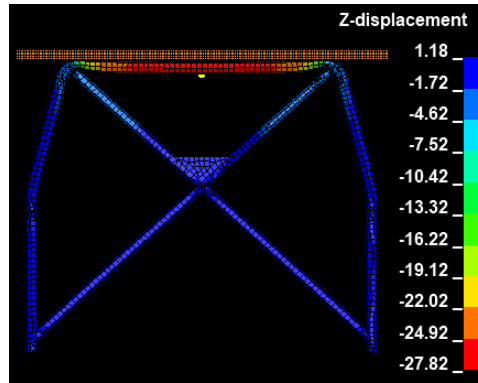


**Figura 75.** Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad.

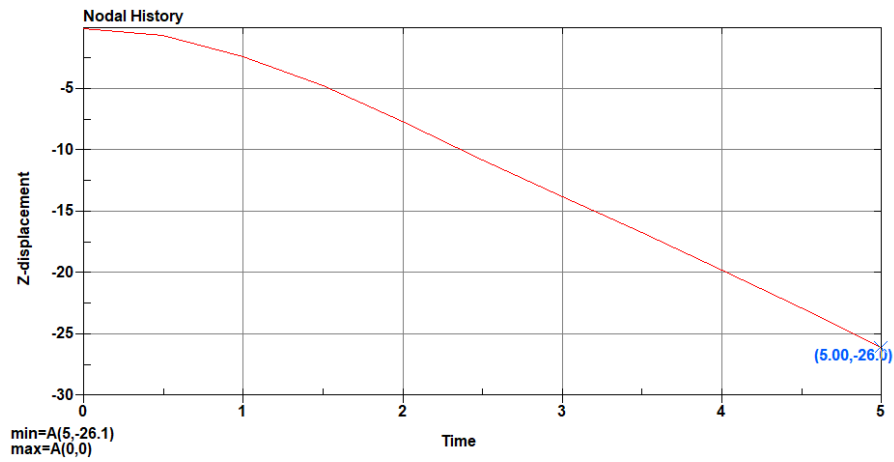


**Figura 76.** Esfuerzo de Von Mises en los redondeos del arco principal.

Para medir la deformación de la parte superior del arco principal con respecto a la vertical se utilizó un nodo como punto de referencia como se indica en la Figura 77 para obtener su gráfica de desplazamiento, dando como resultado 26 mm como se muestra en la Figura 78 y es inferior a la deformación plástica de 50 mm impuesta por la FIA para esta aplicación de carga.



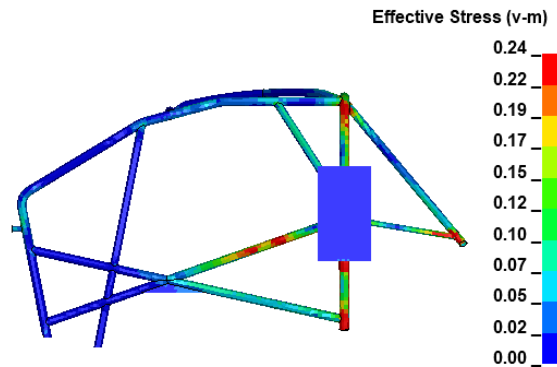
**Figura 77.** Punto de referencia en el arco principal para medir su desplazamiento.



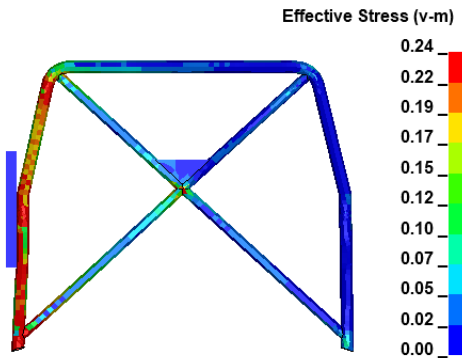
**Figura 78.** Curva de desplazamiento del nodo de referencia en un tiempo de 5 ms con un desplazamiento en Z de -26 mm.

### 3.1.2. Simulación de carga lateral sobre el arco principal

El valor máximo del esfuerzo de Von Mises es 240 MPa como se muestra en la Figura 79, este valor está por encima del límite de fluencia y es menor al del límite de resistencia última a la tracción del material ASTM A500 Gr. A (230 MPa y 310 MPa respectivamente) por lo que se considera un análisis no lineal. Los valores máximos de esfuerzo se presentan en la parte lateral del arco principal y en la unión de los tirantes diagonales como se indica en la Figura 80.



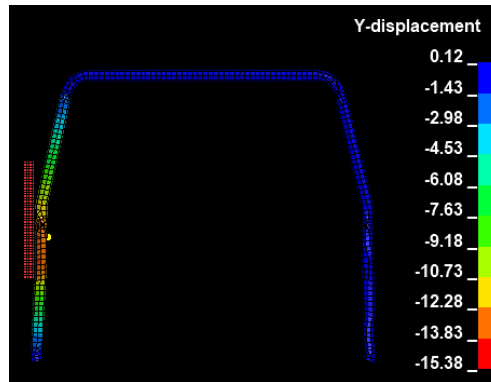
**Figura 79.** Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad.



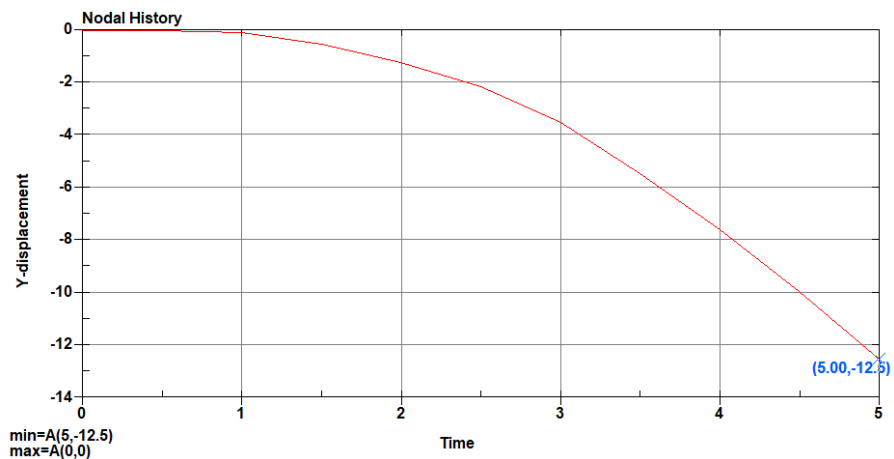
**Figura 80.** Máximo esfuerzo de Von Mises en la parte lateral del arco principal.

Para medir la deformación de la parte lateral del arco principal con respecto a la horizontal se utilizó un nodo como punto de referencia como se indica en la Figura 81 para obtener su gráfica de desplazamiento, dando como resultado 12,5 mm como se

muestra en la Figura 82 y es inferior a la deformación plástica de 50 mm impuesta por la FIA para esta aplicación de carga.



**Figura 81.** Punto de referencia en el arco principal para medir su desplazamiento.

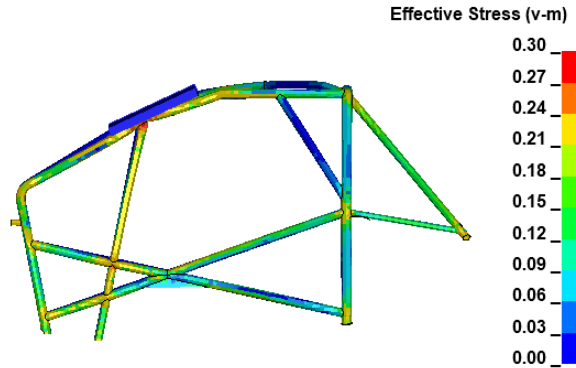


**Figura 82.** Curva de desplazamiento del nodo de referencia en un tiempo de 5 ms con un desplazamiento en Y de -12.5 mm.

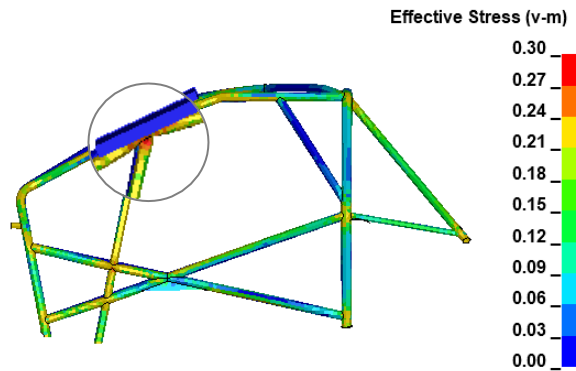
### 3.1.3. Simulación de carga vertical sobre el semiarco lateral

El valor máximo del esfuerzo de Von Mises es 300 MPa como se muestra en la Figura 83, este valor está por encima del límite de fluencia y es menor al del límite de resistencia última a la tracción del material ASTM A500 Gr. A (230 MPa y 310 MPa respectivamente) por lo que se considera un análisis no lineal. Los valores máximos

de esfuerzo se presentan en la unión del semiarco lateral con el refuerzo del techo, el tirante transversal y el pilar del parabrisas como se muestra en la Figura 84.



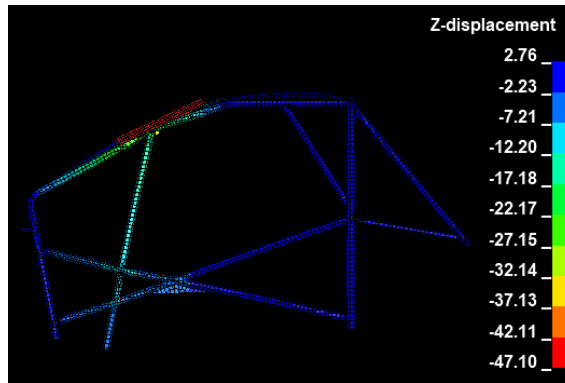
**Figura 83.** Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad.



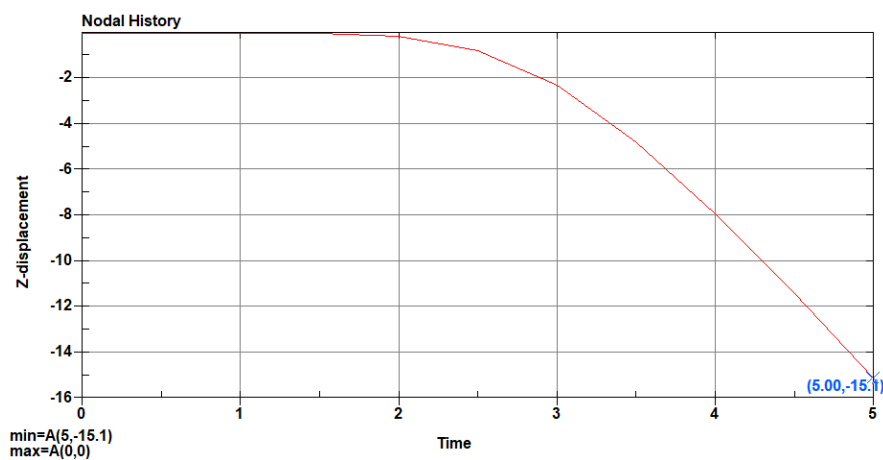
**Figura 84.** Máximo esfuerzo de Von Mises en las uniones del pilar del parabrisas.

Para medir la deformación de la parte superior del semiarco lateral con respecto a la vertical se utilizó un nodo como punto de referencia como se indica en la Figura 85 para obtener su gráfica de desplazamiento, dando como resultado 15,1 mm como se muestra en la Figura 86 y es inferior a la deformación plástica de 100 mm impuesta por la FIA para esta aplicación de carga.





**Figura 85.** Punto de referencia en el semiarco lateral para medir su desplazamiento.



**Figura 86.** Curva de desplazamiento del nodo de referencia en un tiempo de 5 ms con un desplazamiento en Z de -15.1 mm.

Los resultados obtenidos de las simulaciones estáticas indican que la estructura podrá soportar las cargas que dispone el Reglamento de homologación de las estructuras de seguridad de FIA. Se utilizó el criterio de aceptación de tensiones y al ver que el esfuerzo máximo es superior a límite de fluencia se consideró como un análisis no lineal, en donde el límite de resistencia a la tracción no se superó en ninguna instancia.

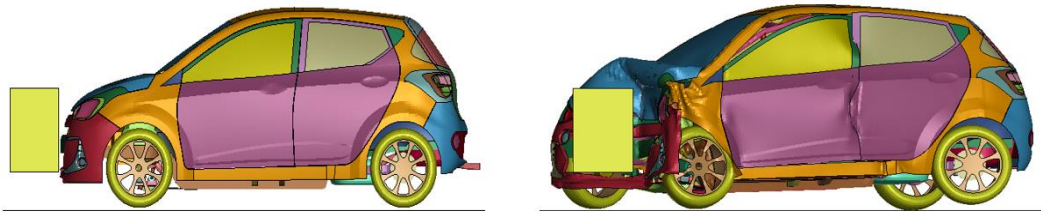
Los valores de deformación resultantes estuvieron debajo del valor permitido por la normativa FIA, pero al tratarse de un análisis no lineal se considera que la deformación en todos los puntos en donde se realizaron la aplicación de cargas sufrirán una deformación permanente.

Iglesias [42], realiza un análisis según el Reglamento de homologación de estructuras de seguridad de FIA, en donde se puede apreciar que los resultados que obtiene con el material que seleccionó superan el límite de fluencia por lo que se considera que es un análisis no lineal, pero en comparación con el análisis que se realizó en este trabajo se obtiene una deformación mucho menor debido a que al material que se utilizó es mucho más resistente.

### 3.2. Resultados de simulaciones dinámicas

#### 3.2.1. Simulación de impacto frontal

En la Figura 87, se puede apreciar el estado inicial y final, antes y después del impacto frontal del Hyundai Grand i10 contra una barrera, se observa que este impacto provoca una gran deformación del vehículo.



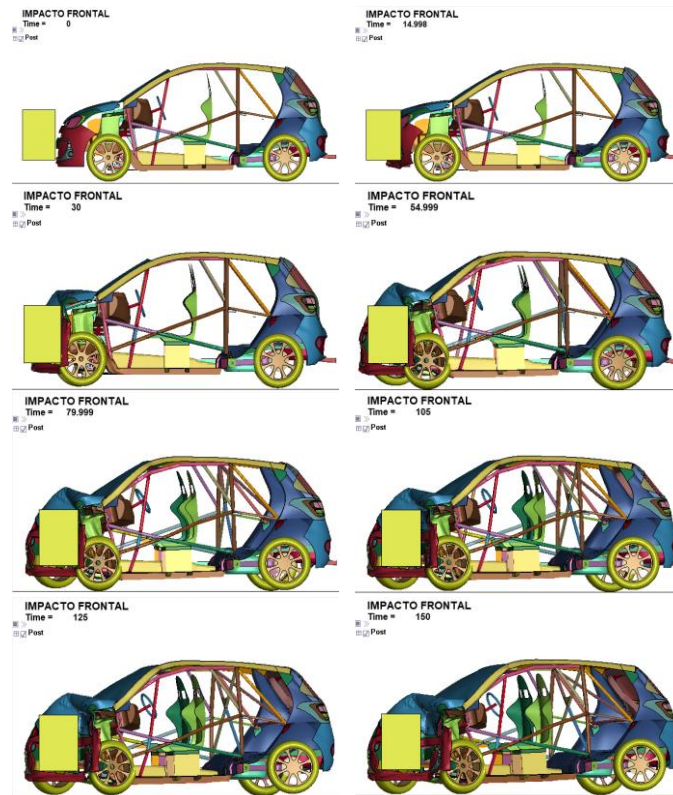
**Figura 87.** Impacto frontal del Hyundai Grand i10.

En la Figura 88, se observa sólo a la estructura de seguridad en su forma inicial y final, antes y después de realizado el impacto frontal, se puede apreciar que los elementos de seguridad de la jaula que más daño reciben son los semiarcos laterales.



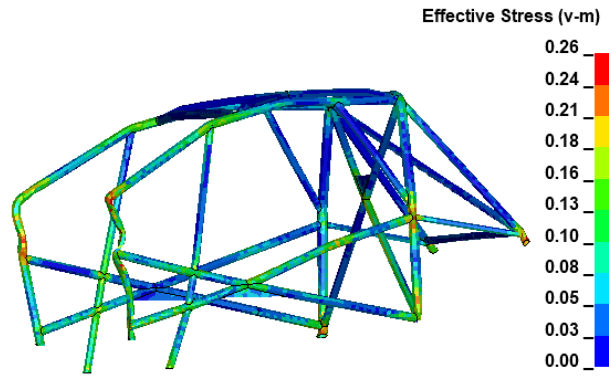
**Figura 88.** Deformación final de la jaula de seguridad.

En la Figura 89, se puede observar la secuencia del impacto del vehículo con la barrera desde una vista lateral sin puertas para poder observar la jaula de seguridad.



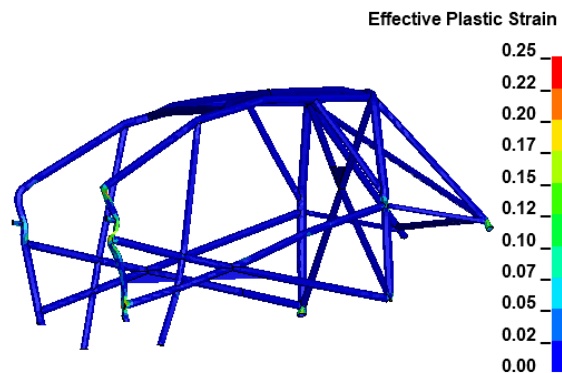
**Figura 89.** Vista superior del comportamiento del vehículo con jaula de seguridad al impacto lateral con poste.

El valor máximo del esfuerzo de Von Mises es de 260 MPa como se muestra en la Figura 90, este valor está por encima del valor del límite de fluencia del material por lo que se considera que existe una deformación plástica permanente pero debido a que no sobrepasa el límite de resistencia última a la tracción del material no llegará a romperse.



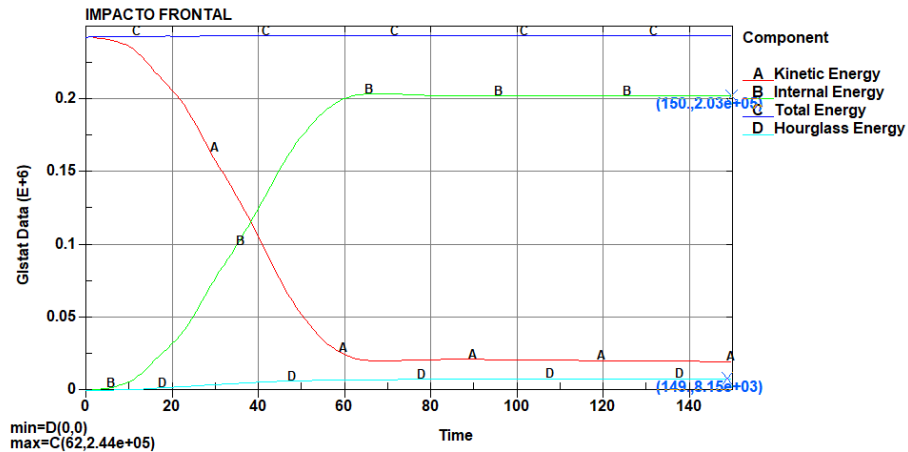
**Figura 90.** Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad impactada frontalmente.

El valor máximo de la Deformación plástica unitaria efectiva es de 0.25 mm/mm, entonces la jaula de seguridad se deformará permanentemente según los colores asignados que se indican en la Figura 91.



