



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Proyecto de Investigación previo a
la obtención del título de Ingeniero
Mecánico

Título de Proyecto de Investigación:

**“ANÁLISIS FUNCIONAL DE LA ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN EN CASO
DE VUELCO EN CABINAS DE TRACTORES AGRÍCOLAS CATEGORÍA T1
POR MEDIO DE SIMULACIÓN FEM”**

Autor:

Ariel Eduardo Avila Romero

Director de Proyecto de investigación:

Ing. Diego Javier Punina Guerrero

Quevedo – Los Ríos – Ecuador

2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Ariel Eduardo Avila Romero**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

f. _____

Ariel Eduardo Avila Romero

C.C. # 1311193377

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Diego Javier Punina Guerrero** , Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante Ariel Eduardo Avila Romero, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**ANÁLISIS FUNCIONAL DE LA ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN EN CASO DE VUELCO EN CABINAS DE TRACTORES AGRÍCOLAS CATEGORÍA T1 POR MEDIO DE SIMULACIÓN FEM**”, previo a la obtención del título de **Ingeniero Mecánico**, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.



.....

Ing. Diego Javier Punina Guerrero
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

Por medio de la presente me permito certificar, que el **Sr. ARIEL EDUARDO AVILA ROMERO**, egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica, una vez revisada la tesis de grado titulada “**ANÁLISIS FUNCIONAL DE LA ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN EN CASO DE VUELCO EN CABINAS DE TRACTORES AGRÍCOLAS CATEGORÍA T1 POR MEDIO DE SIMULACIÓN FEM**”, tengo a bien informar que se realizó la revisión respectiva por medio del sistema Urkund, con un porcentaje favorable del 2%, cumpliendo con el reglamento de Graduación de Estudiantes de Pregrado y la Normativa establecida por la Universidad.

Se adjunta el resultado del sistema URKUND

URKUND	
Documento	ANÁLISIS FUNCIONAL DE LA ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN EN CASO DE VUELCO EN CABINAS DE TRACTORES AGRÍCOLAS CATEGORÍA T1 POR MEDIO DE SIMULACIÓN FEM.docx (D99856542)
Presentado	2021-03-26 15:23 (-05:00)
Presentado por	ariel.avila2015@uteq.edu.ec
Recibido	dpuninag2.uteq@analysis.urkund.com
Mensaje	ANÁLISIS FUNCIONAL DE LA ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN EN CASO DE VUELCO EN CABINAS DE TRACTORES AGRÍCOLA Mostrar el mensaje completo 2% de estas 48 páginas, se componen de texto presente en 6 fuentes.

.....

Ing. Diego Javier Punina Guerrero

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

**“ANÁLISIS FUNCIONAL DE LA ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN EN CASO
DE VUELCO EN CABINAS DE TRACTORES AGRÍCOLAS CATEGORÍA T1
POR MEDIO DE SIMULACIÓN FEM”**

Presentado al Consejo Directivo como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Aprobado por:

Ing. Omar Arturo Cevallos Muñoz MSc.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Ernesto Javier Ruano Herrería MSc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Rodger Benjamín Salazar Loor MSc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

QUEVEDO- LOS RÍOS- ECUADOR

2021

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por el apoyo brindado durante toda mi vida, lo cual me permitió estar el día de hoy aquí cumpliendo mis metas, así como a mis hermanas que con sus buenos deseos quieren lo mejor para mí.

Agradezco las enseñanzas de los profesores y tutores que supieron guiarme en el proceso de aprendizaje y me motivaron para ser un profesional responsable y apasionado por mi trabajo.

Agradezco a mis amigos por brindarme lo más importante de la vida, agradezco su respeto y su apoyo incondicional.

Agradezco a mi amigo Gustavo por apoyarme siempre y darme una amistad verdadera, así como su mano cuando más lo necesite.

Agradezco a mi primo Bryan por sus consejos y por estar en los momentos en los que necesite compañía.

Agradezco a todas las personas que alguna vez estuvieron a mi lado y supieron ayudarme a seguir adelante a pesar de los problemas.

Y lo más importante

Agradezco a Jehová Dios porque mi fe en él, me permitió ver luz en la oscuridad causada por los problemas que suceden a lo largo de la vida, él es luz, él es esperanza para lograr una vida feliz.

Ariel Eduardo Avila Romero.

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a mis padres, porque con su humildad y valor me apoyaron día a día para lograr mi objetivo, ellos son los responsables de que me encuentre hoy en el lugar en donde estoy.

Gracias a los consejos sabios de mi padre y los suaves sentimientos de mi madre pude luchar para no rendirme cuando los problemas llegaron.

Les dedico este trabajo porque son los autores principales de darme la felicidad cuando solo había lágrimas, ellos me dieron la motivación de seguir adelante y me enseñaron lo más importante de la vida, me enseñaron a ser feliz.

Ariel Eduardo Avila Romero.

RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio propone el análisis comparativo del comportamiento mecánico de la estructura de protección antivuelco en condiciones de impacto con el uso de un bloque pendular y propiedades de diferentes materiales, con el fin de observar su comportamiento cuando se somete a estas condiciones de análisis y verificar sus daños. En este documento se aplican metodologías para la selección y jerarquización de alternativas de aceros los cuales son evaluados según las propiedades mecánicas mínimas, con el fin de encontrar dentro de un universo de materiales, las alternativas más apropiadas para su elección. El programa CES Edupack, que cuenta con una amplia base de datos de materiales, utiliza el método AHP en el proceso de clasificación para evaluar las alternativas según los criterios de aceptación requeridos. Este estudio tiene como objetivo principal únicamente analizar la estructura de protección del tractor agrícola de categoría T1. Para obtener y preparar la geometría de la estructura de protección se utiliza el programa de diseño mecánico SOLIDWORKS, para realizar el preprocesamiento y resolver por el método de elementos finitos se utilizan los programas LS-PREPOST y LS-DYNA. A través del análisis realizado en este estudio, fue posible obtener la primera aproximación al comportamiento mecánico de la estructura de protección, presentando valores de esfuerzos máximos en las principales conexiones de la estructura, así como una respuesta para la deformación plástica y elástica de los miembros estructurales para los materiales seleccionados.

Palabras clave:

Tractor agrícola, Bloque pendular, Impacto trasero, Jerarquización de materiales, Topología compartida

ABSTRACT

This study proposes the comparative analysis of the mechanical behavior of the rollover protection structure under impact conditions with the use of a pendulum block and properties of different materials, in order to observe its performance when subjected to these conditions of analysis and to verify its damage. This document applies methodologies for the selection and ranking of steel alternatives, which are evaluated according to the minimum mechanical properties, in order to find the most appropriate alternatives within a universe of materials for their selection. The CES Edupack program, which has an extensive database of materials, uses the AHP method in the ranking process to evaluate the alternatives according to the required acceptance criteria. This study has as main goal solely to analyze the protection structure of the category T1 agricultural tractor. The SOLIDWORKS mechanical design program is used to obtain and prepare the geometry of the protection structure, to perform the preprocessing and solve by the finite element method, the LS-PREPOST and the LS-DYNA programs are used. Through the analysis performed in this study, it was possible to obtain the first approach to the mechanical behavior of the protection structure, presenting maximum stress values in the main connections of the structure, as well as a response for the plastic and elastic deformation of the structural members for the selected materials.

Keywords:

Agricultural Tractor, Pendular Block, Rear impact, Material hierarchy, Shared Topology

ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	iii
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO	iv
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA.....	vii
RESUMEN EJECUTIVO	viii
ABSTRACT	ix
CÓDIGO DUBLÍN	xxviii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Problema de investigación.	3
1.1.1. Planteamiento del problema.	3
1.1.2. Formulación del problema.....	4
1.1.3. Sistematización del problema.....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo General.	5
1.2.2. Objetivo específico.....	5
1.3. Justificación.	6

CAPÍTULO II.....	7
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	7
2.1. Marco conceptual.....	8
2.1.1. Análisis.....	8
2.1.2. Funcional.	8
2.1.3. Ensayo virtual.....	8
2.1.4. Vuelco.	8
2.1.5. Impacto.....	8
2.1.6. Aplastamiento.....	9
2.1.7. Resistencia.....	9
2.1.8. Elasticidad.	9
2.1.9. Rigidez.....	9
2.1.10. Plasticidad.	9
2.1.11. Deformación.....	10
2.1.12. Comportamiento elástico.....	10
2.1.13. Deformación elástica.	10
2.1.14. Deformación plástica.....	10
2.1.15. Análisis explícito.....	10
2.1.16. Modelado.....	11
2.1.17. Discretización.....	11

2.1.18.	Simulación.....	11
2.2.	Marco referencial.....	11
2.2.1.	Tractor agrícola.....	11
2.2.2.	Categoría del tractor agrícola.....	12
2.2.3.	Dimensiones del tractor agrícola.....	12
2.2.4.	Cabinas de protección al vuelco.....	14
2.2.5.	Tipos de cabinas de protección al vuelco.....	15
2.2.6.	Diferencias entre ROPS y FOPS.....	16
2.2.6.1.	Estructura de protección antivuelco (ROPS).....	16
2.2.6.2.	Estructuras de protección contra la caída de objetos (FOPS).	17
2.2.7.	Sistemas de estructuras Discretas y Continuas.....	18
2.2.7.1.	Estructuras discretas.....	18
2.2.7.2.	Estructuras continuas.....	18
2.2.8.	Método de elementos finitos.....	20
2.2.9.	Análisis lineal y no lineal.....	22
2.2.9.1.	Análisis estático lineal.....	22
2.2.9.2.	Análisis dinámico no lineal.....	24
2.2.10.	Malla de elementos finitos.....	26
2.2.11.	Tipos de elementos finitos.....	27
2.2.11.1.	Elementos de tipo Beam 1D.....	28

2.2.11.2.Elementos de tipo Shell 2D.....	29
2.2.11.3.Elementos de tipo Solid 3D.....	31
2.2.12. Criterios de aceptación de malla de elementos finitos.	32
2.2.12.1.Compatibilidad de los elementos de malla.....	33
2.2.12.2.Índices de calidad de malla.	36
2.2.13. Aplicación de software en el trabajo de investigación.	37
2.2.13.1.Software para modelado 3D.....	37
2.2.13.2.SOLIDWORKS.....	37
2.2.13.3.Software para el procesamiento.	38
2.2.13.4.Software de solución.	38
2.2.13.5.LS-DYNA.	38
2.2.14. Métodos para la selección de materiales.	41
2.2.14.1.Metodología Ashby.	41
2.2.14.2.Selección asistida por computadora.	45
2.2.14.3.Proceso Analítico Jerárquico AHP.....	46
2.2.14.4.El acero como material de estudio.	49
2.2.15. Parámetros generales para la evaluación del modelo.....	52
2.2.15.1.Categoría T1.....	52
2.2.15.2.Reglamento delegado UE 1322.....	52
2.2.15.3.Vía.	52

2.2.15.4. Batalla.....	53
2.2.15.5. Zona libre.	53
2.2.15.6. Equipo para condiciones de ensayo.....	55
2.2.15.7. Equipo para medición de la deformación elástica.	58
CAPÍTULO III	59
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	59
3.1. Localización.....	60
3.2. Tipo de investigación.....	60
3.2.1. Investigación Exploratoria.	60
3.2.2. Investigación Documental.....	61
3.2.3. Investigación Aplicada.	61
3.2.4. Investigación Explicativa.	61
3.3. Métodos de investigación.	61
3.3.1. Método Inductivo.	61
3.3.2. Método Analítico.....	62
3.4. Fuentes de recopilación de información.	62
3.5. Diseño de la investigación.	62
3.5.1. Diseño no experimental.....	62
3.6. Instrumentos de investigación.	63
3.7. Tratamiento de los datos.	63

3.8.	Recursos humanos y materiales.....	64
3.8.1.	Recursos humanos.....	64
3.8.2.	Recurso material.....	64
3.8.2.1.	Materiales de oficina.	64
3.8.2.2.	Software.....	64
CAPÍTULO IV		65
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		65
4.1.	Consideraciones generales para el análisis.	66
4.1.1.	Flujo de trabajo para el proceso de análisis.....	66
4.1.2.	Requisitos para la obtención de geometría.....	67
4.1.3.	Cálculo de la altura del bloque pendular.	69
4.1.3.1.	Impacto trasero.....	70
4.2.	Modelado CAD de los elementos para simulación.....	70
4.2.1.	Modelado de la estructura de protección de la cabina del tractor.	70
4.2.2.	Modelado de la Zona libre del conductor.....	72
4.2.3.	Modelado del bloque pendular.....	73
4.2.4.	Limpieza y preparación de geometría.	73
4.2.5.	Tratamiento de conexiones entre cuerpos.	73
4.3.	Preprocesamiento.....	76
4.3.1.	Generación de la malla de elementos finitos.....	77

4.3.2.	Revisión del índice de calidad de malla.	78
4.3.3.	Asignación de restricciones y condiciones de contorno.....	80
4.3.3.1.	Cartas de control.....	80
4.3.4.	Condiciones iniciales para el ensayo de impacto trasero.	85
4.3.4.1.	Modificación de la altura del péndulo.	86
4.3.4.2.	Propiedades de los materiales para el análisis.....	87
4.4.	Resultado 1 del ensayo de impacto.....	88
4.4.1.	Esfuerzo de Von Mises.....	89
4.4.2.	Porcentaje de deformación plástica.	92
4.4.3.	Desplazamientos resultantes de la estructura.	93
4.4.4.	Verificación de la zona libre.	97
4.5.	Selección de material.	98
4.5.1.	Selección computacional mediante el CES Edupack.	98
4.5.2.	Jerarquización AHP.....	102
4.6.	Resultado 2 del ensayo de impacto.....	111
4.6.1.	Esfuerzos de Von Mises.	112
4.6.2.	Porcentaje de deformación plástica.	114
4.6.3.	Desplazamientos resultantes de la estructura.	115
4.6.4.	Verificación de la zona libre.	117
4.7.	Comparación de resultados.	118

CAPÍTULO V	122
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
5.1. Conclusiones.....	123
5.2. Recomendaciones.	124
CAPÍTULO VI	125
BIBLIOGRAFÍA	125
CAPÍTULO VII.....	130
ANEXOS	130

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Tractor Agrícola.	11
Gráfico 2. Categorización de vehículos agrícolas.	12
Gráfico 3. Nomenclatura y dimensiones en vista lateral del tractor agrícola.....	13
Gráfico 4. Nomenclatura y dimensiones en vista frontal del tractor agrícola.	13
Gráfico 5. Modelo de cabina convencional.	14
Gráfico 6. Modelo de cabina con estructura de protección tubular.	15
Gráfico 7. Modelo CAD de la estructura de protección ROPS del tractor agrícola.	17
Gráfico 8. Modelo CAD de la estructura de protección FOPS del tractor agrícola.	17
Gráfico 9. Modelo CAD del compartimiento vehículo de nieve, a) refuerzos de esquinas vigas verticales de perfil cerrado b) vigas dobles.....	19
Gráfico 10. Comparación de modelos físicos y de elementos finitos 2D para tubo de aluminio.	19
Gráfico 11. Geometría de malla.	20
Gráfico 12. Proceso de desarrollo de productos asistido por computadora.....	20
Gráfico 13. Modelo de elementos finitos de un tubo de sombreado de copa antes y después de deformar.....	21
Gráfico 14. a) Modelo idealizado b) Método de elementos finitos.	24
Gráfico 15. Malla de elementos finitos vs Modelo experimental.....	26
Gráfico 16. Tipos de elementos finitos.....	27
Gráfico 17. Elemento tipo Beam 1D.	28

Gráfico 18. Representación de varilla hexagonal compleja con sección transversal y elementos tipo BEAM.	29
Gráfico 19. Elementos tipo Shell 2D.	29
Gráfico 20. Elemento cuadrilátero como conjunto de elementos triangulares.	30
Gráfico 21. Chapa modelo CAD con representación de elemento de tipo cáscara.	30
Gráfico 22. Elementos de tipo sólido 3D	31
Gráfico 23. Un elemento hexaedro como ensamblaje de cinco elementos tetraedro.	32
Gráfico 24. Malla incompatible.	33
Gráfico 25. Geometría CAD representada por malla de elementos incompatibles.	34
Gráfico 26. Modelo 1 sin topología compartida.	35
Gráfico 27. Modelo 2 con topología compartida.	35
Gráfico 28. Coeficiente Jacobiano para triángulos.	36
Gráfico 29. Coeficiente Jacobianos para cuadriláteros.	37
Gráfico 30. Unidades consistentes.	40
Gráfico 31. Gráfico de familias para materiales respecto al módulo de elasticidad.	42
Gráfico 32. Un gráfico de burbujas de módulo y densidad.	43
Gráfico 33. Estrategia aplicada para la selección de materiales.	44
Gráfico 34. Selección asistida por ordenador mediante el software CES.	46
Gráfico 35. Estructura Jerárquica	47
Gráfico 36. Escala para comparaciones pareadas.	48
Gráfico 37. Índice aleatorio.	49

Gráfico 38. Porcentajes máximos de la relación de consistencia	49
Gráfico 39. Curvas típicas de tensión-deformación para aceros estructurales.	50
Gráfico 40. Modelos de tractor agrícola categoría T1.	52
Gráfico 41. Vista lateral de la zona libre de la cabina del conductor.	53
Gráfico 42. Vista frontal de la zona segura de la cabina del conductor.	54
Gráfico 43. Zona libre.....	54
Gráfico 44. Requisitos para el asiento del conductor.	55
Gráfico 45. Bloque pendular.....	56
Gráfico 46. Método de impacto trasero.	57
Gráfico 47. Equipo de medición de la deformación elástica.	58
Gráfico 48. Ubicación geográfica.....	60
Gráfico 49. Proceso general para el análisis FEM.....	66
Gráfico 50. Flujo de trabajo para el análisis.	67
Gráfico 51. Ilustración de la altura calculada para el impacto trasero.....	70
Gráfico 52. Ubicación de la estructura de protección respecto al tractor.	71
Gráfico 53. Vista isometría de la estructura de protección y modelo CAD realista.....	71
Gráfico 54. Modelo de Superficie Zona libre.	72
Gráfico 55. Modelo CAD de bloque pendular.	73
Gráfico 56. Proceso de tratamiento de conexiones.....	74
Gráfico 57. Identificación de conexiones libres.	74

Gráfico 58. Identificación de unión entre cuerpos.....	75
Gráfico 59. Identificación de nodos duplicados.	76
Gráfico 60. Malla de elementos finitos de la estructura de protección.	77
Gráfico 61. Revisión del índice de calidad de malla.	78
Gráfico 62. Detección de elementos deformados.	79
Gráfico 63. Reparación de elementos de malla.	79
Gráfico 64. Comprobación del índice de calidad de la malla de elementos finitos.	80
Gráfico 65. Cartas de control en LS-PREPOST.....	81
Gráfico 66. Asignación de restricción fija a los anillos de péndulo.	82
Gráfico 67. Asignación de restricción fija a zona libre.	82
Gráfico 68. Asignación de restricción fija a las bases de la estructura de protección.	83
Gráfico 69. Anillos para conexión de péndulo.	83
Gráfico 70. Conexión de péndulo entre cuerpos rígidos.	84
Gráfico 71. Ubicación del bloque pendular para ensayo de impacto trasero.	85
Gráfico 72. Modificación de la altura del péndulo.	86
Gráfico 73. Estado de la estructura antes del impacto.....	89
Gráfico 74. Estado de estructura en el impacto máximo.	90
Gráfico 75. Estado de la estructura después del impacto.	90
Gráfico 76. Distribución de esfuerzos en el estado de impacto máximo.....	91
Gráfico 77. Distribución de los esfuerzos residuales después de la carga de impacto.....	91