**Figura 91.** Valores de la Deformación plástica unitaria efectiva de la jaula de seguridad impactada frontalmente.

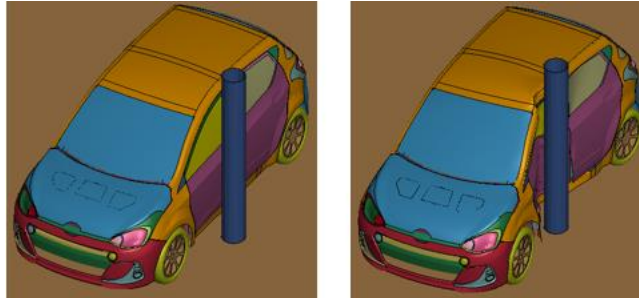
En la Figura 92, se puede observar los resultados obtenidos de energía interna con un valor de  $2.03 \times 10^5$  kN-mm y una energía de hourglass con un valor de  $8.15 \times 10^3$  kN-mm, este último representa un menor valor que el 10% de la energía interna por lo que la solución es aceptable.



**Figura 92.** Curvas de energías vs tiempo del impacto frontal.

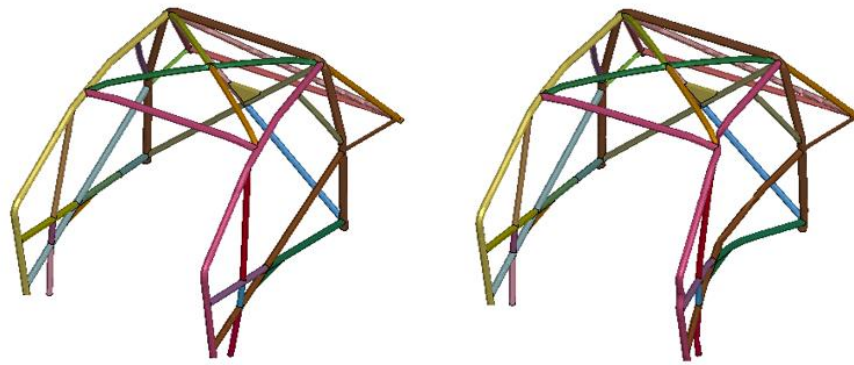
### 3.2.2. Simulación de impacto lateral con poste

En la Figura 93, se puede apreciar el estado inicial y final, antes y después del impacto lateral del Hyundai Grand i10 contra un poste, se observa que este impacto provoca una gran deformación del vehículo.



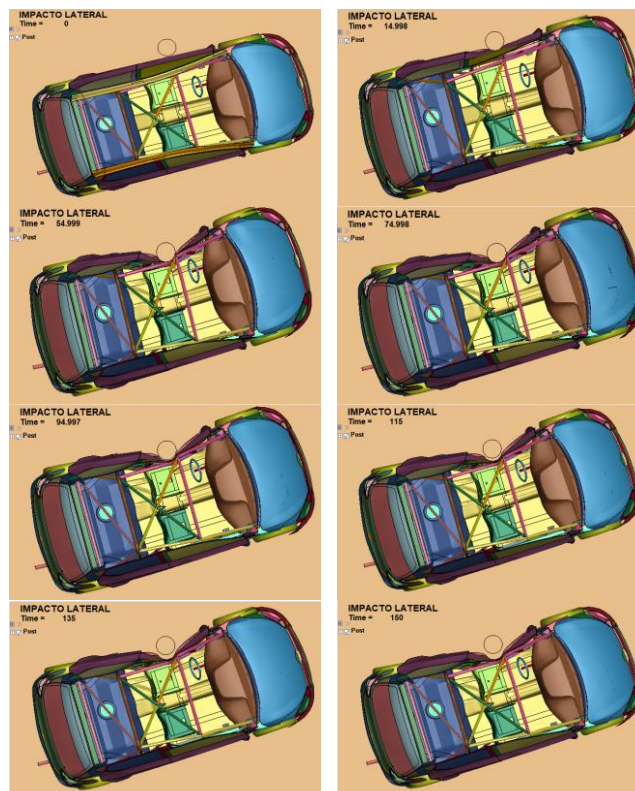
**Figura 93.** Impacto frontal del Hyundai Grand i10.

En la Figura 94, se observa sólo a la estructura de seguridad en su forma inicial y final, antes y después de realizado el impacto lateral con el poste, se puede apreciar que los elementos de seguridad de la jaula que más daño reciben son las barras de las puertas, el pilar del parabrisas y el semiarco lateral.



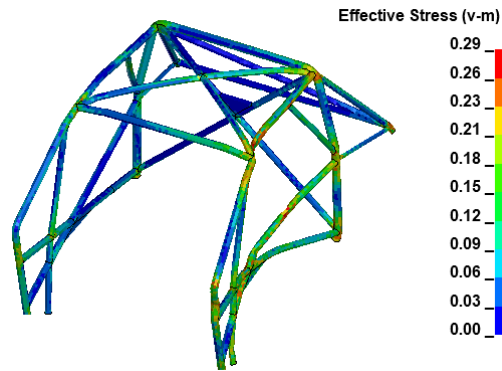
**Figura 94.** Deformación final de la jaula de seguridad.

En la Figura 95, se puede observar la secuencia del impacto del vehículo con el poste desde una vista superior sin techo para poder observar el comportamiento de la jaula de seguridad.



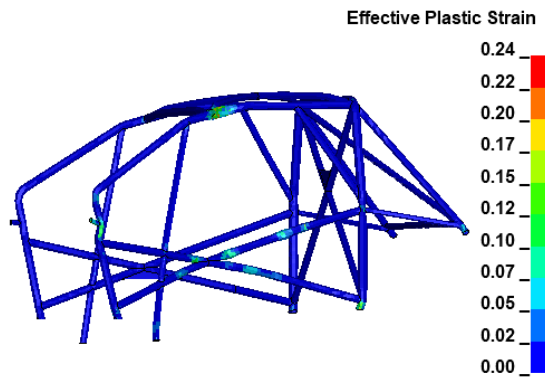
**Figura 95.** Vista superior del comportamiento del vehículo con jaula de seguridad al impacto lateral con poste.

El valor máximo del esfuerzo de Von Mises es de 290 MPa como se muestra en la Figura 96, este valor está por encima del valor del límite de fluencia del material por lo que se considera que existe una deformación plástica permanente pero debido a que no sobrepasa el límite de resistencia última a la tracción del material no llegará a romperse.



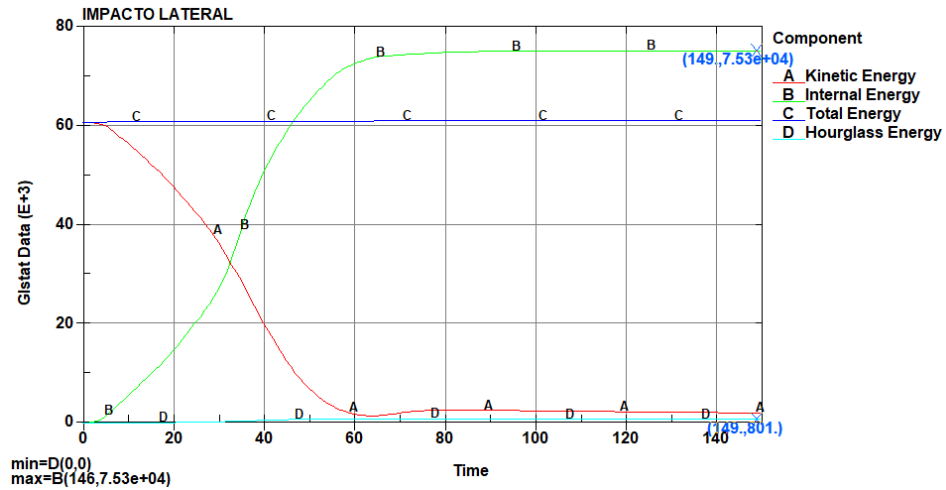
**Figura 96.** Valores de esfuerzo de Von Mises de la jaula de seguridad impactada lateralmente.

El valor máximo de la Deformación plástica unitaria efectiva es de 0.24 mm/mm, entonces la jaula de seguridad se deformará permanentemente según los colores asignados que se indican en la Figura 97.



**Figura 97.** Valores de Deformación plástica unitaria efectiva de la jaula de seguridad impactada lateralmente.

En la Figura 98, se puede observar los resultados obtenidos de energía interna con un valor de  $7.53 \times 10^4$  kN-mm y una energía de hourglass con un valor de 0.8 kN-mm, este último representa un menor valor que el 10% de la energía interna por lo que la solución es aceptable.



**Figura 98.** Curvas de energías vs tiempo del impacto lateral.

Las simulaciones dinámicas realizadas no están enmarcadas en la Normativa FIA ni en el Reglamento de homologación para estructuras de seguridad de FIA, pero es importante realizarlos para comprobar su resistencia ante impactos frontales y laterales para lo cual se utilizó los ensayos que se enmarcan en las normativas del Programa Europeo de Evaluación de Automóviles Nuevos (euroNCAP).

Los resultados que se obtuvieron a partir de estos ensayos muestran que los esfuerzos máximos no superan el límite de resistencia a la tracción con lo que se determina que la jaula no llegará a romperse en ninguno de los dos casos de impacto, además la estructura no se deforma exageradamente y no invade las zonas en donde se situarán el piloto y copiloto.

Los resultados de la energía de hourglass para el caso de impacto frontal, los valores de energía están por debajo del diez por ciento de la energía interna y para el caso de impacto lateral, los valores de energía están cercanos al cero; en ambos casos cumplen



con los parámetros establecidos para poder determinar que la simulación está realizada correctamente.

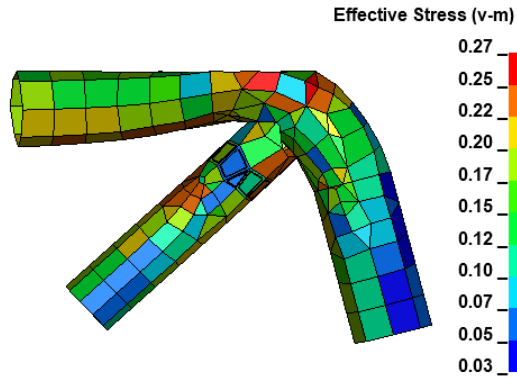
Cárdenas [4], realiza un ensayo de impacto frontal a una velocidad de 56 km/h en un vehículo Susuki Forza 1; los resultados muestran que la estructura se deforma en exceso y concluye como un análisis no válido debido a que el modelo está incompleto y es alejado a la realidad. En comparación con los resultados obtenidos es importante mencionar que se realiza el impacto a una velocidad superior de 64 km/h y se puede observar que el modelo del vehículo es lo más cercano posible a la realidad debido a que contiene algunos elementos que lo hacen más resistente por lo que en nuestro caso la jaula de seguridad no se deforma en exceso y no llega a romperse.

Argüeso [58], realiza un ensayo de impacto lateral con poste a una velocidad de 18 km/h en un vehículo Geo Metro 97; los resultados muestran que la deformación no es tan exagerada y no invade la zona del piloto. En comparación con los resultados obtenidos es importante señalar que se hizo a una velocidad superior de 36 km/h, sin embargo, la deformación es similar para ambos casos esto debido a que la mayor cantidad de daño para ambos casos es recibida por las puertas laterales de los vehículos.

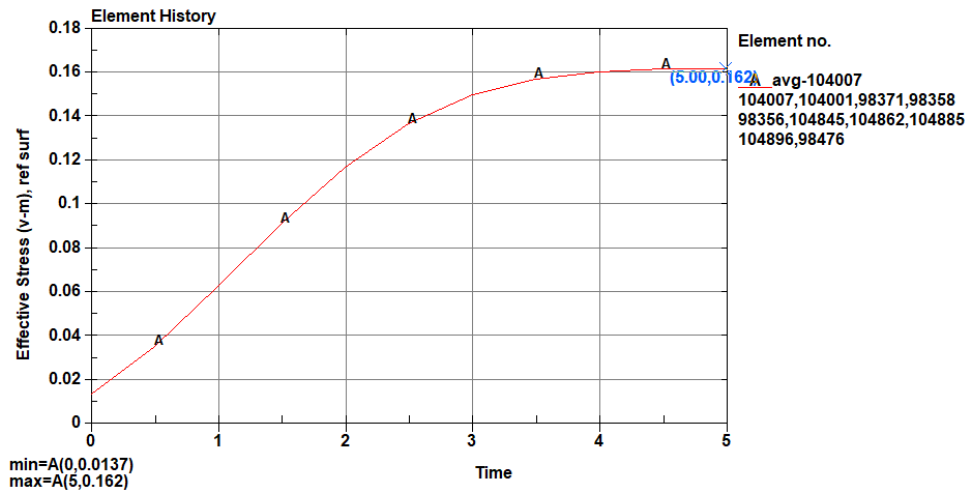
### **3.3. Diseño de la conexión soldada**

Para obtener el tamaño de la soldadura se debe obtener la fuerza a la que está sometida la estructura en donde se indica la soldadura, en la Figura 99 se puede observar los esfuerzos de Von Mises resultantes al aplicar la carga sobre el arco principal; a partir de estos valores se va a obtener la fuerza necesaria para calcular el tamaño de soldadura en las diferentes conexiones soldadas existentes.

En la Figura 99 se indican también los elementos seleccionados de donde se obtendrán los esfuerzos para conseguir el promedio, como indica en la Figura 100 con un valor de 162 MPa, este valor será utilizado para despejar la fuerza necesaria para resolver la Ecuación 5.



**Figura 99.** Valores de esfuerzo de Von Mises y elementos seleccionados para obtener el promedio de sus esfuerzos (Elementos: 104007, 104001, 98371, 98358, 98356, 104845, 104862, 104885, 104896, 98476)

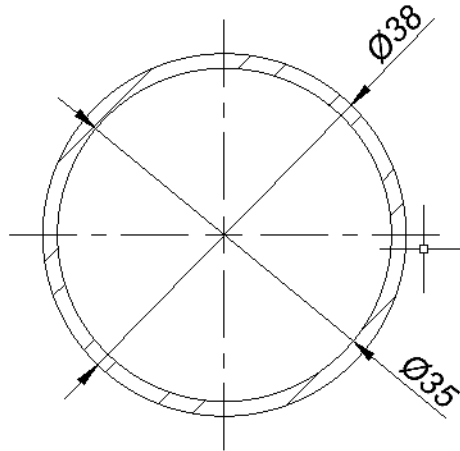


**Figura 100.** Promedio de las curvas de esfuerzos de los elementos seleccionados en un tiempo de 5 ms con un esfuerzo máximo de 162 MPa.

A partir de los valores encontrados se procede a realizar los siguientes cálculos:

- Se obtiene la fuerza resultante en esa parte del tirante diagonal del arco principal donde se seleccionaron los elementos indicados en la Figura 99, esta tubería tiene un diámetro de 38 mm y un espesor de 1.5 mm.

Se calcula del área transversal ( $A_{total}$ ) que se encuentra rayada en la Figura 101 con diámetros de 38 y 35 mm mediante la Ecuación 6:



**Figura 101.** Diámetro exterior e interior de la tubería.

$$A_{total} = A_1 - A_2$$

$$A_1 = \pi x r^2$$

$$A_2 = \pi x r^2$$

$$A_1 = \pi x (19 \text{ mm})^2$$

$$A_2 = \pi x (17.5 \text{ mm})^2$$

$$A_1 = 1134,11 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 962,11 \text{ mm}^2$$

$$A_{total} = 1134,11 \text{ mm}^2 - 962,11 \text{ mm}^2$$

$$A_{total} = 172 \text{ mm}^2$$

Se obtiene la fuerza ( $F$ ) que actúa en los elementos seleccionados en el tirante diagonal del arco principal aplicando la Ecuación 12 de designada para esfuerzo:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \rightarrow \quad F = \sigma x A \quad \text{Ecuación 15.}$$

$$F = 162 \text{ MPa} \times 172 \text{ mm}^2$$

$$F = 27864 \text{ N}$$

- Para obtener el tamaño de soldadura ( $h$ ) se aplica la ecuación 5 de esfuerzo de Von Mises máximo en soldaduras a tope y de filete:

$$\sigma = 0.623 \times \frac{F}{h l} \quad \text{donde} \quad h = 0.623 \times \frac{F}{\sigma l}$$

La longitud de la soldadura ( $l$ ) para este caso se dará alrededor de toda la tubería por lo que se deberá calcular la circunferencia del tirante diagonal mediante la ecuación 16:

$$l = \pi \times d \quad \textbf{Ecuación 16.}$$

$$l = \pi \times (38 \text{ mm})$$

$$l = 119.38 \text{ mm}$$

Con los datos obtenidos finalmente se calcula el tamaño de la soldadura ( $h$ ) de Ecuación 5 de esfuerzo de Von Mises máximo en soldaduras a tope y de filete:

$$h = 0.623 \times \frac{F}{\sigma l}$$

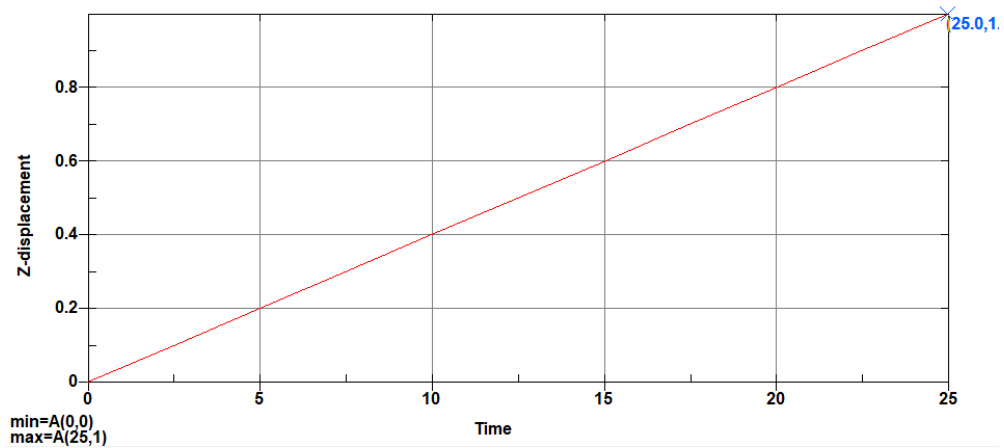
$$h = 0.623 \times \frac{27864 \text{ N}}{162 \text{ MPa} \times 119.38 \text{ mm}}$$

$$h = 0.90 \text{ mm}$$

El tamaño de soldadura es de 0.90 mm ubicada todo alrededor en el tirante diagonal del arco principal, en la zona donde se generan los mayores valores de esfuerzo de Von Mises de toda la jaula de seguridad al realizar el ensayo estático de aplicación de carga vertical sobre el arco principal.

### 3.4. Factor de seguridad a fluencia y fatiga de los puntos de anclaje

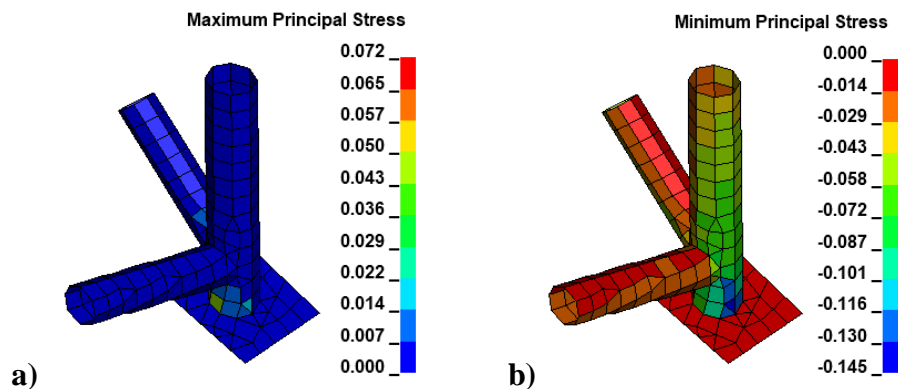
En esta parte se procede a desplazar 1 mm en el eje “z” como se indica en la Figura 102, a cada punto de anclaje individualmente para obtener los esfuerzos máximos y mínimos que nos servirán para calcular los respectivos factores de seguridad.