Gráfico 78. Distribución de deformación plástica.....	92
Gráfico 79. Comparación del miembro estructural antes y después del impacto.....	92
Gráfico 80. Distribución de la deformación plástica en las conexiones de la estructura. ..	93
Gráfico 81. Estado 1 de desplazamiento antes del impacto.....	94
Gráfico 82. Estado 2 de desplazamiento durante el impacto máximo.....	94
Gráfico 83. Estado 3 de desplazamiento después de la carga de impacto.....	95
Gráfico 84. Rastreo de nodos.	96
Gráfico 85. Ubicación de la deformación Elástica.	96
Gráfico 86. Verificación de la zona libre.....	97
Gráfico 87. Selección de la familia de materiales en el programa CES Edupack.	99
Gráfico 88. Familia de aceros según el límite elástico y el porcentaje de elongación.	99
Gráfico 89. Reducción de la cantidad de los aceros según las propiedades mínimas.	100
Gráfico 90. Alternativas de aceros según los requerimientos deseados.	101
Gráfico 91. Comparación de criterios.....	105
Gráfico 92. Comparación de alternativas respecto el límite de elasticidad.....	106
Gráfico 93. Comparación de alternativas respecto al Esfuerzo Último.....	107
Gráfico 94. Comparación de alternativas respecto a la elongación.....	108
Gráfico 95. Comparación de alternativas respecto la densidad.....	109
Gráfico 96. Jerarquización de la mejor alternativa de material.	111
Gráfico 97. Estado de la estructura en el impacto máximo para el nuevo material.	112

Gráfico 98. Estado de la estructura después del impacto para el nuevo material.....	113
Gráfico 99. Distribución de los esfuerzos residuales en las conexiones de la estructura.	113
Gráfico 100. Distribución de deformación plástica para el nuevo material.	114
Gráfico 101. Deformación del perfil especial de la estructura de protección.	115
Gráfico 102. Desplazamientos máximos de la estructura para el nuevo material.	115
Gráfico 103. Desplazamiento de la estructura después del impacto del bloque pendular.	116
Gráfico 104. Ubicación de la deformación total y permanente.	116
Gráfico 105. Ubicación de la zona elástica para el nuevo caso de desplazamiento.	117
Gráfico 106. Verificación de ingreso de elementos en la zona libre.	118
Gráfico 107. Comparación de los Esfuerzos máximos alcanzados.	118
Gráfico 108. Comparación de la deformación plástica.	120
Gráfico 109. Comparación de las deformaciones elásticas.	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones generales de los tractores agrícolas.	14
Tabla 2. Tipos de estructuras para cabinas protección al vuelco.....	16
Tabla 3. Propiedades de los materiales.....	41
Tabla 4. Restricciones y Objetivos Comunes.....	45
Tabla 5. Recursos Humanos	64
Tabla 6. Materiales de oficina	64
Tabla 7. Recursos de Software	64
Tabla 8. Secciones de perfil estructural redondo.....	68
Tabla 9. Secciones de tubería estructural rectangular y cuadrada.	68
Tabla 10. Secciones de perfiles especiales.	69
Tabla 11. Secciones de planchas.	69
Tabla 12. Asignación de espesores a las partes de la estructura de protección.....	77
Tabla 13. Cantidad de elementos y nodos para el análisis.	80
Tabla 14. Asignación de tipo de sección.	84
Tabla 15. Material rígido del bloque pendular.	87
Tabla 16. Modificación de la masa del bloque pendular.....	87
Tabla 17. Propiedades para el material rígido de la Zona Libre y Anillos de péndulo.	88
Tabla 18. Propiedades Mecánicas del acero ASTM A36 para el ensayo de Impacto.	88
Tabla 19. Propiedades mínimas de las alternativas de material.	102

Tabla 20. Matriz (A) de comparación de criterios.....	102
Tabla 21. Matriz normalizada.....	103
Tabla 22. Ponderación de la Matriz normalizada y autovalor de (A).....	103
Tabla 23. Matriz de comparación de Alternativas respecto el límite elástico.	106
Tabla 24. Matriz normalizada respecto al criterio de límite elástico.....	106
Tabla 25. Matriz de comparación de alternativas respecto el esfuerzo último.....	107
Tabla 26. Matriz normalizada respecto al criterio de esfuerzo último.	107
Tabla 27. Matriz de comparación de alternativas respecto la elongación.	108
Tabla 28. Matriz normalizada para las alternativas respecto el criterio de elongación. ...	108
Tabla 29. Matriz de comparación de alternativas respecto la densidad.	109
Tabla 30. Matriz normalizada para las alternativas respecto el criterio de densidad.	109
Tabla 31. Matriz de Priorización de alternativas respecto los criterios.....	110
Tabla 32. Priorización de Alternativas y valores porcentuales.....	110
Tabla 33. Propiedades Mecánicas del acero TRIP YS450 para ensayos de Impacto.....	112

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Matrices de Fuerza y desplazamiento.	22
Ecuación 2. Matriz de rigidez del elemento.	22
Ecuación 3. Fuerza nodal.	22
Ecuación 4. Ensamble de matriz de fuerzas nodales.	23
Ecuación 5. Constante de rigidez del elemento.	23
Ecuación 6. Vector de fuerza nodal global.	23
Ecuación 7. Matriz de rigidez global.	23
Ecuación 8. Matriz para el análisis dinámico lineal.	25
Ecuación 9. Ecuaciones de equilibrio para estudios dinámicos no lineales.	25
Ecuación 10. Matriz de comparación pareada.	47
Ecuación 11. Índice de consistencia.	47
Ecuación 12. Relación de consistencia.	48
Ecuación 13. Cálculo del índice aleatorio.	48
Ecuación 14. Altura del péndulo método de impacto trasero.	57
Ecuación 15. Cálculo de la densidad final del bloque pendular.	88
Ecuación 16. Cálculo de la formación elástica.	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos 1.	Tipos de acero según la ASTM del Manual Diseñador de Acero Estructural.	131
Anexos 2.	Propiedades mecánicas de los tipos de aceros.	132
Anexos 3.	Dimensiones para la zona libre.	132
Anexos 4.	Datos referenciales para los modelos T120-T190 Valtra.....	133
Anexos 5.	Dimensiones para los modelos T120-T190 Valtra.....	134
Anexos 6.	Tubería estructural redonda.	135
Anexos 7.	Tubería estructural cuadrada.	136
Anexos 8.	Tubería estructural rectangular.	137
Anexos 9.	Perfiles especiales.	138
Anexos 10.	Plancha Antideslizante	139
Anexos 11.	Plancha laminada en caliente	140

CÓDIGO DUBLÍN

Título:	Análisis funcional de la estructura de protección en caso de vuelco en cabinas de tractores agrícolas categoría T1 por medio de simulación FEM.				
Autor:	Avila Romero Ariel Eduardo				
Palabras clave:	Tractor agrícola	Bloque pendular	Impacto trasero	Jerarquización de materiales	Topología compartida
Fecha de publicación:					
Editorial:	Quevedo, UTEQ, 2021.				
Resumen:	Resumen. - Este estudio propone el análisis comparativo del comportamiento mecánico de la estructura de protección antivuelco en condiciones de impacto con el uso de un bloque pendular y propiedades de diferentes materiales, con el fin de observar su comportamiento cuando se somete a estas condiciones de análisis y verificar sus daños. En este documento se aplican metodologías para la selección y jerarquización de alternativas de aceros los cuales son evaluados según las propiedades mecánicas mínimas, con el fin de encontrar dentro de un universo de materiales, las alternativas más apropiadas para su elección. El programa CES Edupack, que cuenta con una amplia base de datos de materiales, utiliza el método AHP en el proceso de clasificación para evaluar las alternativas según los criterios de aceptación requeridos. Este estudio tiene como objetivo principal únicamente analizar la estructura de protección del tractor agrícola de categoría T1. Para obtener y preparar la geometría de la estructura de protección se utiliza el programa de diseño mecánico SOLIDWORKS, para realizar el preprocesamiento y resolver por el método de elementos finitos se utilizan los programas LS-PREPOST y LS-DYNA. A través del análisis realizado en este estudio, fue posible obtener la primera aproximación al comportamiento mecánico de la estructura de protección, presentando valores de esfuerzos máximos en las principales conexiones de la estructura, así como una respuesta para la deformación plástica y elástica de los miembros estructurales para los materiales seleccionados.				

	Abstract. - This study proposes the comparative analysis of the mechanical behavior of the rollover protection structure under impact conditions with the use of a pendulum block and properties of different materials, in order to observe its performance when subjected to these conditions of analysis and to verify its damage. This document applies methodologies for the selection and ranking of steel alternatives, which are evaluated according to the minimum mechanical properties, in order to find the most appropriate alternatives within a universe of materials for their selection. The CES Edupack program, which has an extensive database of materials, uses the AHP method in the ranking process to evaluate the alternatives according to the required acceptance criteria. This study has as main goal solely to analyze the protection structure of the category T1 agricultural tractor. The SOLIDWORKS mechanical design program is used to obtain and prepare the geometry of the protection structure, to perform the preprocessing and solve by the finite element method, the LS-PREPOST and the LS-DYNA programs are used. Through the analysis performed in this study, it was possible to obtain the first approach to the mechanical behavior of the protection structure, presenting maximum stress values in the main connections of the structure, as well as a response for the plastic and elastic deformation of the structural members for the selected materials.
Descripción:	172 hojas: Dimensiones 290 × 210 mm
URI:	

LISTADO DE ABREVIATURAS

AHP:	Proceso Analítico Jerárquico
AISI:	Instituto Americano del Hierro y el Acero
ASTM:	Sociedad Americana de Prueba de Materiales
CAD:	Diseño Asistido por computadora
CAE:	Ingeniería Asistida por computadora
CAM:	Manufactura Asistida por computadora
FEM:	Método de Elementos Finitos
FOPS:	Estructura de Protección contra Caída de Objetos
HSLA:	Acero de baja Aleación y alta Resistencia
INEN:	Servicio Ecuatoriano de Normalización
LST:	Livermore Software Technology
NTE:	Norma Técnica Ecuatoriana
OPS:	Estructura de Protección del Operador
ROPS:	Estructura de Protección en caso de Vuelco
TRIP:	Aceros de plasticidad inducida por transformación

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Simbología	Descripción
$\lambda_{\max}$:	Autovalor de la matriz de comparación de criterios
Δd :	Variación del desplazamiento
Δt :	Variación del tiempo
A:	Área de la sección transversal, Matriz de comparación de criterios
C:	Matriz de amortiguamiento
d:	Desplazamiento
D_e :	Deformación elástica alcanzada durante el impacto
D_p :	Deformación permanente después del impacto
D_T :	Deformación total alcanzada
E:	Módulo de elasticidad
F:	Fuerza
f:	Vector de fuerza nodal en cada elemento
H:	Altura del centro de gravedad del bloque pendular
IA:	Índice Aleatorio
IC:	Índice de consistencia
k:	Matriz de rigidez del elemento
K:	Matriz de rigidez global
L:	Longitud, batalla del tractor

m:	Masa
M:	Matriz de la masa, Masa del tractor
n:	Dimensión de la matriz de decisión
RC:	Relación de Consistencia
t:	Tiempo
w:	Ponderación de los criterios

1. INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico ha permitido el desarrollo informático de nuevas tecnologías para el progreso del diseño enfocado a mejorar la seguridad de las personas y aumentar el rendimiento de las estructuras. Así mismo se han desarrollado programas avanzados de elementos finitos que permite simular el comportamiento mecánico estructural realizándolo con gran precisión y llevando los resultados a una aproximación con la realidad, además de base de datos de materiales y metodologías de selección para la optimización de los modelos.

El siguiente estudio tiene la finalidad de dar a conocer las nuevas tecnologías en el campo del análisis asistido por computadora, utilizando la simulación por medio del método de elementos finitos, la selección y la jerarquización de las mejores alternativas de materiales para la estructura de protección al vuelco ROPS en los tractores agrícolas categoría T1.

En este proyecto se utiliza el método de elementos finitos mediante la simulación computacional para realizar el análisis comparativo entre dos materiales de distintas propiedades mecánicas, bajo las mismas condiciones en el ensayo de impacto por medio de un bloque pendular en la parte trasera de la estructura de protección, según lo descrito en el reglamento delegado UE 1322 del Diario oficial de la Unión Europea, el cual requiere que todos los tractores agrícolas antes de su comercialización o después de una reparación sean evaluados por medio de ensayos para verificar la resistencia de la cabina o barras de protección para vuelco.

Se utilizó el software LS-DYNA especializado en el campo de choques y colisiones automotrices, pruebas de rebote y caída, fabricación de piezas de automoción, simulación de proceso de fabricación y seguridad de peatones.

Para determinar la mejor alternativa de material, se utilizó el programa CES Edupack el cual cuenta con una base de datos extensa respecto al universo de materiales y procesos disponibles en la industria, esto lo hace apropiado para esta aplicación, así mismo, se utiliza el método de análisis jerárquico, para determinar la mejor alternativa la cual se utiliza para la comparación entre los resultados de los análisis del ensayo de impacto en la parte trasera de la estructura de protección con la finalidad de mejorar su comportamiento mecánico.

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación.

1.1.1. Planteamiento del problema.

El empleo de la mecánica computacional por medio del método de elementos finitos es una técnica eficaz que sirve para resolver problemas de ingeniería, ayudando a la toma de decisiones y la obtención resultados, permitiendo observar el comportamiento de los fenómenos físicos en un entorno virtual. El análisis de las estructuras de protección al vuelco en las maquinarias de trabajo agrícola es de suma importancia, siendo esta una de las herramientas más eficaces para la detección de fallos en los materiales evaluando la resistencia y las deformaciones de los miembros estructurales.

Al no existir documentos técnicos o estudios nacionales publicados que controlen y planteen los requisitos mínimos de seguridad empleados para la fabricación, modificación, reparación y mantenimiento de las estructuras de protección al vuelco en las cabinas de tractores agrícolas, podrían no tener la suficiente resistencia para soportar impactos de vuelco, causando lesiones graves o hasta la muerte del ocupante, debido a la invasión de la zona libre del conductor por parte de los miembros estructurales.

El desconocimiento o inexistencia de las tecnologías, escasez de laboratorios nacionales certificados, demora y costos elevados de certificaciones internacionales de las estructuras de protección al vuelco, son factores que afectan a los talleres encargados de realizar algunas de las funciones citadas anteriormente generando incertidumbre en la funcionalidad de estas estructuras de protección.

Diagnóstico.

Actualmente la provincia de Los Ríos, y de manera particular el cantón Quevedo, comprende ser uno de los sectores de mayor cobertura agrícola, por lo cual el empleo de maquinaria agrícola es fundamental para los trabajos realizados en campo, sin embargo, no cuenta con un centro especializado para el diseño y validación de cabinas de protección al vuelco para tractores agrícolas, por este motivo se construyen estructuras de protección artesanalmente sin un adecuado proceso de análisis correspondiente a los estándares internacionales para la construcción de estos equipos de protección.

Pronóstico.

La escasez de estudios o investigaciones acerca del comportamiento de las estructuras de protección al vuelco en tractores agrícolas, provocaría que las estructuras de protección se construyan sin los debidos requerimientos necesarios para el cumplimiento de estándares de seguridad, causando que los talleres dedicados a realizar estas labores sigan basándose en conocimientos empíricos, sin tener en cuenta algunas propiedades importantes de los materiales, dimensionamiento, geometrías, etc.

1.1.2. Formulación del problema.

¿Al realizar un análisis comparativo para evaluar el diseño de la estructura de protección al vuelco ROPS en tractores agrícolas mediante el método de elementos finitos, podrá satisfacer los requerimientos mínimos de aceptación que indica el reglamento UE 1322 y de esta forma lograr obtener una estructura más resistente evitando pérdidas humanas por volcamiento y aplastamiento?

1.1.3. Sistematización del problema.

Algunas de las interrogantes que se presentan para el proceso de obtención de los resultados de la estructura de protección al vuelco de la cabina del tractor agrícola son las siguientes:

- ¿Cuáles serán las herramientas utilizadas en el proceso de modelado y análisis respectivo de la estructura de protección al vuelco de la cabina del tractor?
- ¿Cuál es la metodología a seguir para la respectiva evaluación del modelo virtual?
- ¿Bajo qué criterio del reglamento delegado UE 1322 se determinará si la estructura de protección al vuelco es resistente y cumple los requerimientos?
- ¿Bajo qué criterios se aplica la selección de materiales para su aplicación en los análisis y comparación de los resultados?

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo General.

Analizar la estructura de protección en caso de vuelco ROPS en la cabina del tractor agrícola categoría T1 según el ensayo de impacto trasero por medio de simulación FEM.

1.2.2. Objetivo específico.

- Examinar el comportamiento mecánico de la estructura de protección al vuelco, cuando es sometida a condiciones de carga de impacto, para la obtención de resultados comparables sobre resistencia y deformación estructural.
- Seleccionar una alternativa de material mediante las metodologías de Ashby y AHP, obteniendo entre una serie de criterios las opciones de aceros más adecuados para la estructura de protección.
- Evaluar la nueva alternativa de material seleccionada, bajo las mismas condiciones de análisis para examinar el comportamiento que tendrá la estructura de protección con las nuevas propiedades del material.
- Comparar los resultados obtenidos mediante los análisis realizados para verificar las condiciones de aceptación de deformación e invasión de la zona libre del conductor.

1.3. Justificación.

Existen cargas extremas que son provocadas por impactos o colisiones que normalmente se producen en accidentes como los choques y vuelcos, provocando lesiones o la muerte de los ocupantes de los tractores agrícolas.

Este estudio plantea analizar el comportamiento mecánico de la estructura de protección de la cabina de un tractor agrícola bajo condiciones de carga de impacto por medio de la mecánica computacional del método de elementos finitos (FEM), para predecir la afectación en el conductor y la resistencia de la estructura de protección.

Algunos aspectos importantes a destacar son los tipos de aceros que serán evaluados con el fin de obtener la mejor alternativa de material que cumpla con los requerimientos deseados, por esta razón mediante la metodología de Ashby y AHP se busca la selección y jerarquización de estos aceros, obteniendo en base a sus propiedades la mejor opción a utilizar.

Por medio del método de elementos finitos, se podrá realizar el ensayo de impacto en la parte trasera de la estructura de protección descrito en el ANEXO VI del reglamento UE 1322, en el cual indica algunos requerimientos necesarios para evaluar el modelo de la estructura de protección de la cabina del tractor, tales como las deformaciones e invasión de la zona libre del conductor. Por lo tanto, se utiliza este método computacional debido a que presenta resultados precisos y es de muy bajo costo.

Así mismo se desea publicar un proyecto que trate aspectos ingenieriles, indicando los requisitos mínimos para la protección de los usuarios en los tractores agrícolas, en el cual se crea un sustento técnico válido que pueda ser utilizado para posteriores investigaciones.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual.

2.1.1. Análisis.

Se refiere a la aplicación de métodos científicos al reconocimiento y definición de problemas, así como al desarrollo de procedimientos para su solución [1].

2.1.2. Funcional.

Se define como la caracterización de propiedades. Cuantifican sobre variables predicativas al decir que algún objeto tiene cierta propiedad funcional siempre y cuando posea una propiedad en particular que satisfaga un rol causal específico [2].

2.1.3. Ensayo virtual.

El análisis virtual es un proceso computacional que se lleva a cabo a través de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) para simular o predecir el comportamiento de elementos en sus condiciones de trabajo / operativas [3].