**Figura 102.** Desplazamiento de 1 mm del punto de anclaje en un tiempo de 25 ms.

#### Anclaje izquierdo del arco principal

Se obtienen los valores máximos y mínimos de esfuerzo principal indicados en la Figura 103 que se generó al desplazarse 1 mm como se indica en la Figura 102.



**Figura 103.** Valores de esfuerzo principal máximo de 72 MPa (a) y mínimo de -145 MPa (b)

### Factor de seguridad a la fluencia

El factor de seguridad a la fluencia ( $n_y$ ) se calcula mediante la siguiente Ecuación 7:

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma_{m\acute{a}x}} \geq 1$$

$$n_y = \frac{230 MPa}{72 MPa}$$

$$n_y = 3.19 \geq 1$$

### Factor de seguridad a la fatiga

El factor de seguridad a la fatiga ( $n_f$ ) se obtiene al aplicar la Ecuación 8 indicada para Goodman modificado:

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

Calculamos la componente amplitud del esfuerzo ( $\sigma_a$ ) mediante la Ecuación 9:

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{min}}{2} \right| = \left| \frac{72 MPa - (-145 MPa)}{2} \right| = 108.5 MPa$$

Calculamos la componente del esfuerzo medio ( $\sigma_m$ ) mediante la ecuación 10:

$$\sigma_m = \left( \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{min}}{2} \right) = \left( \frac{70 MPa + (-140 MPa)}{2} \right) = -36.5 MPa$$

Calculamos el límite de resistencia a la fatiga ( $S_e$ ) mediante la siguiente ecuación 11:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

$$S_e = (0.986)(1)(0.85)(1)(1)(1)(155 MPa)$$

$$S_e = 129.90 \text{ MPa}$$

Finalmente obtenemos el valor del factor de seguridad a la fatiga ( $n_f$ ), como el valor de la componente del esfuerzo medio ( $\sigma_m$ ) es negativa se utiliza la Ecuación 17:

$$\sigma_m < 0 \quad \rightarrow \quad n_f = \frac{S_e}{\sigma_a} \quad \text{Ecuación 17.}$$

$$n_f = \frac{129.90 \text{ MPa}}{108.5 \text{ MPa}}$$

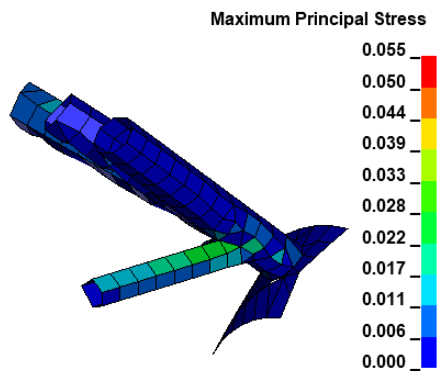
$$n_f = 1.19 \geq 1$$

Los resultados de los factores de seguridad a la fluencia y a la fatiga para el resto de puntos de anclaje se mostrarán en la Tabla 18 a manera de resumen.

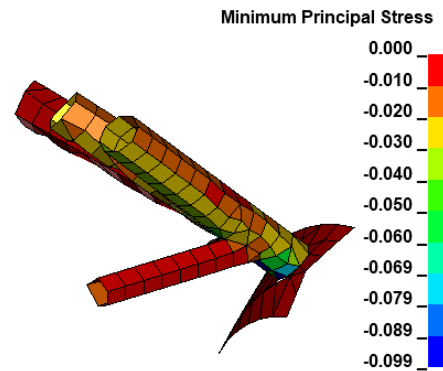
**Tabla 18.** Resultados de los factores de seguridad a fluencia y a fatiga de los puntos de anclaje.

<b>Anclaje derecho del arco principal</b>	
<p>Maximum Principal Stress</p> <p>0.078 0.071 0.063 0.055 0.047 0.039 0.031 0.024 0.016 0.008 0.000</p>	<p>Minimum Principal Stress</p> <p>0.000 -0.011 -0.022 -0.034 -0.045 -0.056 -0.067 -0.079 -0.090 -0.101 -0.112</p>
$\sigma_{m\acute{a}x} = 78 \text{ MPa}$	$\sigma_{min} = -112 \text{ MPa}$
$n_y = 2.94 \geq 1$	
$\sigma_a = 95 \text{ MPa}$	$\sigma_m = -17 \text{ MPa}$
$S_e = 129.90 \text{ MPa}$	
$\sigma_m < 0 \quad \rightarrow \quad n_f = 1.37 \geq 1$	

### Anclaje izquierdo del refuerzo de la suspensión posterior



$$\sigma_{m\acute{a}x} = 55 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{min} = -99 \text{ MPa}$$

$$n_y = 4.18 \geq 1$$

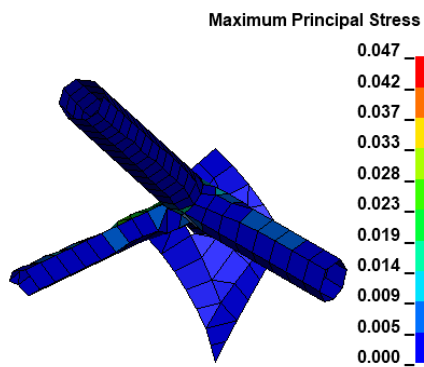
$$\sigma_a = 77 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = -22 \text{ MPa}$$

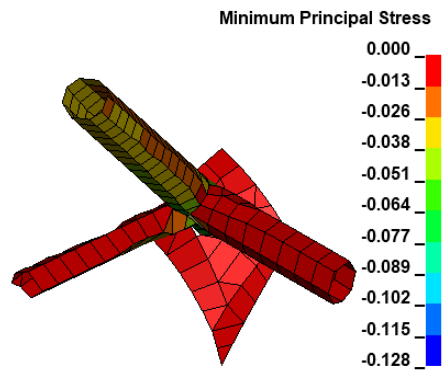
$$S_e = 129.90 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m < 0 \rightarrow n_f = 1.69 \geq 1$$

### Anclaje derecho del refuerzo de la suspensión posterior



$$\sigma_{m\acute{a}x} = 47 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{min} = -128 \text{ MPa}$$

$$n_y = 4.89 \geq 1$$

$$\sigma_a = 87.5 \text{ MPa}$$

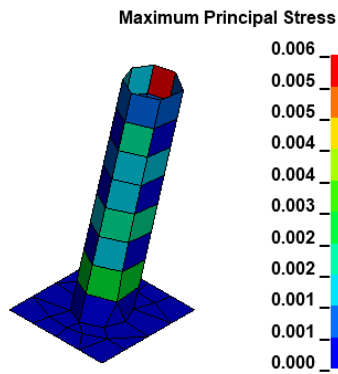
$$\sigma_m = -40.5 \text{ MPa}$$

$$S_e = 129.90 \text{ MPa}$$

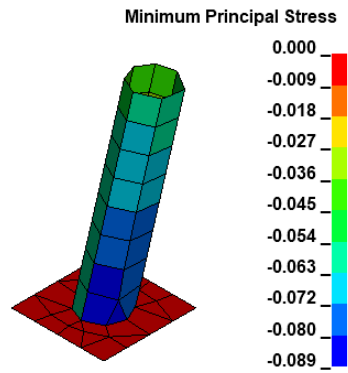
$$\sigma_m < 0 \rightarrow n_f = 1.48 \geq 1$$



### Anclaje izquierdo del pilar de refuerzo



$$\sigma_{m\acute{a}x} = 6 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{min} = -89 \text{ MPa}$$

$$n_y = 38.33 \geq 1$$

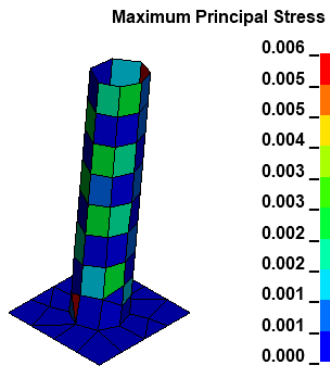
$$\sigma_a = 47.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = -41.5 \text{ MPa}$$

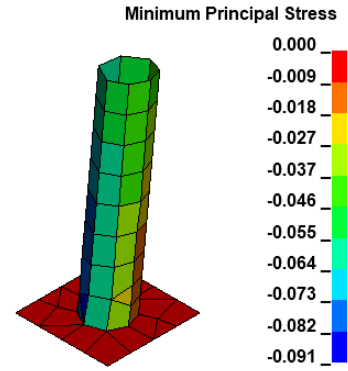
$$S_e = 129.90 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m < 0 \rightarrow n_f = 2.73 \geq 1$$

### Anclaje derecho del pilar de refuerzo



$$\sigma_{m\acute{a}x} = 6 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{min} = -91 \text{ MPa}$$

$$n_y = 38.33 \geq 1$$

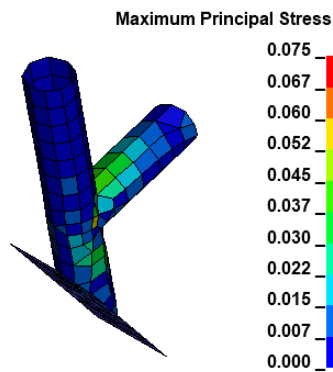
$$\sigma_a = 48.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = -42.5 \text{ MPa}$$

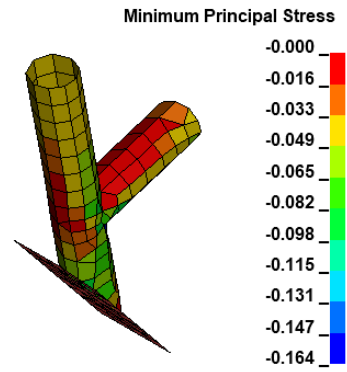
$$S_e = 129.90 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m < 0 \rightarrow n_f = 2.67 \geq 1$$

### Anclaje derecho del semiarco lateral



$$\sigma_{m\acute{a}x} = 75 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{min} = -164 \text{ MPa}$$

$$n_y = 3.06 \geq 1$$

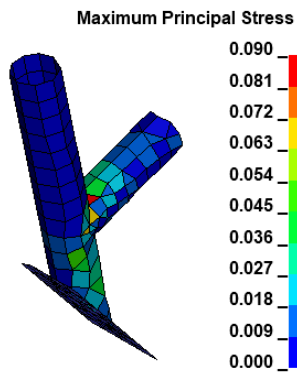
$$\sigma_a = 119.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = -44.5 \text{ MPa}$$

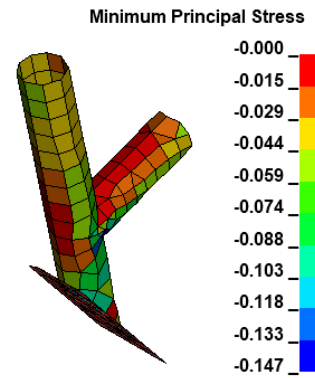
$$S_e = 129.90 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m < 0 \rightarrow n_f = 1.08 \geq 1$$

### Anclaje derecho del semiarco lateral



$$\sigma_{m\acute{a}x} = 90 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{min} = -147 \text{ MPa}$$

$$n_y = 2.55 \geq 1$$

$$\sigma_a = 118.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = -28.5 \text{ MPa}$$

$$S_e = 129.90 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m < 0 \rightarrow n_f = 1.09 \geq 1$$

En la Tabla 18 se indican que todos los puntos de anclaje tienen factores de seguridad a fluencia y fatiga aceptables, por lo que se asegura un buen funcionamiento de la jaula de seguridad. También es importante mencionar que el punto de anclaje del pilar del parabrisas es que tiene el valor más grande de factor de seguridad a fluencia debido a que la estructura que más ayuda a soportar la carga es la barra de puertas.

### 3.4. Resumen de resultados

**Tabla 19.** Resumen de resultados.

<b>Tipo</b>	<b>Criterios</b>	<b>Resultado</b>	<b>Rango</b>	<b>Cumple/No cumple</b>
<b>Aplicación de carga</b>	Deformación vertical del arco principal	26 mm	50 mm	Cumple
		Visualizar Figura 78		
	Deformación lateral del arco principal	12.5 mm	50 mm	Cumple
		Visualizar Figura 82		

	Deformación vertical del semiarco lateral	15.1 mm	100 mm	Cumple
		Visualizar Figura 86		
	Esfuerzo máximo de Von Mises en el arco principal	290 MPa	310 MPa	Cumple
		Visualizar Figura 75		
	Esfuerzo máximo de Von Mises en el arco principal	240 MPa	310 MPa	Cumple
		Visualizar Figura 79		
	Esfuerzo máximo de Von Mises en	300 MPa	310 MPa	Cumple

	el semiarco lateral	Visualizar Figura 83		
<b>Impacto Frontal</b>	Esfuerzo máximo de Von Mises	260 MPa	310 MPa	Cumple
		Visualizar Figura 90		
<b>Impacto Lateral</b>	Esfuerzo máximo de Von Mises	290 MPa	310 Mpa	Cumple
		Visualizar Figura 96		

En la Tabla 19 la mayoría de los resultados obtenidos cumplen con los parámetros establecidos; los esfuerzos de Von Mises resultantes en la aplicación de cargas verticales en el arco principal y en el semiarco lateral son iguales al valor permitido pero sus deformaciones están por debajo del rango establecido por lo que estarían cumpliendo con lo establecido en la Normativa, el único caso en donde no se cumpla es cuando el esfuerzo de Von Mises sea superior al valor del límite de tracción del material seleccionado.

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- Se obtuvo una configuración adecuada para la jaula de seguridad a partir del análisis de las ventajas y desventajas de 8 diseños existentes resultando la mejor opción el diseño existente 8 indicado para el Peugeot 307cc, debido a que cumple al 100% con los parámetros obligatorios y adicionales que se muestran en el Artículo 253-8 del Anexo J de la Normativa FIA y es apta para homologación, obteniendo un máximo desempeño y una mayor resistencia de la estructura. Además, se optó por lo dispuesto en el Reglamento Nacional de Rally de FEDAK para estructuras de seguridad, en donde se indica que la estructura podrá tener más de 8 puntos de anclaje que en nuestro caso resultaron en 10 puntos de anclaje que beneficiaron aún más la resistencia de la estructura.
- Se diseñó la jaula de seguridad en base a las normativas FIA y al realizar las simulaciones de aplicación de cargas y de impacto frontal y lateral con poste del vehículo con la estructura montada, se obtuvo como resultado que los valores críticos de esfuerzo de Von Mises están por encima del límite de fluencia y por debajo del valor del límite de resistencia última a la tracción del material ASTM A500 Gr. A (230 MPa y 310 MPa respectivamente) por lo que se consideró un análisis no lineal. Al aplicar la carga de 37,5 kN sobre el semiarco lateral y al realizar el impacto lateral con poste del vehículo con la estructura montada se obtuvieron valores de esfuerzo de Von Mises de 300 MPa y 290 MPa respectivamente que son los más críticos debido a que son los resultados que más se acercan al valor del límite de resistencia última a la tracción del material.
- El diseño de la jaula de seguridad cumple con las especificaciones y configuraciones indicadas para la construcción de estructuras de seguridad del Artículo 253 del Anexo J de la Normativa FIA. Los resultados de desplazamiento en los ejes coordenados en  $x = 26$  mm,  $y = 12.5$  mm y  $z = 15.1$  mm al estar por

debajo de los rangos establecidos en  $x < 50$  mm,  $y < 50$  mm y  $z < 100$ mm, cumplen con el Reglamento de homologación para jaulas de seguridad de la FIA y en condiciones normales de funcionamiento se obtuvieron valores de esfuerzos de Von Mises menores al valor de la resistencia mínima a la fluencia del material que se utilizó para la construcción de la estructura.

- La jaula de seguridad se construyó a partir de planos que resultaron del diseño con tubería estructural de acero ASTM A500 Gr A de la marca de la marca FUJI que resalta por ser fabricada por la empresa Conduit - Kubiec del Ecuador la misma que cuenta con certificaciones del sistema de gestión de calidad ISO 9001:2015 y se instaló en el vehículo Hyundai Grand i10 en 10 puntos de anclaje de los cuales están situados 6 en el piso del vehículo, 2 en la suspensión delantera y 2 en la suspensión posterior; lo que garantizará que la estructura podrá cumplir su función correctamente.
- Como resultado del estudio se puede concluir que los ensayos estáticos y dinámicos realizados en base a las normativas correspondientes, pueden predecir de manera efectiva el comportamiento de la jaula de seguridad en condiciones normales de funcionamiento y en casos de impacto mostrando un buen rendimiento de la estructura que garantiza la seguridad del piloto que es lo más importante, por lo que para nuevos estudios se puede implementar maniquís y cinturones de cinco puntos para medir los criterios de lesiones en casos de impacto.

## 4.2. Recomendaciones

- Al modelar la jaula de seguridad y el vehículo en un software CAD, verificar que no existan interferencias, superficies mal realizadas, superficies duplicadas y que todas las superficies de pequeño tamaño estén cosidas a otras, con el fin de obtener modelos finales que estén depurados para el mallado.
- Se debe depurar el mallado controlando que el Jacobiano de todos los elementos tengan un valor que esté entre el rango de 0.3 a 0.6.
- Comprobar que la energía de hourglass sea menor al 10% de la energía interna, este concepto nos ayudará a validar las soluciones de nuestras simulaciones.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. N. Pastaz Nenger y Á. H. Toro Vargas, “Diseño, análisis y construcción del habitáculo de seguridad para un vehículo Corsa Wind 1.4 para Rally,” Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2014.
- [2] M. García Martín, “Diseño y análisis de un arco de seguridad destinado a la competición,” Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2010.
- [3] E. A. Ribadeneira Tovar y M. A. Tovar Jurado , “Diseño e implementación de los sistemas de seguridad de un vehículo Volkswagen gol 2000cc para rally según el reglamento 2014 de la FEDAK delegada de la FIA en el Ecuador,” Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, 2015.
- [4] L. A. Cárdenas Gárate, “Diseño de un Roll Bar para un vehículo Suzuki Forza 1 de competición,” Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2015.
- [5] A. Pavlovic y M. Zivkovic, “Roll Cage Desing and Validation for a Rally Vehicule,” University of Bologna, Italia, 2016.
- [6] A. M. López Montalvo, “Diseño, simulación y construcción de una estructura de roll bar para un vehículo de competición modalidad Rally, según Normativa FIA Artículo 253-2014, mediante análisis computacional por el método de elementos finitos,” Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2018.
- [7] T. Newfoundland. *Rollcage Construction & Installacion*. Canadá, 2016, pp. 2-6.
- [8] M. Malcevic, “SNAP LAP: Monte Carlo Rally - the oldest rally race in the world,” 20 01 2016. [En línea]. Available: <https://www.snaplap.net/monte-carlo-rally-the-oldest-rally-race-in-the-world/>.
- [9] L. Barry, “DirtFish: Monte Carlo Rally 2021 Rewind: The one that had it all,” 19 01 2021. [En línea]. Available: <https://dirtfish.com/rally/erc/monte-carlo-rally-2011-rewind-the-one-that-had-it-all/>.
- [10] J. Katz, “Race Car Aerodynamics Designing for Speed” *Bentley Publishers*, 1995, pp. 243 - 255.