2.1.4. Vuelco.

Esta situación se presenta cuando el vehículo realiza maniobras evasivas, como evadir personas, objetos, imperfecciones en la vía o cuando realiza maniobras de vaivén. Es por ello que es importante determinar la ubicación del Centro de Gravedad del vehículo y el movimiento de este durante todo este proceso [4]. Así mismo la maniobrabilidad cambia cuando se toman curvas cerradas provocando que la fuerza inercial junto con la gravedad cause el descarrilamiento o volcamiento del vehículo.

2.1.5. Impacto.

Un impacto ocurre cuando hay choque entre dos cuerpos, siendo un suceso que suele tener lugar en un intervalo de tiempo muy corto. Suele ir acompañado de fuerzas de reacción entre los cuerpos relativamente intensas lo que da lugar a fuertes cambios de velocidad de uno o ambos cuerpos. Las intensas fuerzas de reacción también originan una deformación considerable de los cuerpos en colisión y, en consecuencia, la conversión de energía mecánica en sonido y calor [5].

2.1.6. Aplastamiento.

Este tipo de esfuerzo ocurre cuando un cuerpo es soportado por otro, y es el esfuerzo de compresión desarrollado entre dos cuerpos en su superficie de contacto, que es característico en esta variante de esfuerzo normal [6].

2.1.7. Resistencia.

Es una de las propiedades más importantes de los materiales, dependiendo de las características y procesos que se hayan aplicado para su obtención. Así mismo, tiene como objetivo fundamental determinar la respuesta de las estructuras cuando estas se ven sometidas a las diferentes acciones que deben soportar durante su construcción y vida útil [7].

2.1.8. Elasticidad.

Elasticidad es la propiedad que hace que un cuerpo que ha sido deformado regrese a su forma original después de que se han removido las fuerzas deformadoras [8]. Propiedad de un material, mediante el cual regresa a sus dimensiones originales durante la descarga, se denomina y se dice que el propio material es elástico [9]. Determina el comportamiento de una estructura ante las cargas mediante la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales, llamados ecuaciones de campo o de gobierno, complementados por las condiciones de contorno o de sustentación [10].

2.1.9. Rigidez.

Es un indicador de la tendencia de un elemento a volver a su forma original después de haber sido sometido a una fuerza [11]. Así mismo, la rigidez es la capacidad de un sistema para resistir la deformación cuando se somete a carga [12].

2.1.10. Plasticidad.

El comportamiento plástico viene definido por aquellos materiales que al sufrir una carga de tensión que supere el valor de su límite elástico y descargar, se originan deformaciones permanentes en el material, pero sin verse reducida la rigidez propia de éste [13].

2.1.11. Deformación.

Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo, ésta tiende a cambiar la forma y el tamaño del cuerpo. Estos cambios se conocen como deformación, la cual puede ser muy visible o casi imperceptible [14]. En un sentido general, la deformación de un cuerpo no será uniforme en todo su volumen, por lo que el cambio en la geometría de cualquier segmento de línea dentro del cuerpo puede variar de forma considerable a lo largo de su longitud [14].

2.1.12. Comportamiento elástico.

El material se comporta elásticamente si las deformaciones en una muestra de prueba de una carga dada desaparecen cuando se quita la carga. El mayor valor de tensión que causa este comportamiento elástico se denomina límite elástico del material [15].

2.1.13. Deformación elástica.

En esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad, aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas [16].

2.1.14. Deformación plástica.

Si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica [16].

2.1.15. Análisis explícito.

Con el método explícito se pueden obtener soluciones a problemas dinámicos, con grandes desplazamientos y velocidades, como pueden ser un impacto o un proceso de mecanizado a alta velocidad [17]. Así mismo, el análisis explícito requiere pasos de tiempo más cortos que los utilizados para resolver los análisis de tipo implícito.

2.1.16. Modelado.

Se aplica un método analítico a un problema virtual en lugar de a un problema físico real. En el modelado el analista busca excluir detalles excesivos, pero incluye todas las características esenciales de modo que el análisis del modelo no sea innecesariamente complicado pero que proporcione resultados que describan el problema real con suficiente precisión [18].

2.1.17. Discretización.

Un modelo matemático se discretiza dividiendo en una malla de elementos finitos. Así, un campo continuo está representado por un número finito de cantidades nodales y una interpolación simple dentro de cada elemento [18].

2.1.18. Simulación.

La simulación es el estudio de los efectos causados en un objeto debido a las condiciones de carga del mundo real. La simulación por computadora es un tipo de simulación que utiliza modelos CAD para representar objetos reales y aplica varias condiciones de carga en el modelo para estudiar los efectos del mundo real [19].

2.2. Marco referencial.

2.2.1. Tractor agrícola.

Un tractor agrícola es un vehículo asociado a equipos que pueden realizar trabajos de labrado de suelos, proceso de abonado, siembra, acondicionamiento de cosechas, empaquetado, recolección, carga y descarga de materiales, etc.

Gráfico 1. Tractor Agrícola.



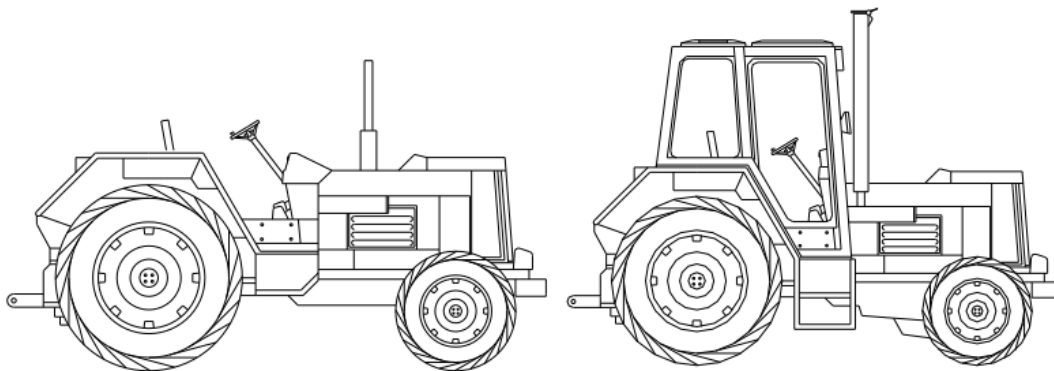
FUENTE: JOHN DEER

El tractor puede considerarse como el exponente máximo de la mecanización agraria, que interviene en la mayoría de los trabajos mecanizados y que, al mismo tiempo, es agente material de múltiples accidentes que normalmente tienen consecuencias graves y mortales y debidas principalmente al vuelco del vehículo [20]. Existen distintos tractores destinados a diferentes tareas, como la agricultura, la construcción, la náutica, el movimiento de tierras o los mantenimientos de espacios verdes profesionales [21].

2.2.2. Categoría del tractor agrícola.

La denominación utilizada para la elección del tipo tractor proviene de la clasificación vehicular de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2656, la cual define con la letra T la categoría de tipo tractor.

Gráfico 2. Categorización de vehículos agrícolas.



FUENTE: NTE INEN 2656

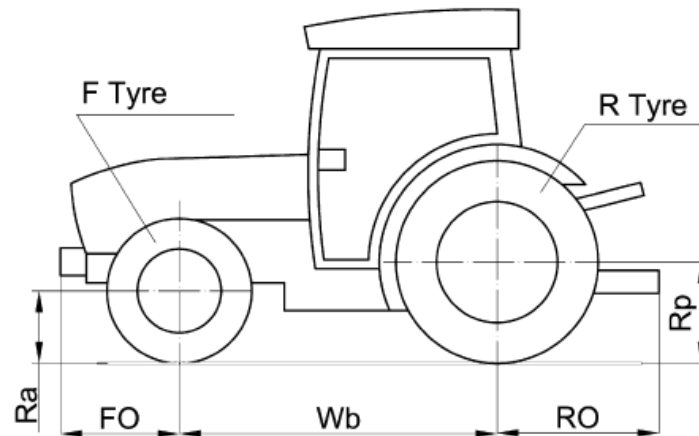
AUTOR: NORMAS TÉCNICAS ECUATORIANAS, [2016]

La definición general presente para la categorización de estos vehículos es la siguiente. Vehículo motorizado construido y diseñado para arrastrar, empujar, transportar o accionar determinados implementos, máquinas o remolques destinados a ser utilizados en la agricultura o la silvicultura [22].

2.2.3. Dimensiones del tractor agrícola.

Para obtener una visión adecuada sobre el dimensionamiento del tractor, a continuación, se describirán brevemente las dimensiones generales de los tractores agrícolas, permitiendo conocer sus características específicas.

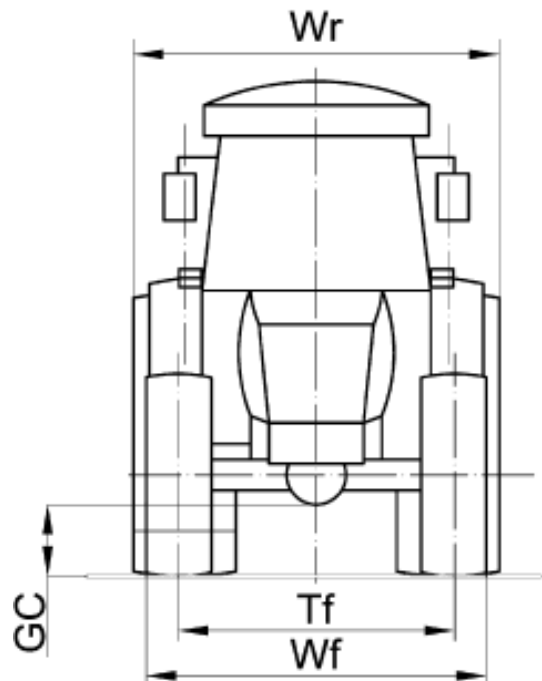
Gráfico 3. Nomenclatura y dimensiones en vista lateral del tractor agrícola.