- [11] C. F. Castro Cobo, “Estudio e implementación de la seguridad activa y pasiva en el habitáculo para un vehículo de rally en cumplimiento del reglamento técnico de seguridad,” Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, 2016.
- [12] D. Alvarado Palomino, “Nitro.Pe: ¿Cómo modificar la computadora del auto para ganar potencia?,” 17 06 2020. [En línea]. Available: <https://mail.nitro.pe/mecanico-nitro/como-modificar-la-computadora-del-auto-para-ganar-potencia.html>.
- [13] E. Nassiopoulos y J. Njuguna, “Finite element dynamic simulation of whole rallying car structure :Towards better understanding of structural dynamics side impacts,” *European LS-DYNA Users Conference*, nº 8, p. 3, 2011.
- [14] J. M. Naranjo Vela y R. V. Angulo Díaz, “Análisis de los sistemas de protección pasiva y activa del automóvil,” pp. 2 - 4, 2016.
- [15] J. L. L., “ComoFunciona: Como Funciona la seguridad activa de un vehículo,” 2021. [En línea]. Available: <https://como-funciona.co/seguridad-activa-vehiculo/>.
- [16] Continental, “Passive Safety,” 2020. [En línea]. Available: <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Safety-and-Motion/Functions/Passive-Safety>.
- [17] INFOCOINAV, “Blog de Ingeniería Avanzada Ecuador: Diseño de jaulas antivuelco roll cages optimizadas para aplicaciones de competicion breamar automotion motorsports usando radios,” 27 05 2016. [En línea]. Available: <https://blog.coinav.com/disen-de-jaulas-antivuelco-roll-cages-optimizadas-para-aplicaciones-de-competicion-breamar-automotion-motorsports-usando-radioss/>.
- [18] El blog de sintonía, “Tunig Blog.EU: Protección mejorada, actualización con una jaula antivuelco,” 02 10 2018. [En línea]. Available: [https://www.tuningblog.eu/es/kategorien/tipps\\_tuev-dekra-u-co/nachruestung-ueberrollkaefig-207510/](https://www.tuningblog.eu/es/kategorien/tipps_tuev-dekra-u-co/nachruestung-ueberrollkaefig-207510/).

- [19] FIA, “Organización,” 2022. [En línea]. Available: <https://www.fia.com/es/organizacion>.
- [20] FIA, “Anexo J - Artículo 253, Equipamiento de Seguridad,” 2014, p. 7.
- [21] FIA, “Anexo J - Artículo 253, Equipamiento de Seguridad,” 2014, p. 8.
- [22] FIA, “Anexo J - Artículo 253, Equipamiento de Seguridad,” 2014, p. 9.
- [23] FIA, “Anexo J - Artículo 253, Equipamiento de Seguridad,” 2014, p. 10.
- [24] FIA, “Anexo J - Artículo 253, Equipamiento de Seguridad,” 2014, p. 11.
- [25] FIA, “Anexo J - Artículo 253, Equipamiento de Seguridad,” 2014, p. 15.
- [26] FIA, “Anexo J - Artículo 253, Equipamiento de Seguridad,” 2014, p. 16.
- [27] FIA, “Anexo J - Artículo 253, Equipamiento de Seguridad,” 2014, p. 17.
- [28] FIA, “Anexo J - Artículo 253, Equipamiento de Seguridad,” 2014, p. 18.
- [29] FIA, “Reglamento de homologación para jaulas de seguridad,” 2014, p. 9.
- [30] Latin NCAP, “Impacto Frontal,” 2021. [En línea]. Available: <https://www.latinncap.com/es/nuestros-ensayos/pasajero-adulto/impacto-frontal>.
- [31] Euro Ncap, “Barrera deformable con solapa parcial,” 2020. [En línea]. Available: <https://www.euroncap.com/es/seguridad-en-los-veh%C3%ADculos/descripci%C3%B3n-de-las-valoraciones/protecci%C3%B3n-de-ocupantes-adultos/pruebas-anteriores/barrera-deformable-con-solape-parcial/>.
- [32] Latin Ncap, “Impacto Lateral de Poste,” 2021. [En línea]. Available: <https://www.latinncap.com/es/nuestros-ensayos/pasajero-adulto/impacto-lateral-de-poste>.
- [33] Euro Ncap, «Barrera Lateral Fija,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.euroncap.com/es/seguridad-en-los-veh%C3%ADculos/descripci%C3%B3n-de-las-valoraciones/protecci%C3%B3n-de-ocupantes-adultos/impacto-lateral/barrera-lateral-fija/>.

- [34] J. Ruíz Jiménez y J. A. Valdés Requena, “Cálculo estático de la estructura de un trolebús cero emisiones para la ciudad de México,” Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2014.
- [35] O. C. Zienkiewicz, *El método de elementos finitos*, Barcelona: Reverté, 2018.
- [36] D. Illescas Pérez, “Simulación de un choque frontal de un vehículo automóvil contra diferentes tipos de barrera,” Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2009.
- [37] Livermore Software Technology Corporation, “LS-DYNA Theory Manual,” 2006.
- [38] L. S. T. Corporation, “LS-DYNA Keyword User's Manual,” 2003.
- [39] L. E. Villafuerte Buñay, “Análisis estructural de una carrocería autoportante para un bus interprovincial mediante elementos finitos para producción en serie,” Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, 2017.
- [40] C. A. Esmeraldas Meneses, “Análisis estructural basado en simulación por el método de elementos finitos de una carrocería de bus interprovincial sometida a prueba de impacto lateral para determinar la geometría y materiales aplicables que garanticen la seguridad de los pasajeros,” Univerisad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, 2016.
- [41] A. Morales Chover , “Diseño de la jaula de seguridad de un vehículo de competición,” Universitat Politecnica de Valencia, Valencia, 2017.
- [42] G. Iglesias Castro, “Diseño, análisis y optimización de una Estructura de seguridad para un vehículo de Rally,” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2013.
- [43] J. Torres López, “Diseño de una estructura de seguridad para turismo de competición,” Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2019.
- [44] A. Cerrudo Vallejo, “Diseño y análisis de una estructura de seguridad para un Peugeot 307 CC,” Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2013.

- [45] UNITED STEEL INDUSTRY, “Tubo ASTM A500, Tubo estructural ASTM A 500,” 02 04 2018. [En línea]. Available: <https://www.united-steel.com/es/newsshow/363.html>.
- [46] Lifeder, “Flexómetro: para qué sirve, partes, tipos,” 10 07 2020. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/flexometro/>.
- [47] Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía, “Revista digital para profesionales de la enseñanza,” Andalucía, 2011, p. 10.
- [48] Fundación laboral de la construcción, “Máquinas de corte: Tronzadora,” 2018.
- [49] Production Tools, “¿Que es una dobladora de tubos? Definición y funcionamiento,” 10 04 2022. [En línea]. Available: <https://productiontools.es/herramientas-industriales/dobladora-de-tubos-definicion/#:~:text=Por%20definici%C3%B3n%20la%20dobladora%20de, pieza%20y%20evitar%20su%20rotura..>
- [50] Amazon, “HUTH 2806 Heavy-duty Deluxe dobladora de tubos de escape,” [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/2806-Heavy-duty-Deluxe-dobladora-tubos-escape/dp/B00GGQON8M>.
- [51] Perfect Welding, “¿Qué es la soldadura MIG/MAG?,” 2018. [En línea]. Available: <https://www.fronius.com/es-es/spain/tecnologia-de-soldadura/el-mundo-de-la-soldadura/soldadura-mig-mag>.
- [52] Electromecanico Compresores SAS, “Compresores De Aire Para Pintar Todo Lo Que Debes Saber,” 2020. [En línea]. Available: <https://www.electromecanico.co/compresores-de-pintura-todo-lo-que-debes-saber/>.
- [53] Hyundai, “Grand i10 HB,” 2017. [En línea]. Available: <https://www.hyundai.com.ec/grandi10hb>.
- [54] Auto-Data, “2017 Hyundai Grand i10 II (facelift 2017) 1.2 VTVT (83 CV),” 2017. [En línea]. Available: <https://www.auto-data.net/es/hyundai-grand-i10-ii-facelift-2017-1.2-vtvt-83hp-36723>.

- [55] FEDAK, “Reglamento general de Rally,” 2021, p. 75.
- [56] Reglamento R94, “Reglamento no 94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE),” Comisión Económica para Europa, Unión Europea, 2010.
- [57] R. G. Budynas, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2012, p. 274.
- [58] I. M. Argüeso Etayo, “Simulación dinámica en Ls-Dyna de estructuras de protección de pilotos según Normativa FIA,” Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM), Madrid, 2019.

# **ANEXOS**

## Anexo 1

### Construcción de la jaula de seguridad

Por lo general el vehículo se encuentra con todos los accesorios internos antes de empezar el montaje y construcción de la estructura. En las Figuras 104, 105 y 106 se observan que al vehículo ya le desmontaron la tapicería y los asientos.



**Figura 104.** Vista frontal del vehículo sin tapicería y asientos.



**Figura 105.** Vista posterior del vehículo sin tapicería y asientos.





**Figura 106.** Parte interior del vehículo sin tapicería y asientos

Ya desmontados los asientos y tapicería se procede a retirar las puertas del vehículo, el capo y todo el sistema que contiene el tablero conjuntamente con el volante como se observan en las Figuras 107 y 108



**Figura 107.** Vista lateral del vehículo totalmente desmontado.



**Figura 108.** Parte inferior del vehículo totalmente desmontado.

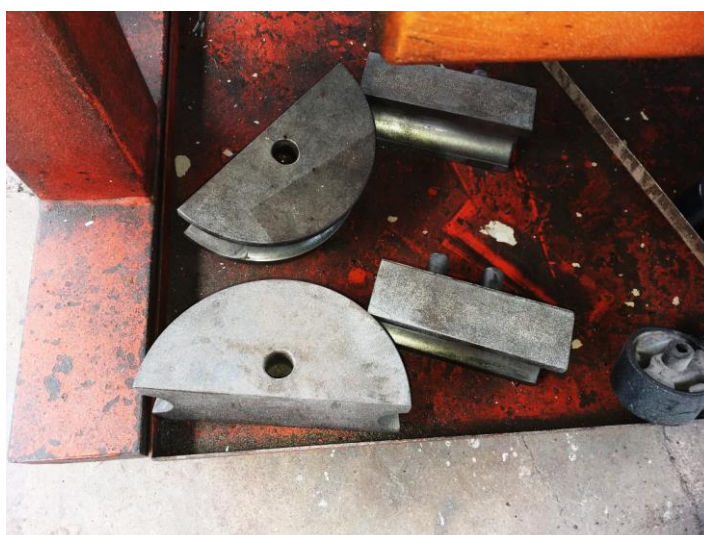
La Figura 109 muestra la trazadora que es utilizada para cortar los tubos acordes a las medidas obtenidas y en la Figura 110 se observa la dobladora hidráulica que ayuda a dar la forma adecuada de diferentes elementos que componen la estructura de seguridad, este último instrumento se utiliza con poleas de diferentes tamaños como se observa en la Figura 111.



**Figura 109.** Cortadora manual



**Figura 110.** Dobladora hidráulica.



**Figura 111.** Poleas de diferentes diámetros.

Después del desmontado de las autopartes del vehículo se procede a tomar las medidas del vehículo en las partes donde van instalados los elementos de la estructura de seguridad para así poder obtener la geometría adecuada como se muestra en la Figura 112, la misma que será armada y soldada en el interior del vehículo.



**Figura 112.** Semiarco lateral

Una vez obtenidos todos los elementos de la estructura de seguridad se procede a preparar las partes de la carrocería interna del vehículo como se muestra en la Figura 113, en donde van ir ubicados los puntos de anclaje de la estructura.



**Figura 113.** Preparación de la carrocería interna del vehículo.

Para realizar el proceso de soldado se utilizó un equipo de suelda MIG 253 como se observan en las Figuras 114 y 115.



**Figura 114.** Modelo de suelda MIG.



**Figura 115.** Equipo completo de suelda MIG.

A continuación, se procede a soldar y armar con suela MIG todos elementos que forman parte del diseño de la estructura de seguridad como se muestran en las Figuras 116, 117 y 118.



**Figura 116.** Proceso de soldadura en las uniones de los elementos de la estructura de seguridad.



**Figura 117.** Tirantes posteriores y refuerzos soldados a la parte superior de la suspensión posterior.



**Figura 118.** Puntos de anclaje soldados a la carrocería interna del vehículo.

Terminado los procesos de soldadura y armado de todos los elementos de la estructura de seguridad se procede a empapelar el vehículo para poder pintar su parte interior, tal como se muestran en las Figuras 119 y 120.



**Figura 119.** Empapelado de la parte exterior del vehículo.



**Figura 120.** Vista lateral del empapelado del vehículo.

Después del proceso de empapelado se procede a pintar con esmalte blanco automotriz para una larga duración y protección de oxidación de la estructura, como se muestran en la Figura 121 y 122.



**Figura 121.** Pintado del interior del vehículo y la estructura de la jaula de seguridad.





**Figura 122.** Vista frontal del pintado de la estructura d seguridad.

Una vez pintada la jaula de seguridad y el interior del vehículo se procede a armar todas las autopartes y sistemas que fueron desmontadas del vehículo como se muestran en las Figuras 123, 124 y 125.



**Figura 123.** Autopartes colocadas nuevamente en el vehículo.



**Figura 124.** Tablero, volante y asientos de rally.



**Figura 125.** Sistema eléctrico y de transmisión.

Debido a que Mecánica Miranda cuenta con certificación internacional FIA, las jaulas de seguridad que se construyan en este lugar son homologadas por lo que deberán portar una placa identificativa en una parte visible de la estructura como se muestra en la Figura 126. Dicha placa deberá portar el nombre del constructor, el número de homologación del ADN y el número de serie único del fabricante.



**Figura 126.** Placa de identificación de la jaula de seguridad homologada.

Al final se obtiene un vehículo de competición modalidad rally que tiene todos los sistemas de seguridad instalados como se muestran en las Figuras 127, 128 y 129.



**Figura 127.** Hyundai Grand i10 con jaula de seguridad instalada.



**Figura 128.** Sistema de ventilación instalada en el techo.



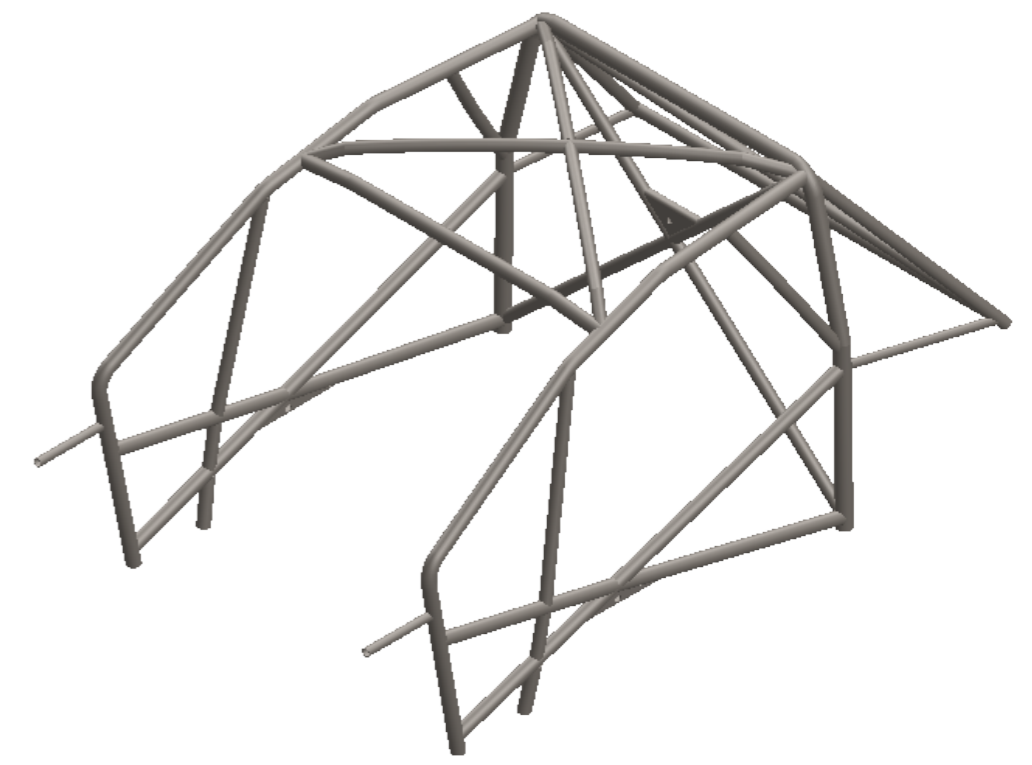
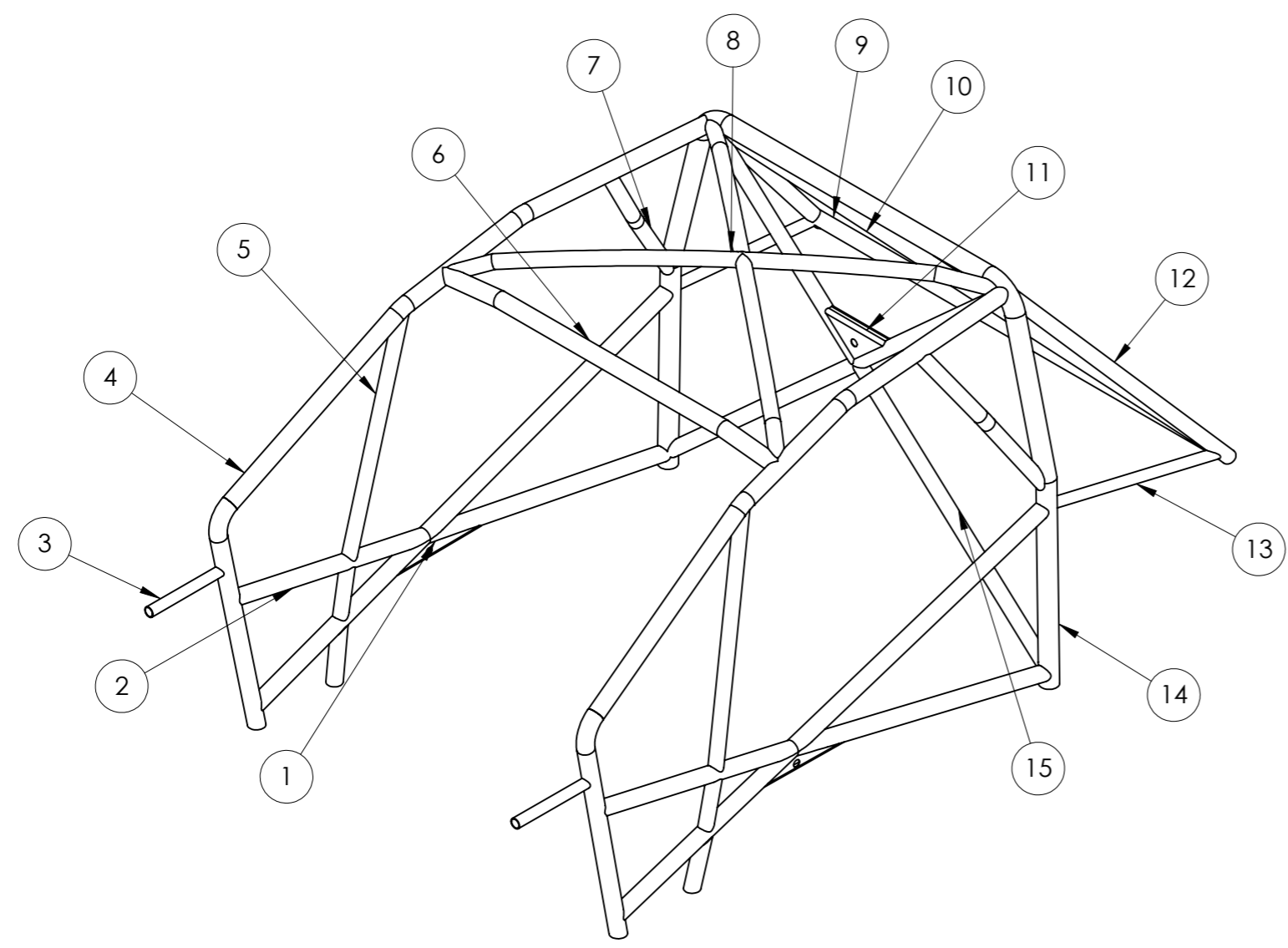
**Figura 129.** Sistema de cortafuego y cortacorriente.