FUENTE: JOURNAL OF TERRAMECHANICS

**AUTOR: STEFANO UBERTI, MARCO GADOLA, DANIEL CHINDAMO,
MATTEO ROMANO, FRANCESCO GALLI, [2015]**

Gráfico 4. Nomenclatura y dimensiones en vista frontal del tractor agrícola.



FUENTE: JOURNAL OF TERRAMECHANICS

**AUTOR: STEFANO UBERTI, MARCO GADOLA, DANIEL CHINDAMO,
MATTEO ROMANO, FRANCESCO GALLI, [2015]**

Tabla 1. Dimensiones generales de los tractores agrícolas.

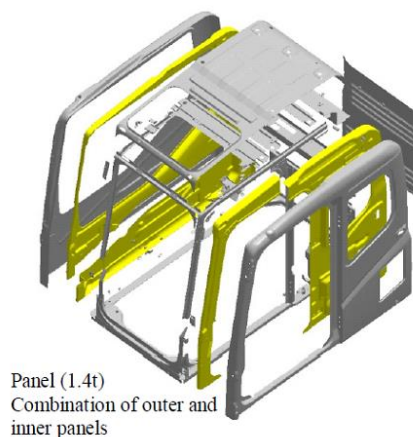
Nomenclatura	Descripción
F_{tyre}	Dimensión del neumático delantero
R_{tyre}	Dimensión del neumático trasero
R_a	Índice de radio de la rueda delantera
R_p	Índice de radio de la rueda trasera
F_o	Voladizo delantero
R_o	Voladizo trasero
W_b	Distancia entre ejes “Batalla”
W_r	Ancho trasero
W_f	Ancho frontal
T_f	Vía
GC	Distancia del suelo del vehículo

ELABORADO POR: AUTOR.

Inicialmente en el proceso de modelado se toman consideraciones acerca del dimensionamiento del objeto a analizar, si bien es cierto, cada una de las dimensiones citadas anteriormente son muy importantes permitiendo obtener la información necesaria para un correcto proceso de obtención de la geometría.

2.2.4. Cabinas de protección al vuelco.

Gráfico 5. Modelo de cabina convencional.



FUENTE: KOMATSU TECHNICAL REPORT

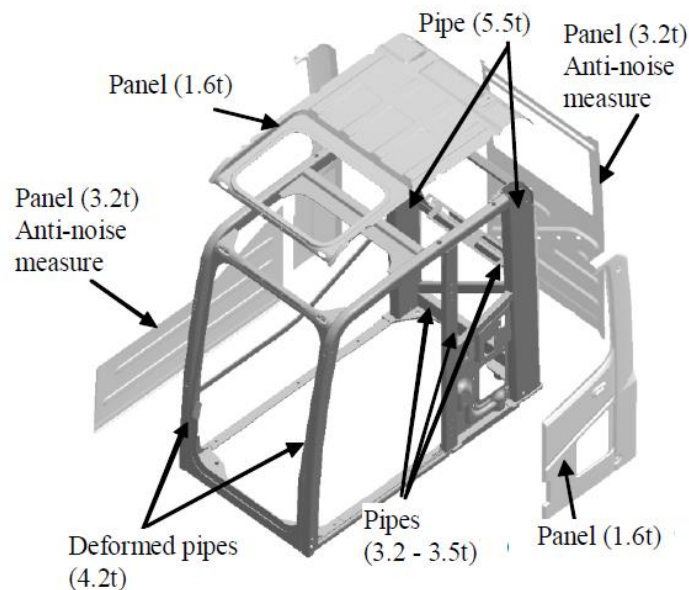
AUTOR: TAKAHIRO NOGUCHI, TATSUSHI ITOH, [2008]

Normalmente, el diseño convencional en las cabinas de los tractores no son lo suficientemente resistentes para soportar las cargas que se producen cuando ocurre el volcamiento del vehículo, es por esta razón que se implementa la estructura de protección en las cabinas de los tractores con el fin de poder mejorar la seguridad para los ocupantes de este tipo de maquinarias.

Las características principales en las cabinas convencionales de los tractores es la presencia de paneles interiores y exteriores que en base a su proceso de conformado de chapa se obtiene una estructura que cumple con los requerimientos para su producción y comercialización.

Las cabinas integran un bastidor que forma parte de la cabina del tractor como se muestra en el siguiente Gráfico, obtienen mayor resistencia a los impactos gracias a los perfiles tubulares que en conjunto con los paneles se logra un diseño estructural mejorado.

Gráfico 6. Modelo de cabina con estructura de protección tubular.



FUENTE: KOMATSU TECHNICAL REPORT

AUTOR: TAKAHIRO NOGUCHI, TATSUSHI ITOH, [2008]

2.2.5. Tipos de cabinas de protección al vuelco.

Actualmente, se tiene una visión general sobre las cabinas de protección al vuelco, si bien es cierto existen variantes según el área específica de aplicación. Al existir en el sector agrícola diversas funciones para los tractores, se tienen que especificar las necesidades según el trabajo que estas maquinarias realizan y los tipos de riesgos que existen.

Así mismo, existen varias denominaciones para las estructuras de protección al vuelco dependiendo de los tipos de riesgos los cuales son volcamiento, caída de objetos o ingreso de elementos particulados en la cabina causando lesiones al conductor. Los tractores en general son utilizados para muchas aplicaciones, en este estudio mencionaremos los principales tipos de estructuras para las cabinas de protección las cuales se muestran a continuación.

Tabla 2. Tipos de estructuras para cabinas protección al vuelco.

Siglas	Descripción	Aplicación
ROPS	Estructura de protección en caso de vuelco	Maquinaria agrícola
FOPS	Estructura de protección contra la caída de objetos	Maquinaria forestal
OPS	Estructura de protección del operador	Maquinaria Industrial

ELABORADO POR: AUTOR.

Además de los tipos de estructuras de protección mencionados en la tabla anterior, existen otros tipos secundarios que tienen su campo de aplicación en las maquinarias de movimiento de tierra, transporte y elevación de carga pesada.

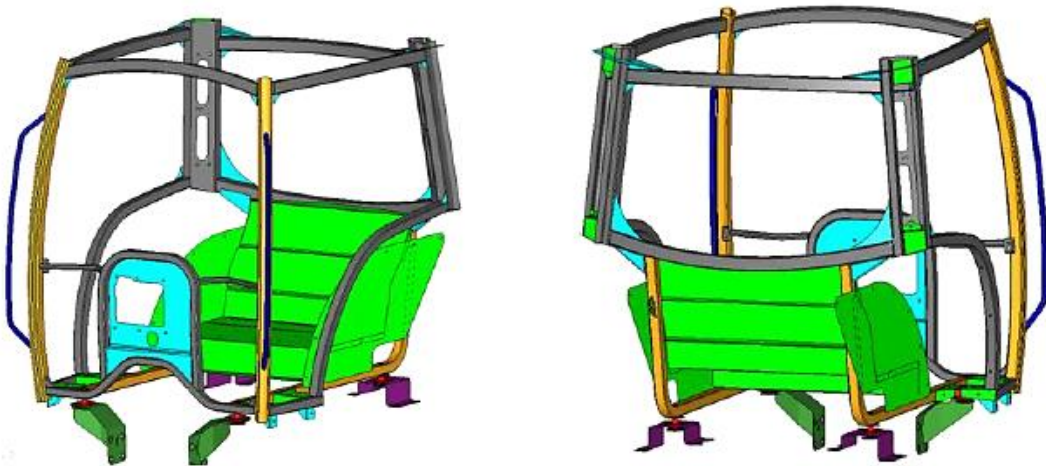
2.2.6. Diferencias entre ROPS y FOPS.

2.2.6.1. Estructura de protección antivuelco (ROPS).

Una estructura de protección en caso de vuelco (ROPS) es una cabina o bastidor para la protección de los operadores de tractores agrícolas de ruedas para minimizar la posibilidad de que el operador sufra lesiones graves como resultado de vuelcos accidentales [23].

La estructura de protección (ROPS) está compuesta principalmente por un bastidor de acero tubular soldado reforzado que se une al chasis del tractor mediante la plataforma. La plataforma es la parte inferior de la estructura de protección que se fija al tractor mediante cuatro soportes [24].

Gráfico 7. Modelo CAD de la estructura de protección ROPS del tractor agrícola.



FUENTE: 14TH INTERNATIONAL LS-DYNA USERS CONFERENCE

AUTOR: D. HAILOUA BLANCO, C. MARTIN, A. ORTALDA, [2016]

2.2.6.2. Estructuras de protección contra la caída de objetos (FOPS).

Este modelo de cabina comparte funciones similares con el modelo anterior, pero con ciertas diferencias. La estructura protectora (FOPS) es un conjunto hecho principalmente de materiales plásticos que está diseñado para proporcionar protección superior al conductor [24].

Gráfico 8. Modelo CAD de la estructura de protección FOPS del tractor agrícola.



FUENTE: 14TH INTERNATIONAL LS-DYNA USERS CONFERENCE

AUTOR: D. HAILOUA BLANCO, C. MARTIN, A. ORTALDA, [2016]

Una estructura de protección contra la caída de objetos (FOPS) es un dispositivo de seguridad instalado en un vehículo agrícola autopropulsado que proporciona una protección razonable para el operador en el puesto de conducción contra la caída accidental de objetos [25].