Anexo 2

# PLANOS

1 2 3 4 5 6 7 8

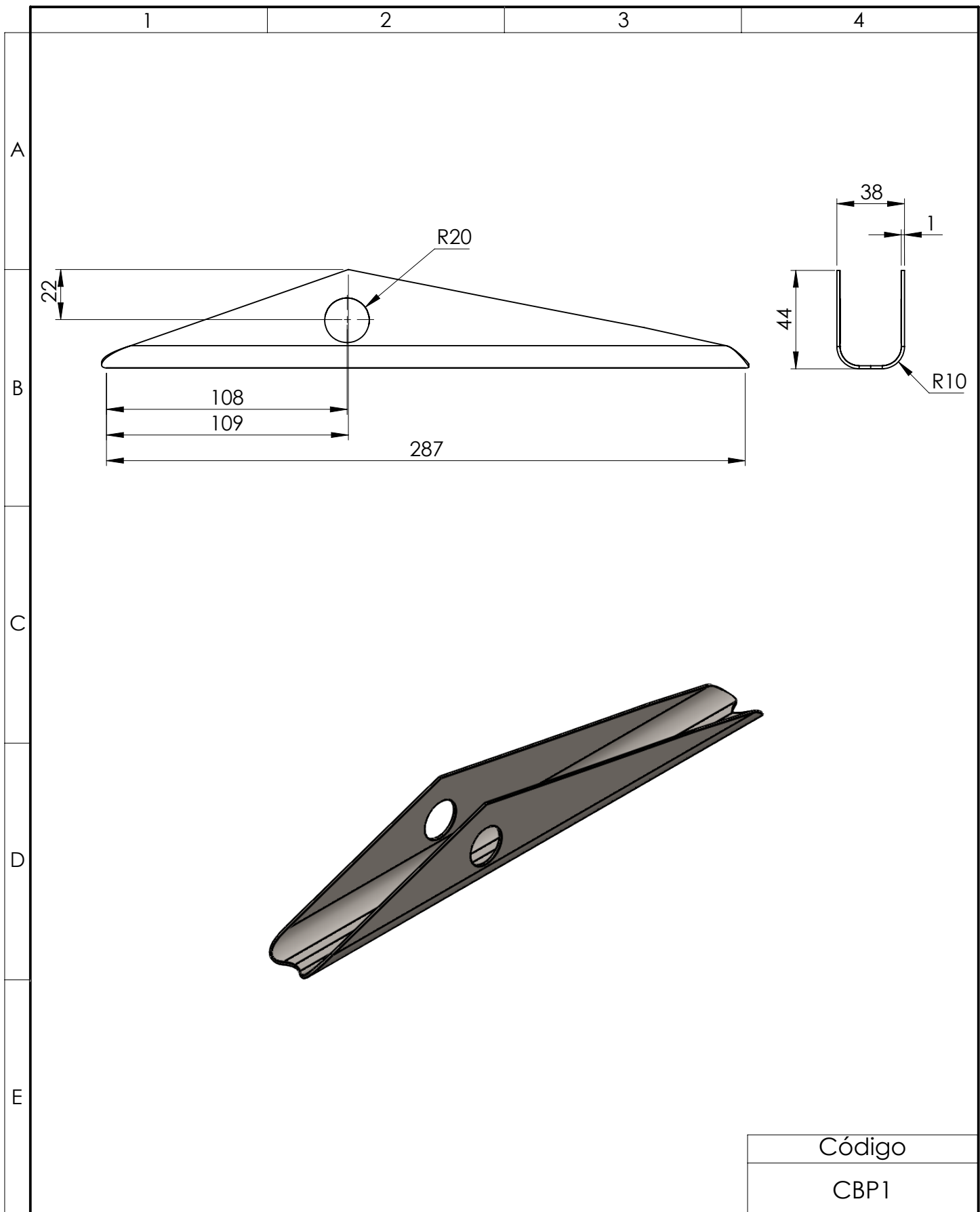
A  
B  
C  
D  
E  
F



N°	Denominación	Cantidad
1	Cartela de las barras de puertas	2
2	Barras de puertas	4
3	Refuerzo del punto de anclaje de la suspensión delanterá	2
4	Semiarco Lateral	2
5	Pilar de parabrisas	2
6	Tirante transversal del techo	1
7	Refuerzo de ángulos o uniones	2
8	Refuerzo del techo	2
9	Tirante transversal de los tirantes posteriores	1
10	Tirante diagonal de los tirantes posteriores	1
11	Cartela de los tirantes diagonales del arco principal	1
12	Tirante posterior	2
13	Refuerzo del punto de anclaje de la suspensión posterior	2
14	Arco principal	1
15	Tirante diagonal del arco principal	2

Tolerancia: $\pm 1$		Peso: 51399.52 gr	Material: ACERO ASTM A500 GR. A	
Fecha: 04/03/2022		Nombre: Edison Caguana	Denominación: JAULA DE SEGURIDAD	
Revisó: 04/03/2022		Ing. César Arroba		Escala: 1:15
Aprobó: 04/03/2022		Ing. César Arroba		REGISTRO:
U.T.A		Número de Lámina: 1 de 21		
INGENIERÍA MECÁNICA		(Sustitución)		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	

1 2 3 4



Código
CBP1

				Tolerancia: ±1	Peso: 217.67 gr	Material: ACERO ASTM A36	
				Fecha	Nombre	Denominación: <b>CARTELA DE LAS BARRAS DE PUERTAS</b>	Escala: 1:2.5
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana		
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba	Número de Lámina: 2 de 21	Registro:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	U.T.A INGENIERÍA MECÁNICA		(Sustitución)	

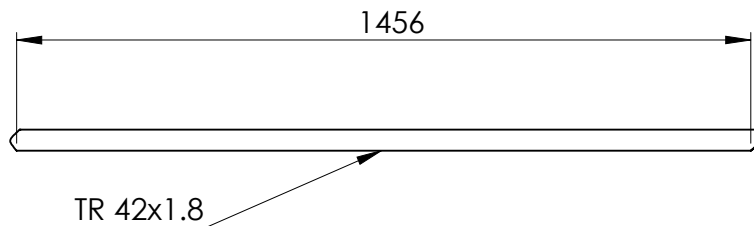
1

2

3

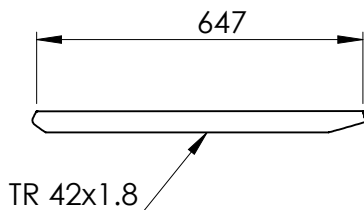
4

A

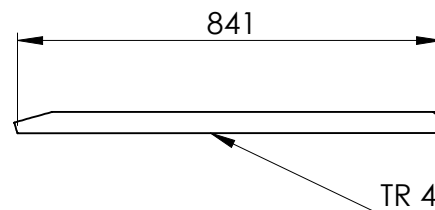


BARRA DE PUERTAS 1

B



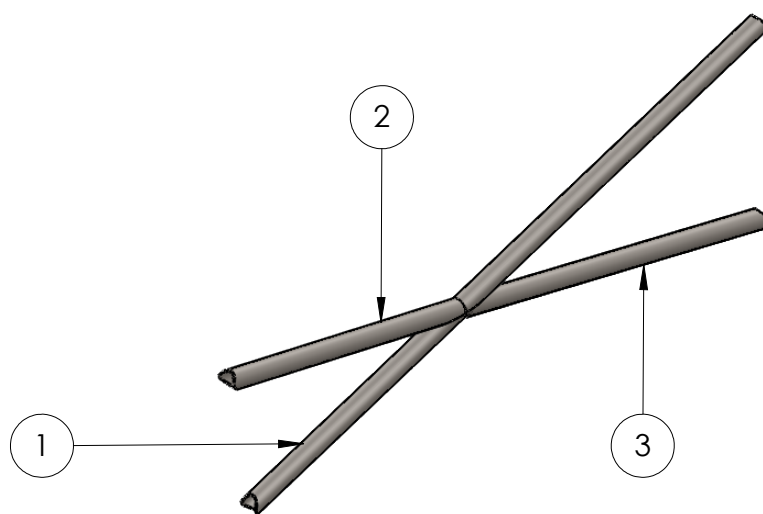
BARRA DE PUERTAS 2



BARRA DE PUERTAS 3

C

D

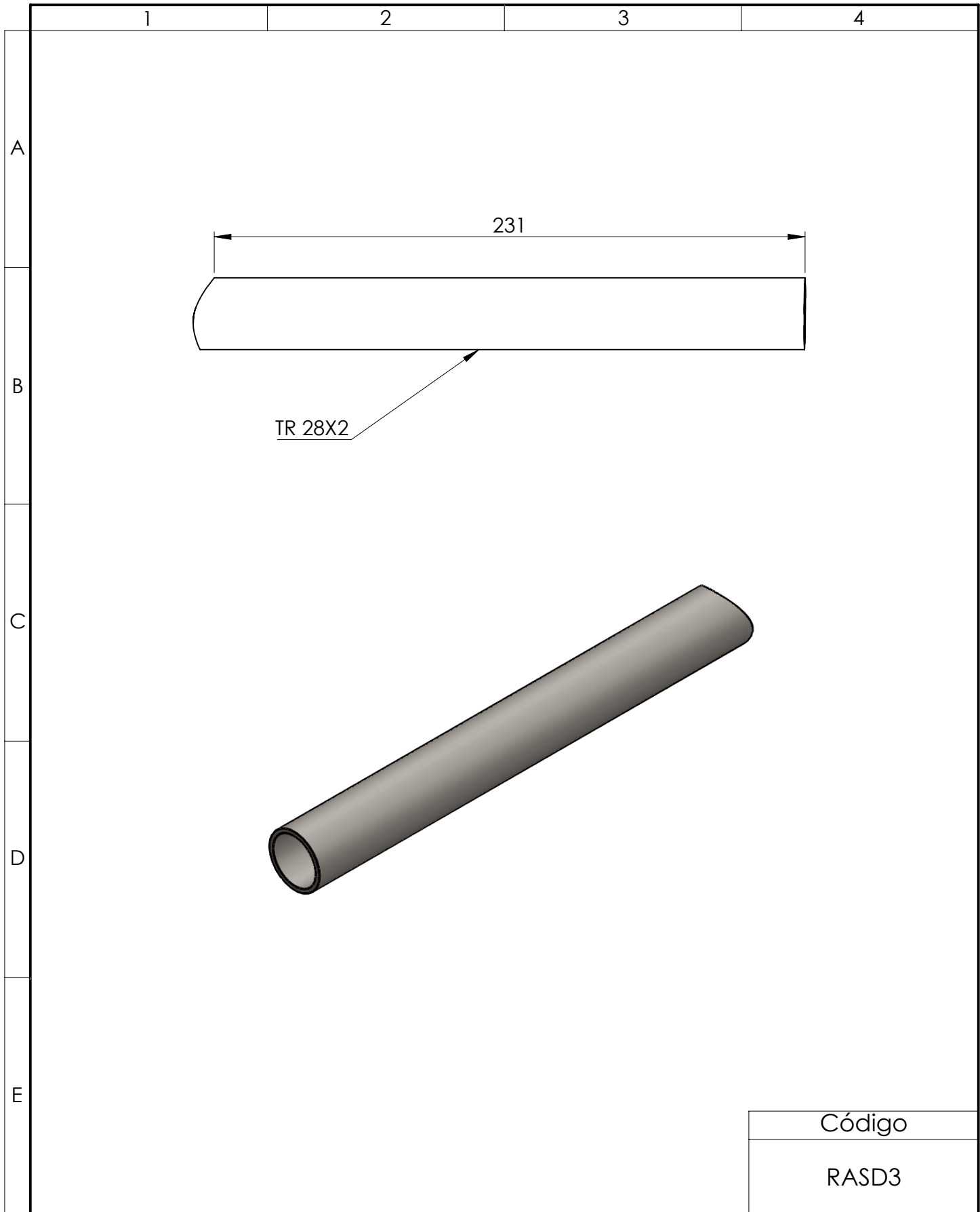


E

Nº	Denominación	Código
1	Barra de puertas 1	BP1-3
2	Barra de puertas 2	BP2-3
3	Barra de puertas 3	BP3-3

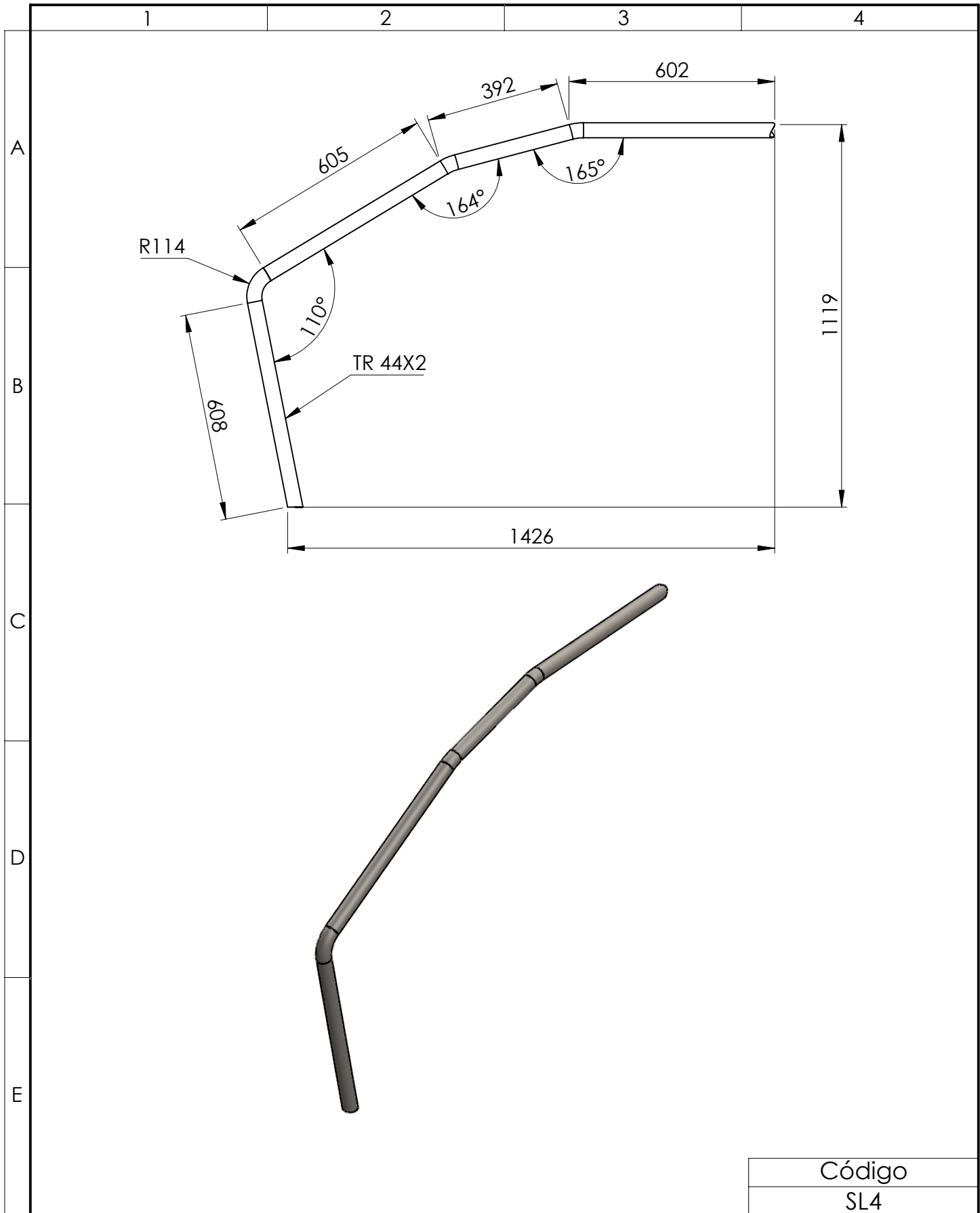
				Tolerancia: $\pm 1$	Peso: 5201.32 gr	Material: ACERO ASTM A500 GR.A	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	BARRAS DE PUERTAS	1:15
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				<b>U.T.A</b>		Número de Lámina:	Registro:
				INGENIERÍA MECÁNICA		3 de 21	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	





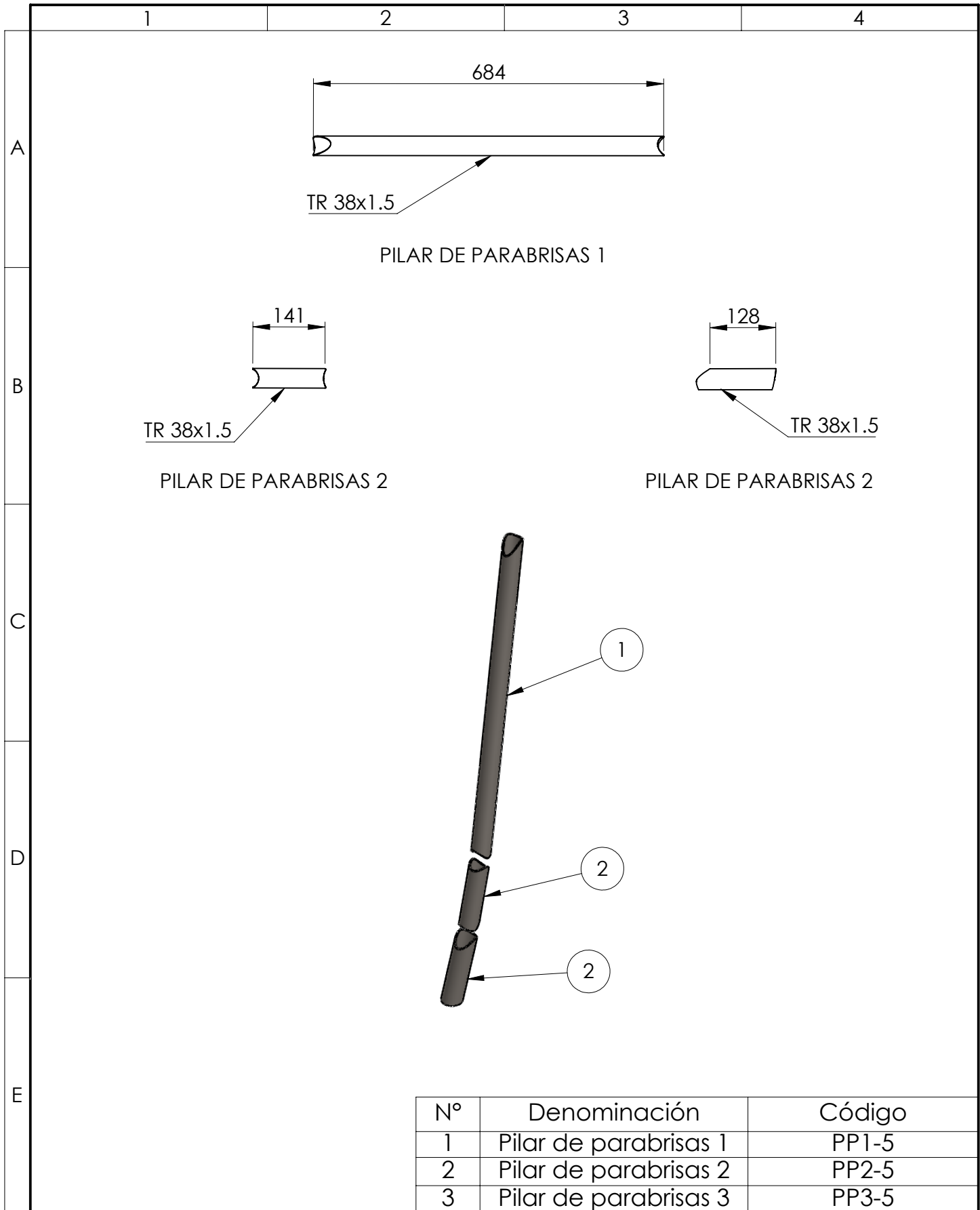
Código
RASD3

				Tolerancia:	Peso:	Material:			
				±1	302.24 gr	ACERO ASTM A500 GR.A			
				Fecha	Nombre	Denominación:			Escala:
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	REFUERZO DEL PUNTO DE ANCLAJE DE LA SUSPENSIÓN DELANTERA			1:2
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba				
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba				
				<b>U.T.A</b>		Número de Lámina:			Registro:
				INGENIERÍA MECÁNICA		4 de 21			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)			



Código
SL4

				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				±1	4744.71 gr	ACERO ASTM A500 GR.A	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	SEMIARCO LATERAL	1:15
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				U.T.A		Número de Lámina:	Registro:
						INGENIERÍA MECÁNICA	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



N°	Denominación	Código
1	Pilar de parabrisas 1	PP1-5
2	Pilar de parabrisas 2	PP2-5
3	Pilar de parabrisas 3	PP3-5

				Tolerancia: $\pm 1$	Peso: 1277.32 gr	Material: ACERO ASTM A500 GR.A	
				Fecha	Nombre	Denominación: PILAR DEL PARABRISAS	Escala: 1:10
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana		
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba	Número de Lámina: 6 de 21	Registro:
				<b>U.T.A</b>			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERÍA MECÁNICA		(Sustitución)	

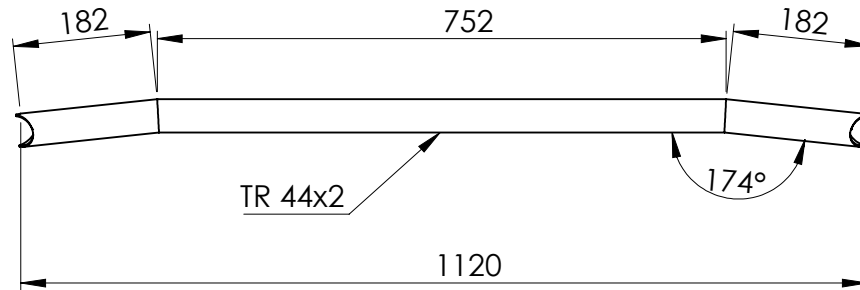
1

2

3

4

A

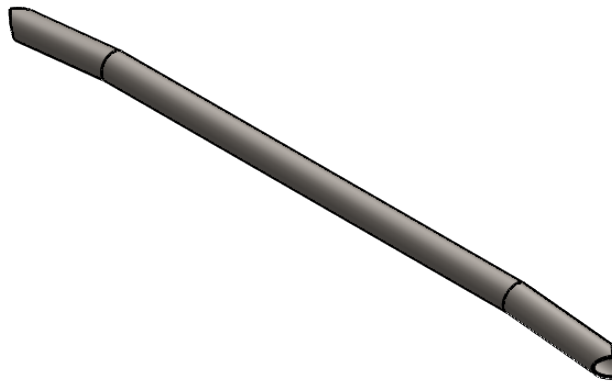


B

C

D

E



Código

TTT6

				Tolerancia:	Peso:	Material:			
				±1	2268.46 gr	ACERO ASTM A500 GR.A			
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:		
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana			TIRANTE TRANSVERSAL DEL TECHO	1:10
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba				
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba	Número de Lámina:	Registro:		
				<b>U.T.A</b>		7 de 21			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERÍA MECÁNICA		(Sustitución)			

1

2

3

4

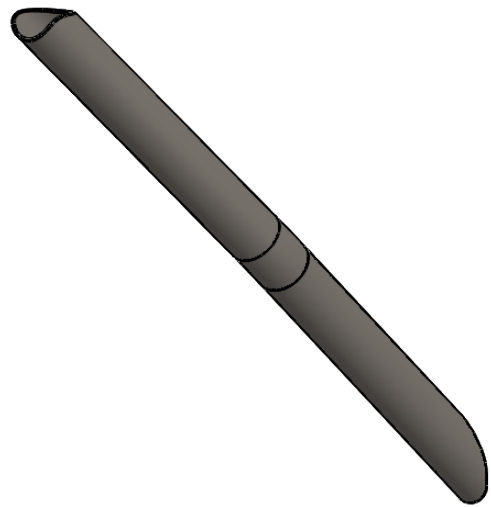
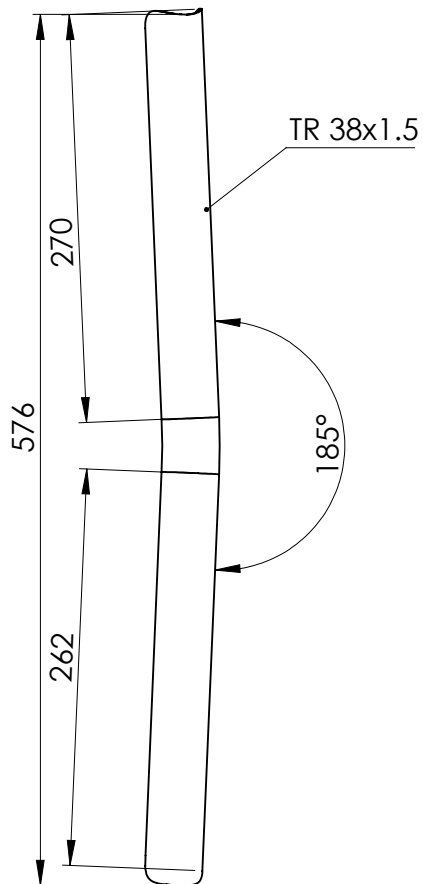
A

B

C

D

E



Código

RA7

				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				±1	740.79 gr	ACERO ASTM A500 GR.A	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
			Dibujó:	04/03/2022	Edisson Caguana		
			Revisó:	04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó:	04/03/2022	Ing. César Arroba	1:5
				<b>U.T.A</b>		Número de Lámina:	
				<b>INGENIERÍA MECÁNICA</b>		8 de 21	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	

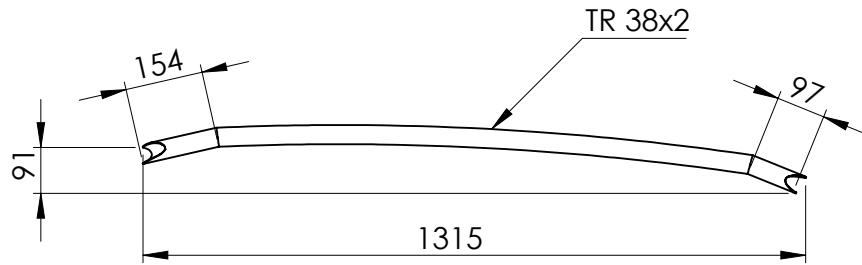
1

2

3

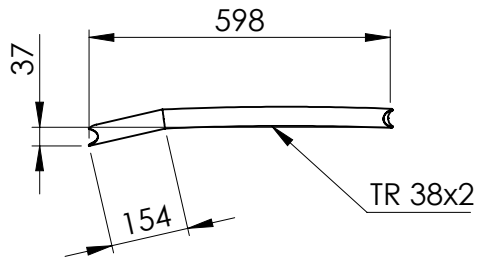
4

A

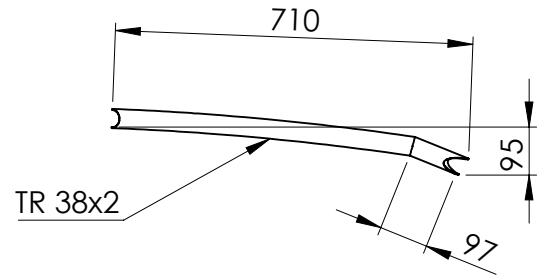


REFUERZO DE TECHO 1

B



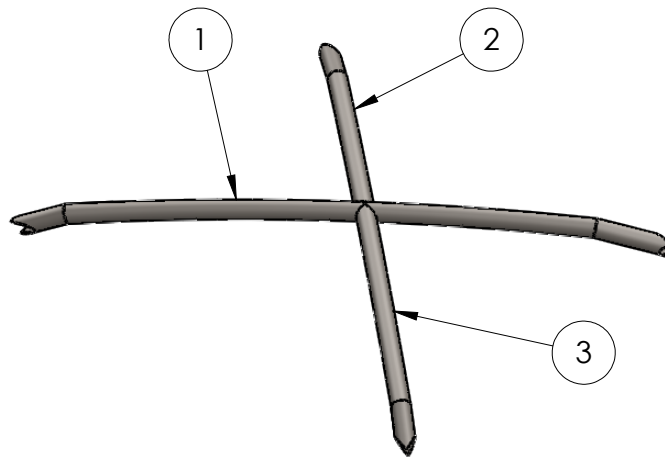
REFUERZO DE TECHO 2



REFUERZO DE TECHO 3

C

D



E

N°	Denominación	Código
1	Refuerzo de techo 1	RT1-8
2	Refuerzo de techo 2	RT2-8
3	Refuerzo de techo 3	RT3-8

				Tolerancia: $\pm 1$	Peso: 4501.13 gr	Material: ACERO ASTM A500 GR.A	
				Fecha	Nombre	Denominación: REFUERZO DEL TECHO	Escala: 1:15
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	Número de Lámina: 9 de 21	Registro:
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	U.T.A		(Sustitución)	
				INGENIERÍA MECÁNICA			

1

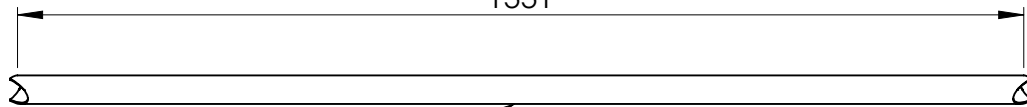
2

3

4

A

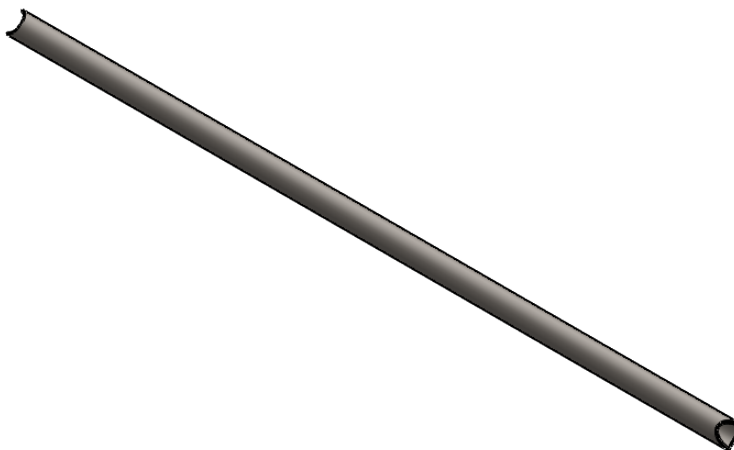
1331



TR 38x2

B

C



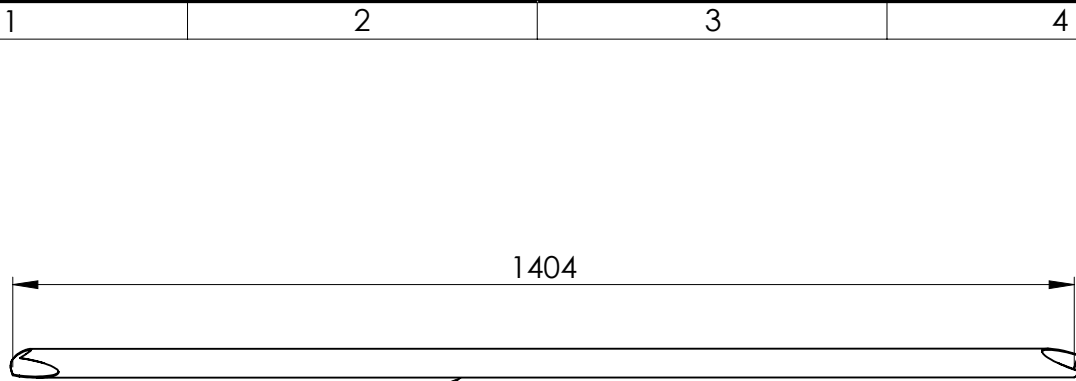
D

E

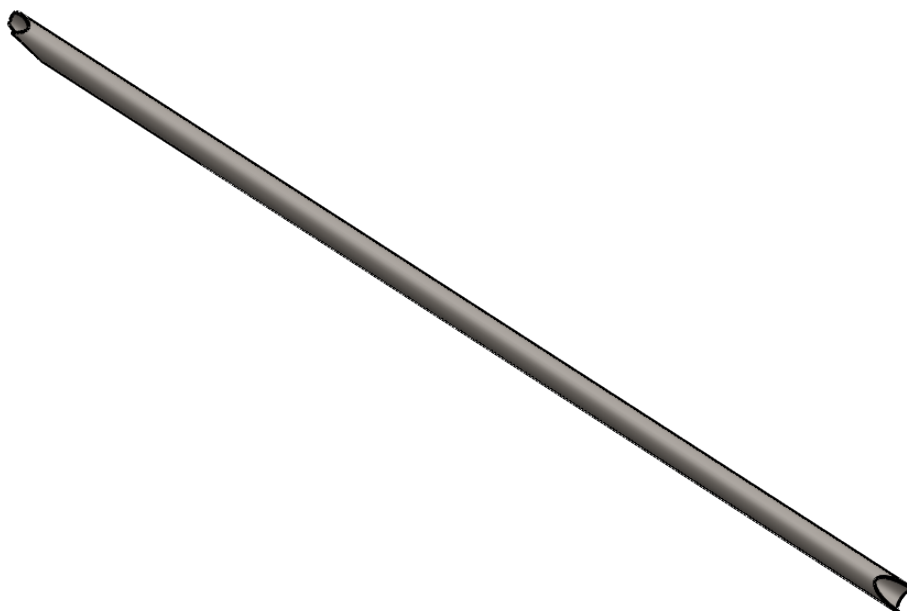
Código

TTTP9

				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				±1	2353.48 gr	ACERO ASTM A500 GR.A	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	TIRANTE TRANSVERSAL DE LOS TIRANTES POSTERIORES	1:10
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				U.T.A		Número de Lámina:	Registro:
						INGENIERÍA MECÁNICA	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



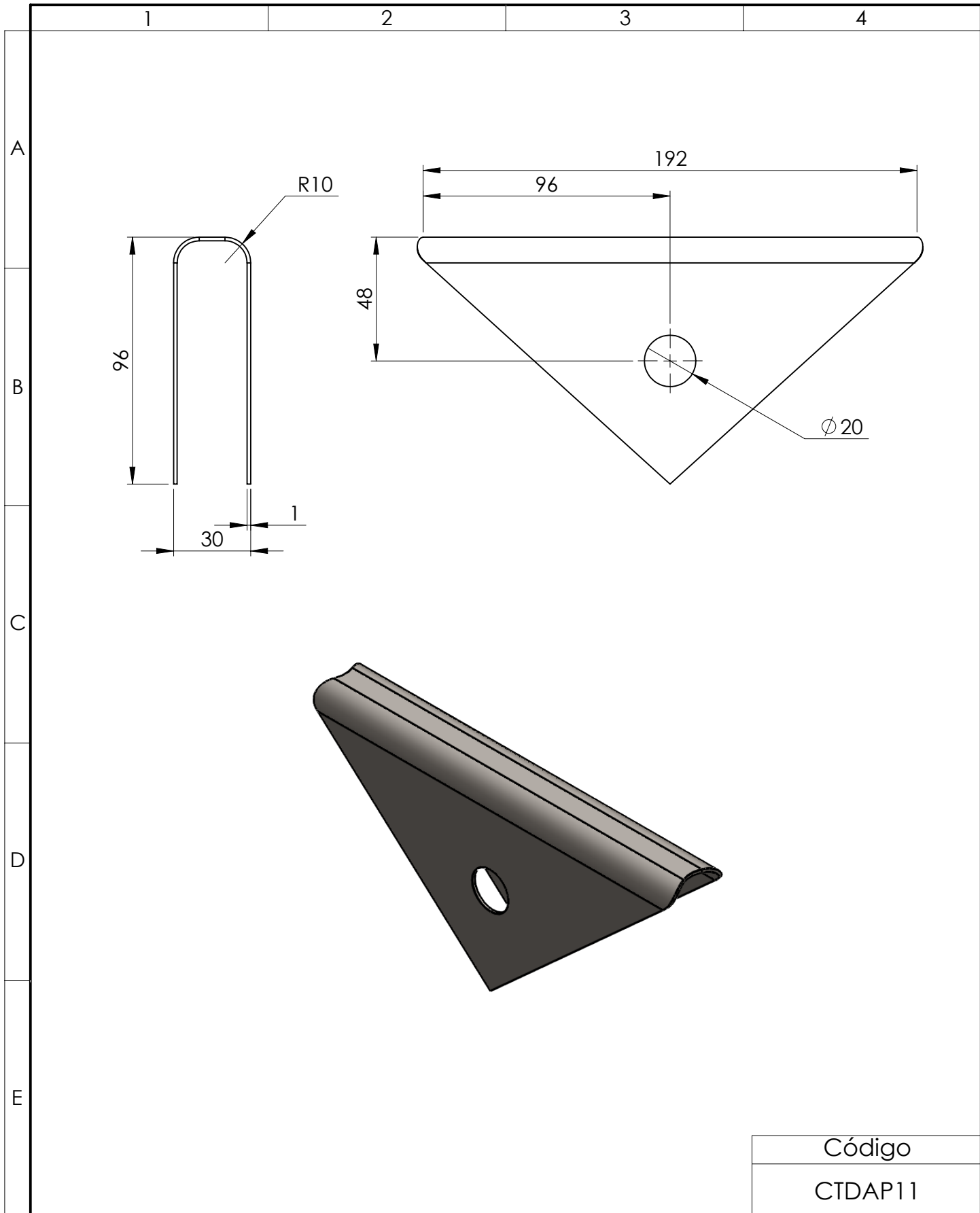
TR 38x1.5



Código
TDTP10

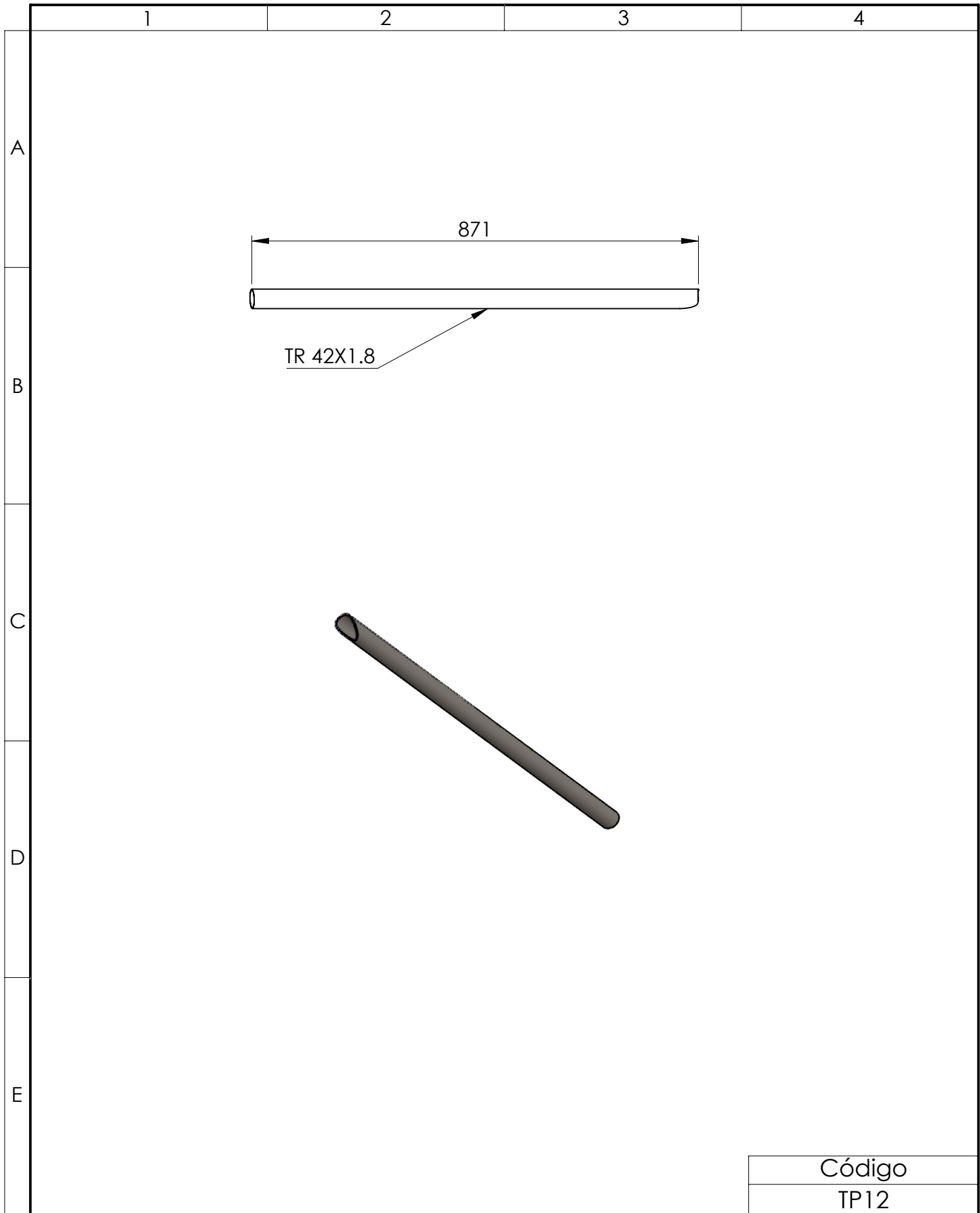
				Tolerancia: ±1	Peso: 1850.00 gr	Material: ACERO ASTM A500 GR.A	
				Fecha	Nombre	Denominación: TIRANTE DIAGONAL DE LOS TIRANTES POSTERIORES	Escala: 1:10
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana		
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba	Número de Lámina: 11 de 22	Registro:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	U.T.A INGENIERÍA MECÁNICA			