2.2.7. Sistemas de estructuras Discretas y Continuas.

2.2.7.1. Estructuras discretas.

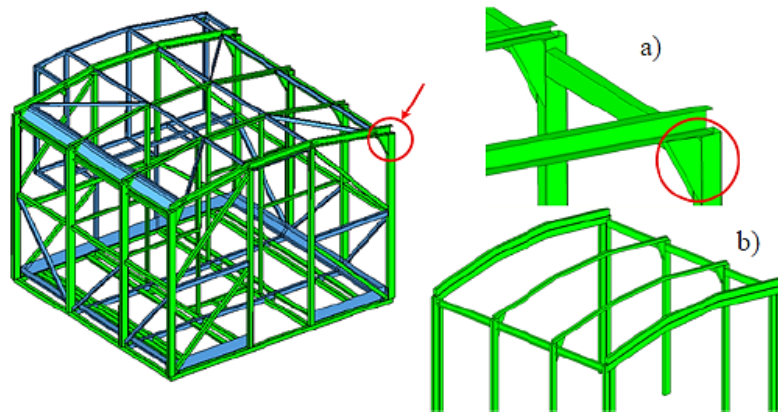
La característica fundamental de las estructuras discretas es que su deformación puede definirse de manera exacta mediante un número finito de parámetros, como por ejemplo las deformaciones de los puntos de unión de unos elementos y otros [26]. Las estructuras como las cerchas y los marcos, que tienen muchos miembros identificables, conectados solo en sus puntos finales o nodos, se denominan estructuras discretas. Cada miembro de la estructura se considera un elemento unidimensional 1-D a lo largo de su longitud, identificado por sus coordenadas de punto final. Sus dimensiones laterales se reflejan en propiedades del elemento como área de sección transversal en cerchas y momento de inercia y profundidad de sección en vigas [27].

2.2.7.2. Estructuras continuas.

Las estructuras tales como placas, conchas delgadas, conchas gruesas, sólidos, que no tienen miembros claramente identificables, pueden modelarse mediante un número arbitrario de elementos de diferentes formas, a saber, triángulos y cuadriláteros en estructuras 2-D y elementos de tetraedro y ladrillo en estructuras 3-D. Se denominan estructuras continuas. En estas estructuras, los elementos adyacentes tienen una superficie límite común (o línea, si se desprecia la variación de tensión a través del espesor como en el caso de las placas) [27].

Cada uno de los tipos de estructuras discretas y estructuras continuas, dependiendo de su tipo de geometría, se utilizará el método de modelado y de análisis adecuado, teniendo en cuenta que en algunos de los casos de estudio existirán configuraciones de modelos mixtos, estos compartirán todos los tipos de elementos estructurales y de elementos finitos los cuales se mencionaron anteriormente. En los Gráficos 9 y 10 respectivamente, se observa dos ejemplos de las estructuras discretas para los modelos estructurales con elementos finitos 1-D y 2-D. Así mismo, en el Gráfico 11 se ilustra el modelo sólido de un cigüeñal con elementos tetraédricos 3-D para las estructuras continuas.

Gráfico 9. Modelo CAD del compartimiento vehículo de nieve, a) refuerzos de esquinas vigas verticales de perfil cerrado b) vigas dobles.



FUENTE: SCIENTIFIC TECHNICAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

AUTOR: NIKOLA AVRAMOV, MILAN KJOSEVSKI, PETAR SIMONOVSKI, [2016]

Gráfico 10. Comparación de modelos físicos y de elementos finitos 2D para tubo de aluminio.



FUENTE: INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCES
AUTOR: GUOHUA ZHU, GUANGYONG SUN, HANG YU, SHUNFENG LI, QING LI, [2018]

Gráfico 11. Geometría de malla.



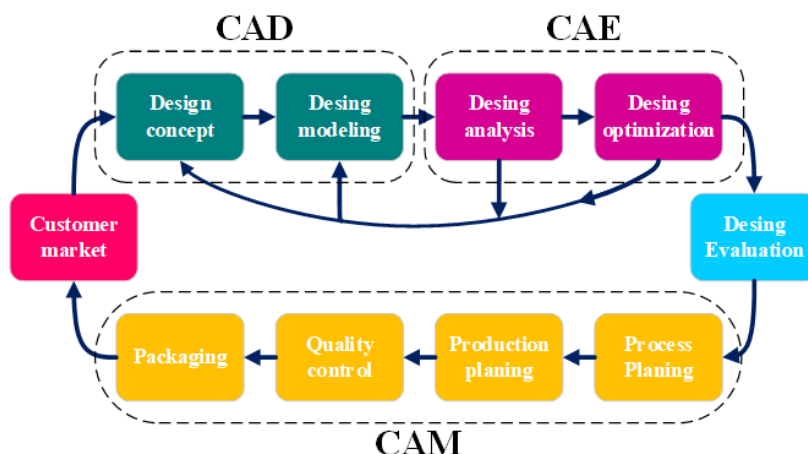
FUENTE: OPTIMIZATION OF THE CRANKSHAFT USING FINITE ELEMENT ANALYSIS APPROACH

AUTOR: V. C. SHAHANE, R. S. PAWAR, [2017]

2.2.8. Método de elementos finitos.

Las computadoras han revolucionado la práctica de la ingeniería. El diseño de un producto que solía hacerse mediante tediosos dibujos a mano ha sido reemplazado por el diseño asistido por ordenador (CAD) utilizando gráficos por ordenador. Entre todas las herramientas computacionales para CAE, el FEM es el método más aplicado o uno de los "calculadores" modernos más potentes disponibles para estudiantes de ingeniería y profesionales. El método de elementos finitos proporciona una forma de probar virtualmente el diseño de un producto. Ayuda a los usuarios a comprender sus diseños e implementar los cambios de diseño adecuados al principio del proceso de desarrollo del producto [28].

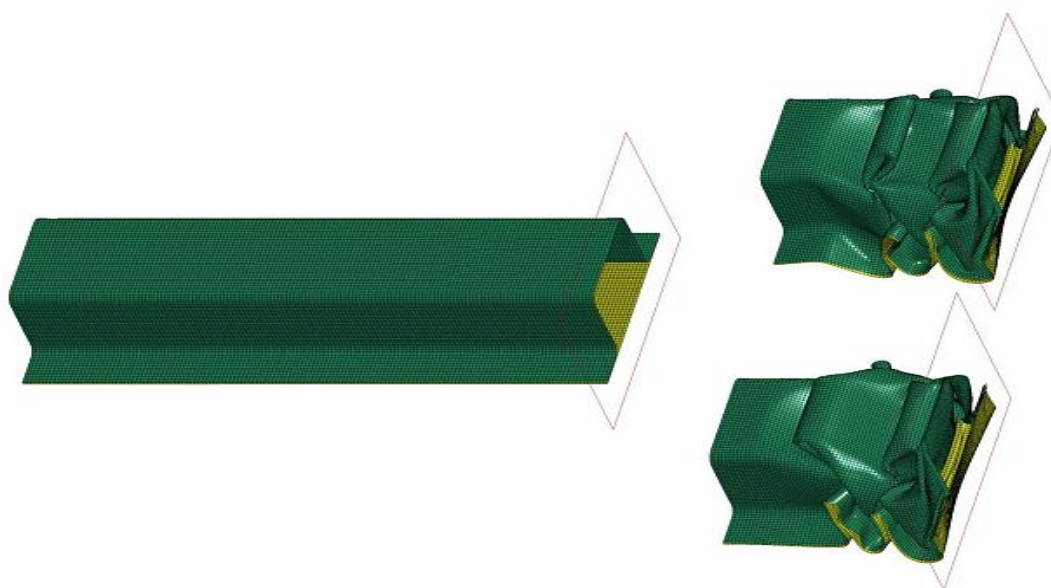
Gráfico 12. Proceso de desarrollo de productos asistido por computadora.



FUENTE: FINITE ELEMENT MODELING AND SIMULATION WITH ANSYS WORKBENCH

ELABORADO POR: AUTOR.

Gráfico 13. Modelo de elementos finitos de un tubo de sombrero de copa antes y después de deformar.



FUENTE: DYNAMORE GMBH

**AUTOR: SEBASTIJAN JURENDIC, RICHARD BURROWS, SHUVRA SAHA,
ZEQIN LIANG, [2017]**

El método de elementos finitos es un método numérico para resolver problemas de ingeniería y física matemática. Las áreas problemáticas típicas de interés en la ingeniería y la física matemática que son solucionables por el uso del método de elementos finitos incluyen análisis estructurales, transferencia de calor, flujo de fluidos, transporte de masas y potencial electromagnético. Típicamente, para el problema de análisis de tensión estructural, el ingeniero busca determinar los desplazamientos y las tensiones en toda la estructura, que está en equilibrio y se somete a cargas aplicadas. Para muchas estructuras, es difícil determinar la distribución de la deformación utilizando métodos convencionales, y por lo tanto el método de elemento finito se utiliza necesariamente [29].

Como se menciona en párrafos anteriores el concepto del método de elementos finitos involucra seccionar en pequeñas partes al modelo de estudio, a su vez, estos estarán unidos por medio de conexiones nodales. Se debe tomar en consideración la elección de los elementos utilizados en el análisis, ya que dependerá de la geometría física del objeto bajo las condiciones de carga y la aproximación real del estudio.

2.2.9. Análisis lineal y no lineal.

2.2.9.1. Análisis estático lineal.

El proceso de solución general aplicado al método de elementos finitos, se basa en métodos matriciales con el propósito de simplificar la formulación de las ecuaciones de rigidez de los elementos, tomando como referencia un elemento lineal sometido a cargas de tensión o compresión. Para la formulación general, existe una estrecha relación entre las fuerzas nodales de los elementos, desplazamientos globales y la matriz de rigidez. Como ejemplo de estas matrices a continuación se presentan las componentes que intervienen partiendo de una fuerza externa relacionando los desplazamientos y la matriz de rigidez del material. Este método se describe en el libro del método de los elementos finitos de Daryl L. Logan [29].

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{1z} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ F_{2z} \\ \vdots \\ F_{nx} \\ F_{ny} \\ F_{nz} \end{Bmatrix} ; \quad \{d\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \\ w_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Como se muestra en las matrices para cada elemento existe una componente fuerza y desplazamiento que actúa en una dirección específica. Así mismo, la rigidez de cada elemento está definida por la siguiente matriz la cual se denota por la letra “k” [29].