Código
CTDAP11

				Tolerancia: $\pm 1$	Peso: 256.43gr	Material: ACERO ASTM A36	
				Fecha	Nombre	Denominación: CARTELA DE LOS TIRANTES DIAGONALES DEL ARCO PRINCIPAL	Escala: 1:2
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana		
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba	Número de Lámina: 12 de 21	Registro:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	U.T.A INGENIERÍA MECÁNICA		(Sustitución)	



Código
TP12

				Tolerancia:	Peso:	Material:			
				±1	1377.21 gr	ACERO ASTM A500 GR.A			
					Fecha	Nombre	Denominación:		Escala:
				Dibujó:	04/03/2022	Edisson Caguana	TIRANTE POSTERIOR		1:10
				Revisó:	04/03/2022	Ing. César Arroba			
				Aprobó:	04/03/2022	Ing. César Arroba			
				<b>U.T.A</b>			Número de Lámina:		Registro:
				INGENIERÍA MECÁNICA			13 de 21		(Sustitución)
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						

1

2

3

4

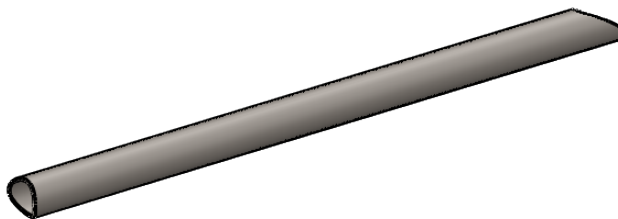
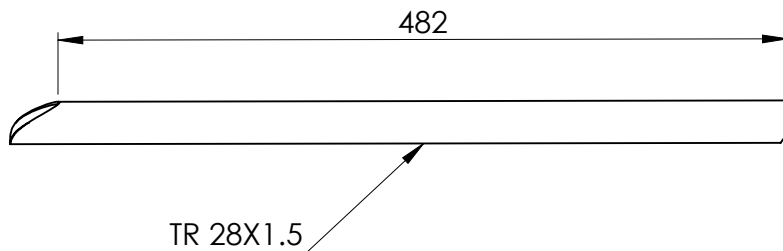
A

B

C

D

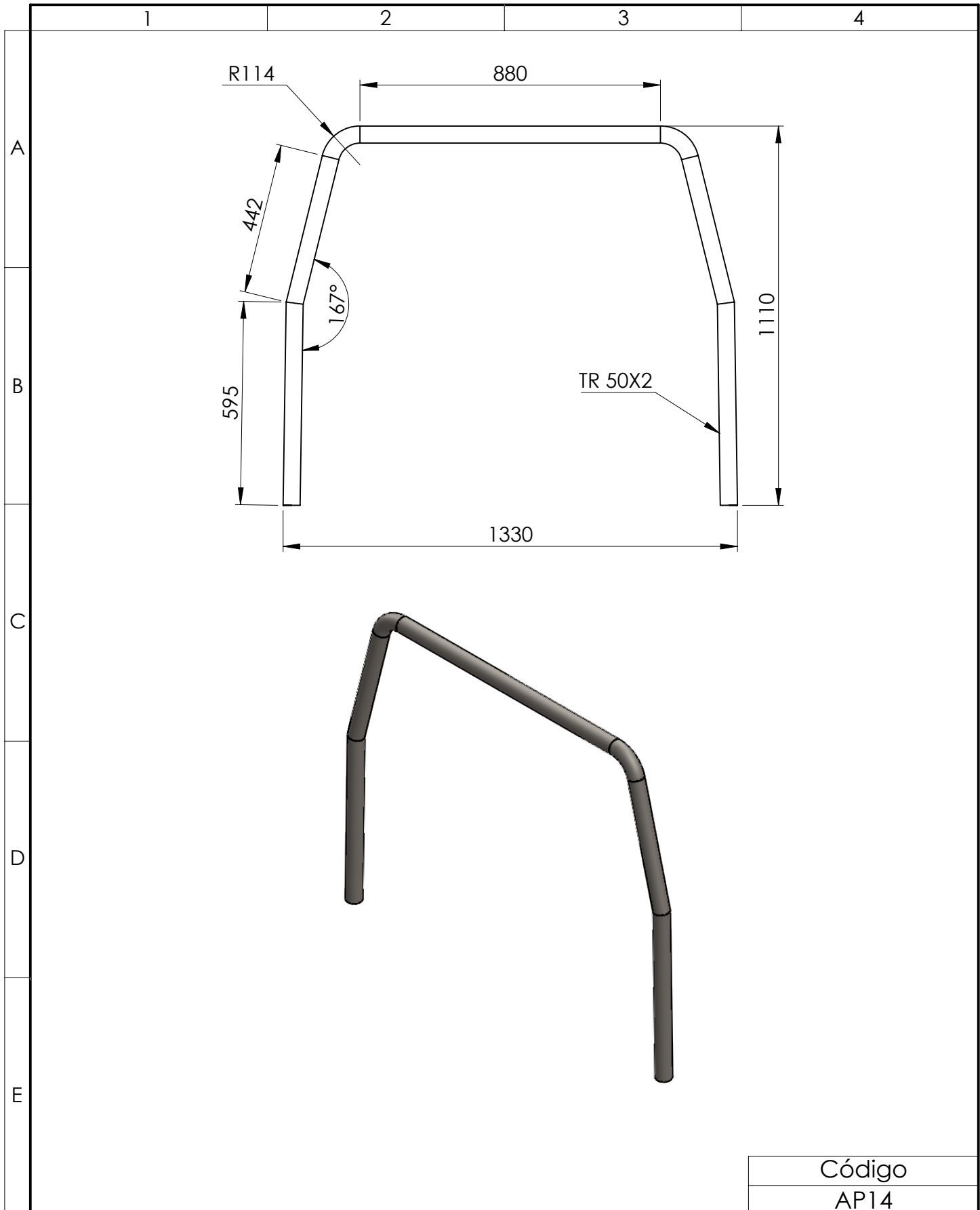
E



Código

RASP13

				Tolerancia: $\pm 1$	Peso: 492.18 gr	Material: ACERO ASTM A500 GR.A	
				Fecha	Nombre	Denominación: REFUERZO DEL PUNTO DE ANCLAJE DE LA SUSPENSIÓN POSTERIOR	Escala: 1:5
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana		
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba	Número de Lámina: 14 de 21	Registro: 
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	U.T.A INGENIERÍA MECÁNICA			



Código
AP14

				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				±1	7520.30 gr	ACERO ASTM A500 GR.A	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	ARCO PRINCIPAL	1:15
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
				U.T.A		Número de Lámina:	Registro:
						INGENIERÍA MECÁNICA	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	

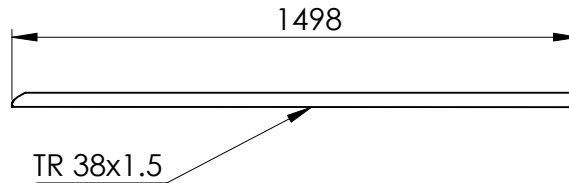
1

2

3

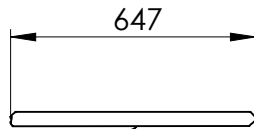
4

A



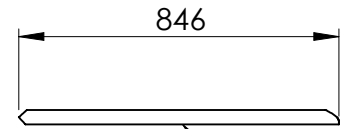
TIRANTE DIAGONAL DEL ARCO PRINCIPAL 1

B



TR 38x1.5

TIRANTE DIAGONAL DEL ARCO PRINCIPAL 1

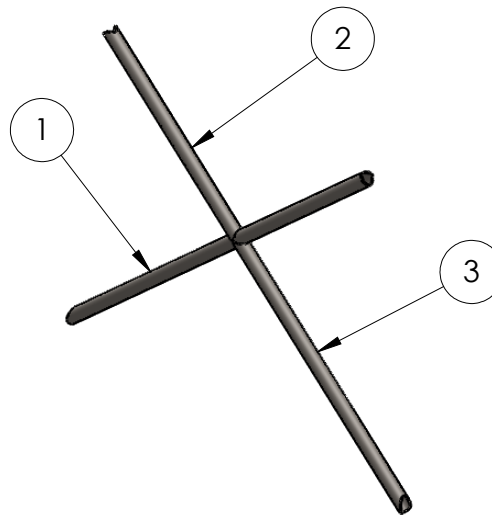


TR 38x1.5

TIRANTE DIAGONAL DEL ARCO PRINCIPAL 2

C

D



E

N°	Denominación	Código
1	Tirante diagonal del arco principal 1	TDAP1-15
2	Tirante diagonal del arco principal 2	TDAP2-15
3	Tirante diagonal del arco principal 3	TDAP3-15

Tolerancia: Peso:

±1

3963.81 gr

Material:

ACERO ASTM A500 GR.A

Fecha	Nombre
Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana
Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba
Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba

Denominación:

TIRANTES DIAGONALES DEL  
ARCO PRINCIPAL

Escala:

1:20

U.T.A

Número de Lámina:

16 de 21

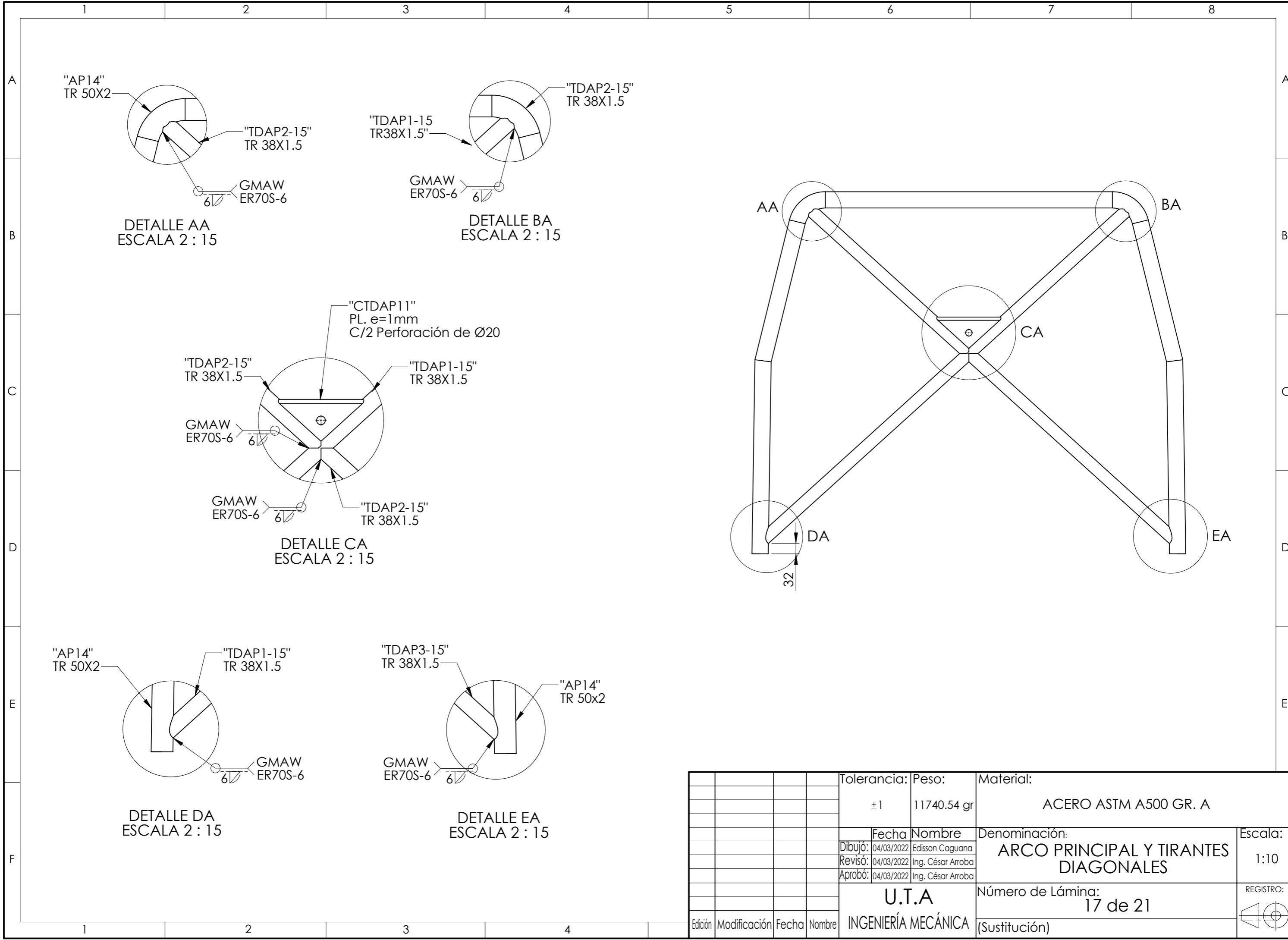
Registro:

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

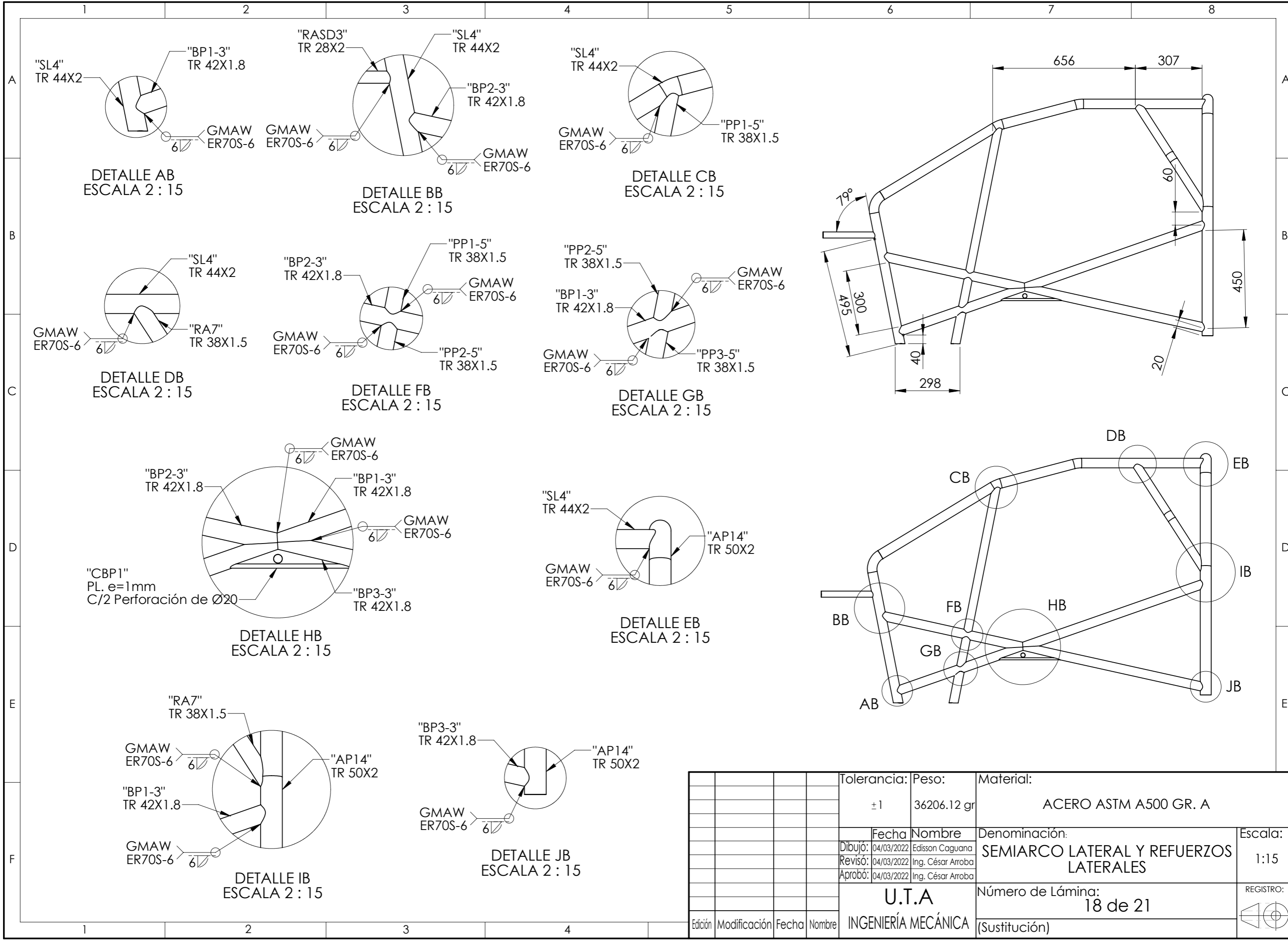
INGENIERÍA MECÁNICA

(Sustitución)





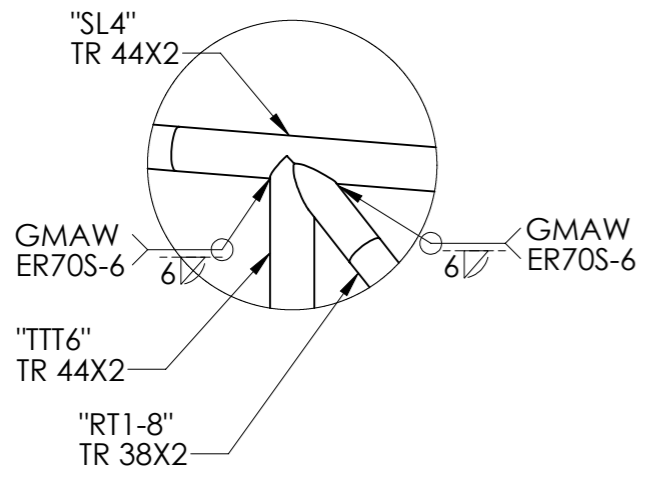
Tolerancia: $\pm 1$		Peso: 11740.54 gr		Material: ACERO ASTM A500 GR. A	
Fecha: 04/03/2022		Nombre: Edison Caguana		Denominación: ARCO PRINCIPAL Y TIRANTES DIAGONALES	
Revisó: 04/03/2022		Ing. César Arroba		Escala: 1:10	
Aprobó: 04/03/2022		Ing. César Arroba		Número de Lámina: 17 de 21	
U.T.A INGENIERÍA MECÁNICA				REGISTRO:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	(Sustitución)	



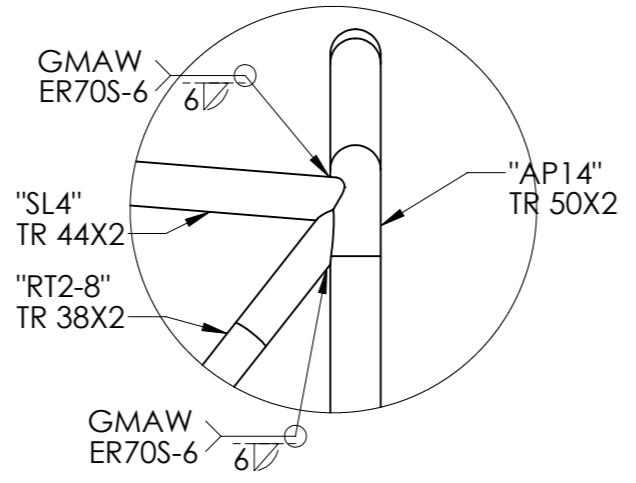
Tolerancia:	Peso:	Material:
±1	36206.12 gr	ACERO ASTM A500 GR. A
Fecha	Nombre	Denominación:
Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	SEMIARCO LATERAL Y REFUERZOS LATERALES
Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba	Escala: 1:15
Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba	Número de Lámina: 18 de 21
U.T.A		REGISTRO:
INGENIERÍA MECÁNICA		(Sustitución)

1 2 3 4 5 6 7 8

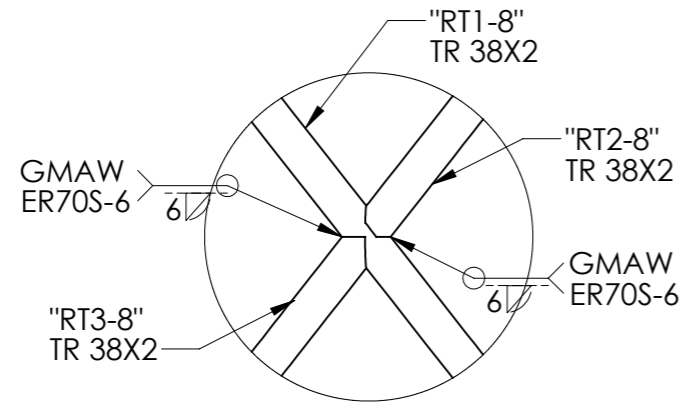
A  
B  
C  
D  
E  
F



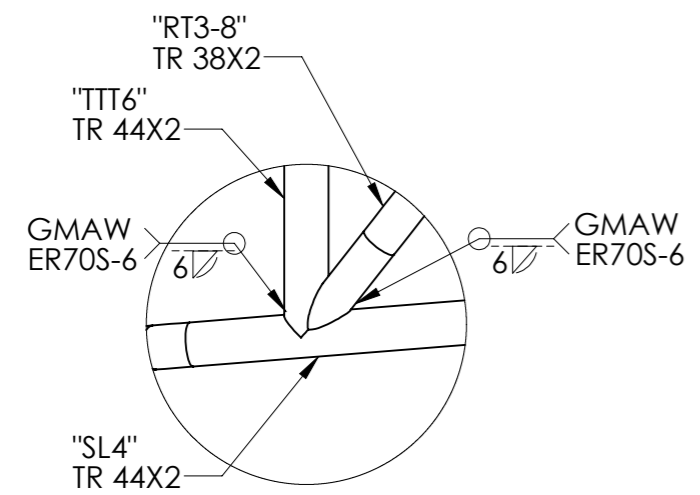
DETALLE AC  
ESCALA 2 : 15



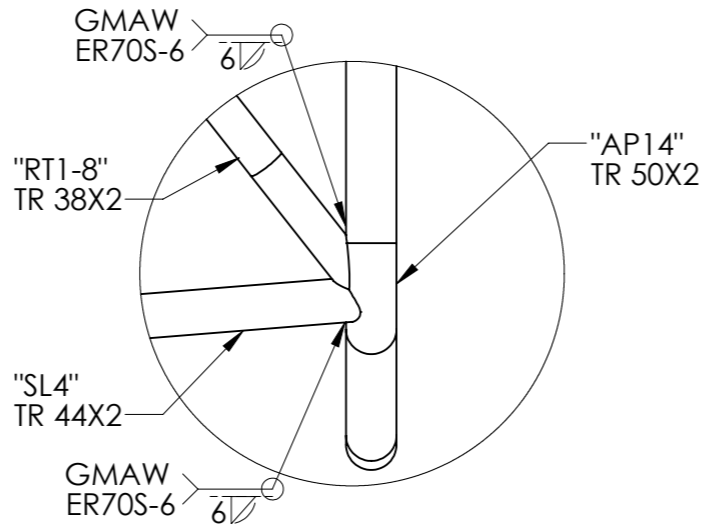
DETALLE BC  
ESCALA 2 : 15



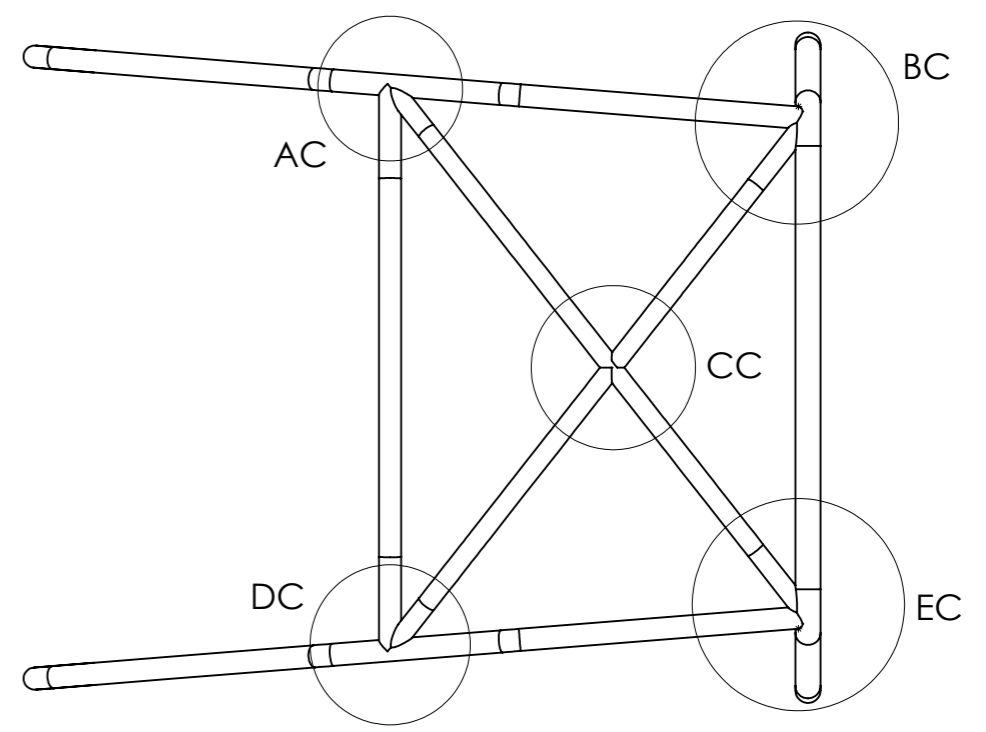
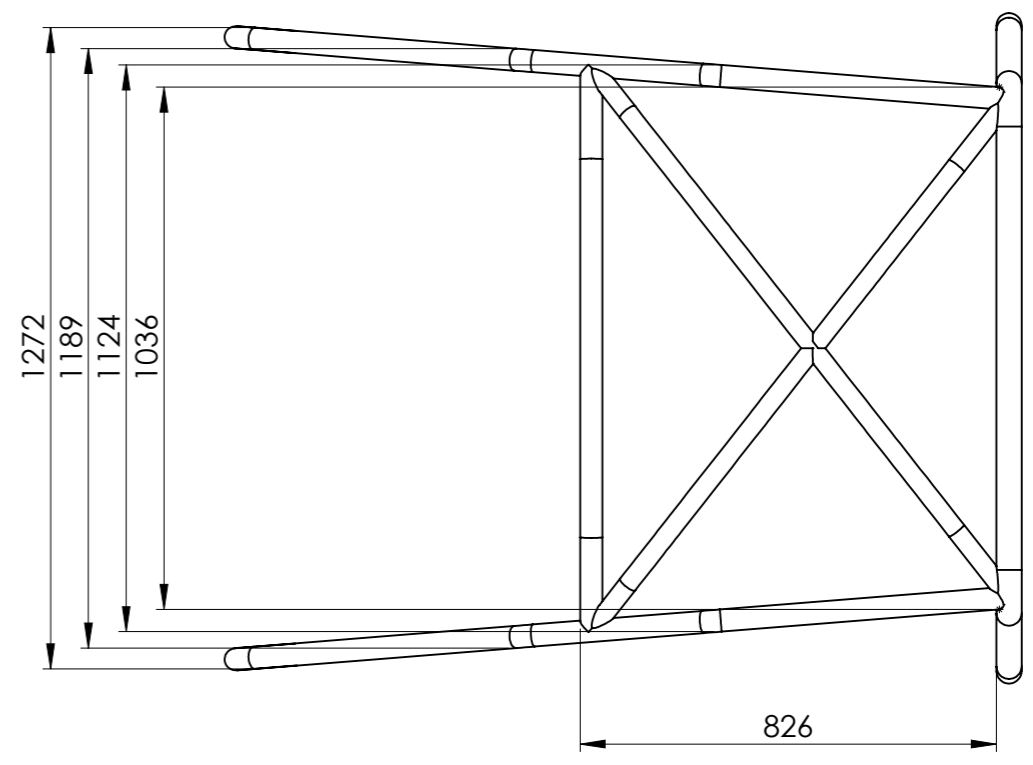
DETALLE CC  
ESCALA 2 : 15



DETALLE DC  
ESCALA 2 : 15



DETALLE EC  
ESCALA 2 : 15



		Tolerancia:	Peso:	Material:	
		±1	23780.20 gr	ACERO ASTM A500 GR. A	
		Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
		Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	SEMIARCO LATERAL Y REFUERZOS DEL TECHO	1:15
		Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
		Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba		
		U.T.A		Número de Lámina:	REGISTRO:
		INGENIERÍA MECÁNICA		19 de 21	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	(Sustitución)	

1 2 3 4



1

2

3

4

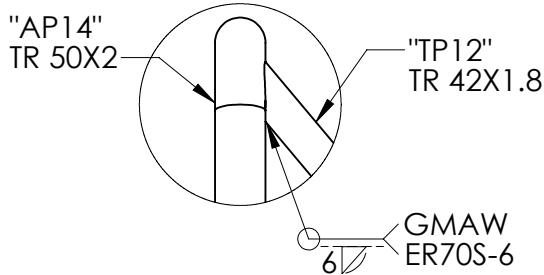
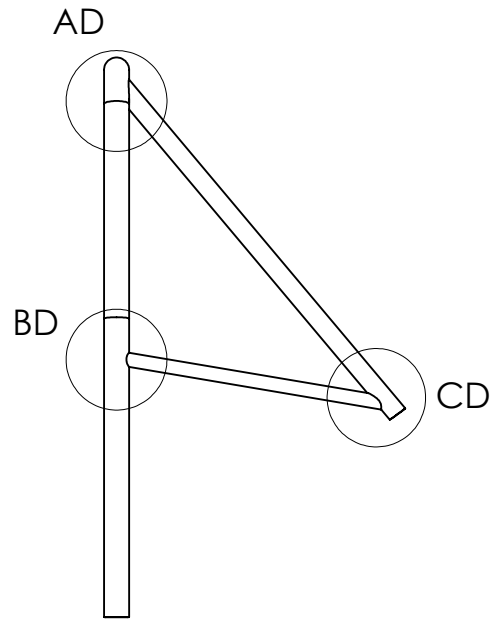
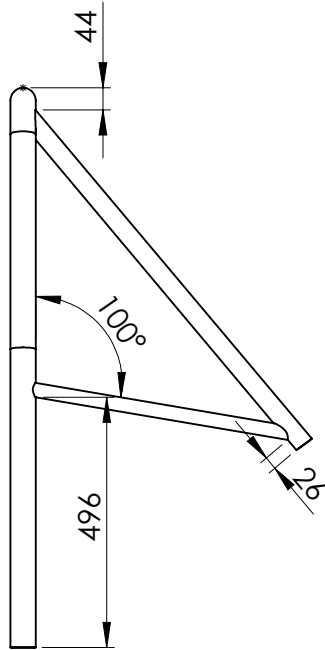
A

B

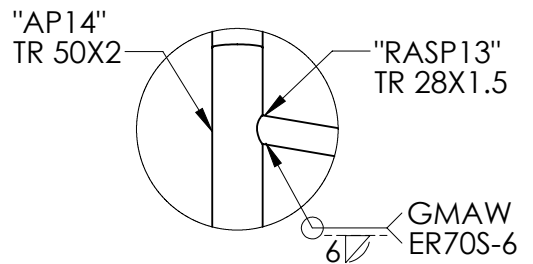
C

D

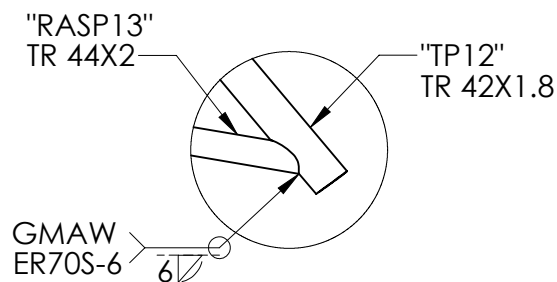
E



DETALLE AD  
ESCALA 2 : 15

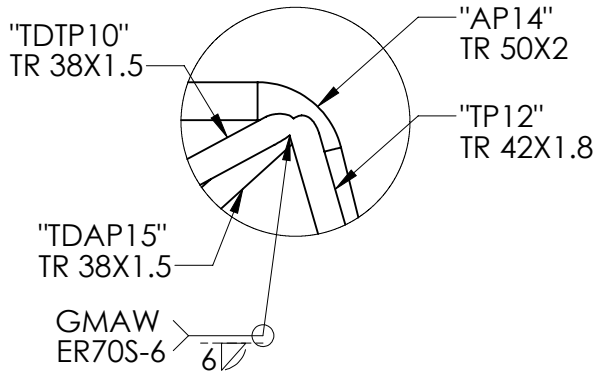
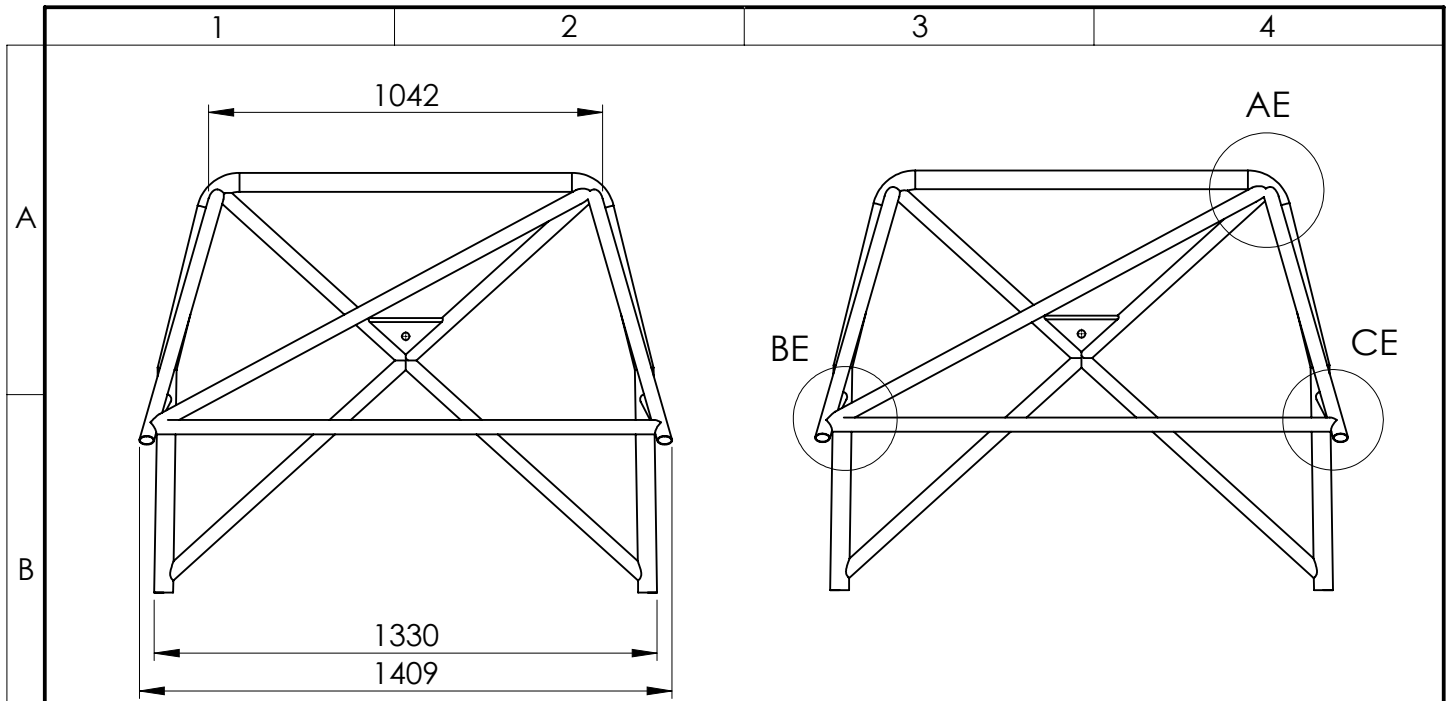


DETALLE BD  
ESCALA 2 : 15

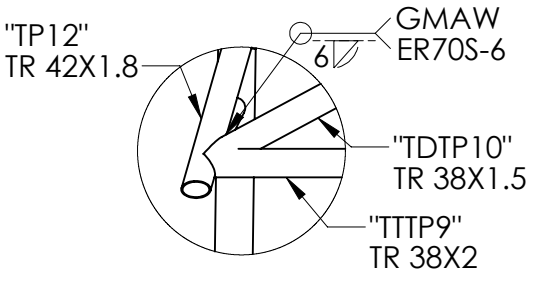


DETALLE CD  
ESCALA 2 : 15

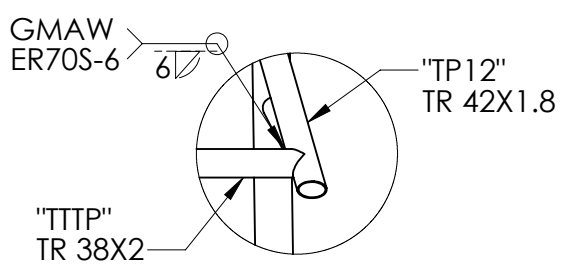
				Tolerancia:	Peso:	Material:		
				±1		ACERO ASTM A500 GR.A		
				Fecha	Nombre	Denominación:		Escala:
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	ARCO PRINCIPAL Y		1:15
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba	REFUERZOS POSTERIORES 1		
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba			
				U.T.A		Número de Lámina:		Registro:
				INGENIERÍA MECÁNICA		20 de 21		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)		



DETALLE AE  
ESCALA 1 : 10



DETALLE BE  
ESCALA 1 : 10



DETALLE CE  
ESCALA 1 : 10

				Tolerancia: $\pm 1$	Peso:	Material: ACERO ASTM A500 GR.A			
				Fecha	Nombre	Denominación: ARCO PRINCIPAL Y REFUERZOS POSTERIORES 2			Escala: 1:20
				Dibujó: 04/03/2022	Edisson Caguana	Número de Lámina: 21 de 21			Registro: 
				Revisó: 04/03/2022	Ing. César Arroba				
				Aprobó: 04/03/2022	Ing. César Arroba				
				<b>U.T.A</b>		(Sustitución)			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERÍA MECÁNICA					