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Considerando que cada elemento que conforma la estructura tendrá sus propias fuerzas y desplazamientos, el arreglo matemático queda expresado de la siguiente manera [29].

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (3)$$

Donde $\{f\}$ es el vector de fuerza nodal en cada elemento, de la misma forma $[k]$ es la matriz de rigidez del elemento y $\{d\}$ es el vector de grados de libertad o desplazamientos generales, su configuración ensamblada a partir de la ecuación (3) se muestra a continuación [29].

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \cdots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \cdots & k_{3n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ k_{n1} & & & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Al ser resuelto el sistema de matrices y ecuaciones que intervienen internamente como la constante “k” conocida como constante de resorte o rigidez de resorte la cual se define como la relación entre el área de la sección transversal “A” del elemento con el módulo de elasticidad “E” y la longitud del mismo “L”, como se muestra en la siguiente ecuación [29].

$$k = \frac{AE}{L} \quad (5)$$

Se realiza el ensamble global de la matriz de rigidez involucrando las matrices anteriores, normalmente la forma general de la ecuación representativa es similar a la ecuación de las fuerzas nodales, la diferencia que define esta ecuación es la intervención de las condiciones de contorno con la aparición de las fuerzas externas la cual es representada por la Ecuación (1) mencionada anteriormente [29].

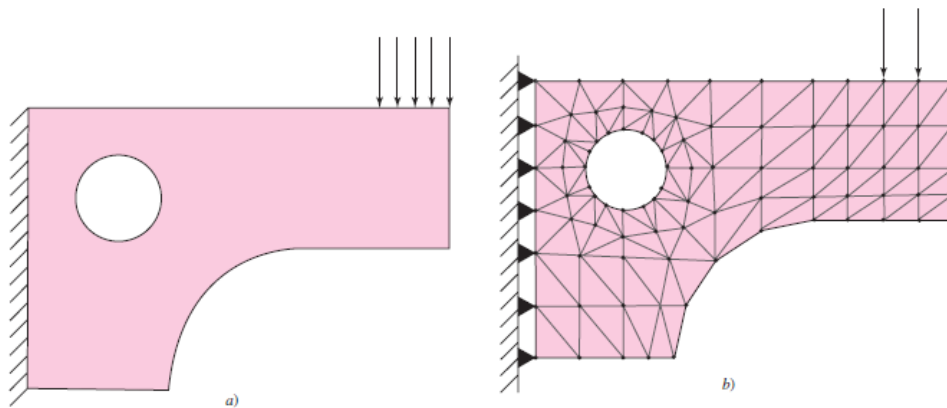
$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (6)$$

Donde la matriz de columna $\{F\}$ es el vector de fuerza nodal global que involucra a todos los elementos estructurales que conforman la geometría del objeto analizado, la matriz $[K]$ es la matriz de rigidez global o total de la estructura y la matriz de columna $\{d\}$ es el vector de grados de libertad nodales estructural conocidos o desconocidos [29].

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Así mismo la selección del tipo y tamaño del elemento finito, es una de las principales tareas del diseñador analista. Se debe considerar la ubicación y el momento de aplicar el refinamiento de los elementos en la malla con el fin de controlar las concentraciones de esfuerzos y obtener resultados útiles, así mismo, aplicar un incremento del tamaño donde la geometría no sufra cambios bruscos de sección ahorrando así recursos computacionales.

Gráfico 14. a) Modelo idealizado b) Método de elementos finitos.



FUENTE: DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY

AUTOR: RICHARD G. BUDYNAS, J. KEITH NISBETT, [2008]

La variación del tamaño de los elementos que conforman la geometría mostrada en el gráfico 14, presenta varias complicaciones dependientes del tipo y tamaño de elemento, se debe considerar que la distribución de estos, dependerá de la forma del modelo, la aplicación y dirección de la carga y restricciones o condiciones de contorno. Tomando en referencia los puntos anteriores se obtendrá la mejor opción para obtener una malla adecuada.

2.2.9.2. Análisis dinámico no lineal.

Partiendo de un análisis dinámico lineal en donde las cargas que se aplican dependen del tiempo, las velocidades y las aceleraciones, así como las fuerzas de inercia o amortiguamiento, da paso para la formulación de la ecuación general, la cual tiene el dominio de los análisis no lineales. A partir de la estructura de la Ecuación 6 del vector de la fuerza nodal, se incorporan las variables mencionadas formando la siguiente ecuación [30].

$$[M]\{\ddot{d}(t)\} + [C]\{\dot{d}(t)\} + [K]\{d(t)\} = \{F(t)\} \quad (8)$$

Donde:

$[K]$: Matriz de rigidez

$[C]$: Matriz de amortiguamiento

$[M]$: Matriz de la masa

$\{d(t)\}$: Vector de desplazamiento en función del tiempo

$\{\dot{d}(t)\}$: Vector velocidad en función del tiempo

$\{\ddot{d}(t)\}$: Vector de aceleración en función del tiempo

$\{F(t)\}$: Vector de fuerza en función del tiempo

En los estudios dinámicos no lineales, se sigue el mismo procedimiento llevando un control de iteración y terminación. En este análisis las ecuaciones de equilibrio del sistema dinámico en el paso de tiempo son:

$$[M]^{t+\Delta t}\{\ddot{d}\}^{(i)} + [C]^{t+\Delta t}\{\dot{d}\}^{(i)} + {}^{t+\Delta t}[K]^{(i)} {}^{t+\Delta t}[\Delta d]^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\{R\} - {}^{t+\Delta t}\{F\}^{(i-1)} \quad (9) [30].$$

Donde:

$[M]^{t+\Delta t}\{\ddot{d}\}^{(i)}$: Vector de las aceleraciones totales en la iteración (i)

$[C]$: Matriz de amortiguamiento

${}^{t+\Delta t}\{\dot{d}\}^{(i)}$: Vector de las velocidades totales en la iteración (i)

${}^{t+\Delta t}[K]^{(i)}$: Matriz de rigidez del sistema

${}^{t+\Delta t}[\Delta d]^{(i)}$: Vector de los desplazamientos totales en la iteración (i)

$t+\Delta t \{R\}$: Vector de cargas nodales de aplicación externa

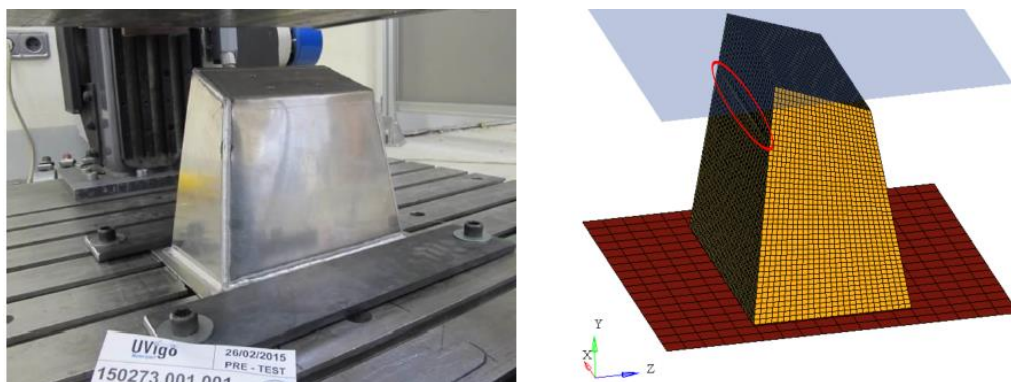
$t+\Delta t \{F\}^{(i-1)}$: Vector de fuerzas nodales generadas internamente en la iteración (i-1)

Como se identifica en los sistemas de ecuaciones anteriores los arreglos matriciales siguen la misma configuración involucrando a las matrices de rigidez, desplazamientos y fuerza. Así mismo al cambiar el modelo de estudio se añaden parámetros que juegan un rol importante en la interpretación del entorno físico y a su vez obtener una aproximación adecuada para la obtención de resultados mediante el análisis asistido por computadora.

2.2.10. Malla de elementos finitos.

Como se menciona en párrafos anteriores, la malla de elementos finitos consiste en discretizar el modelo en pequeñas partes las cuales se encuentran interconectadas por nodos. A su vez, existen variaciones de tipos de mallas que dependen de aplicaciones específicas con el fin de aprovechar los recursos computacionales disponibles y metodologías de solución más apropiadas. El mallado es un paso muy importante del análisis asistido por computadora, ya sea un proceso manual o automático el cual combinará los diferentes tipos de elementos sólidos o elementos en 3D, elementos de cáscara de 2D o elementos de viga de 1D. Así mismo se debe considerar que la precisión de la solución va a depender de la calidad de malla que se esté utilizando.

Gráfico 15. Malla de elementos finitos vs Modelo experimental.



FUENTE: MATHEMATICS

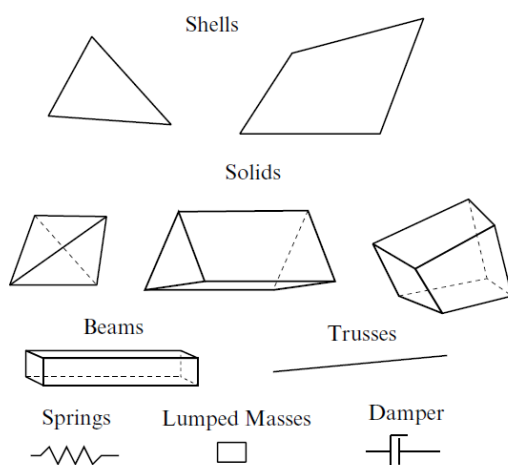
AUTOR: JOSÉ A. LÓPEZ-CAMPOS, JACOBO BALDONEDO, SOFÍA SUÁREZ, ABRAHAM SEGADÉ, ENRIQUE CASAREJOS, JOSÉ R. FERNÁNDEZ, [2020]

Cuanto menor sea el tamaño del elemento mayor será la precisión en los puntos críticos o concentradores de esfuerzo, a su vez el refinamiento excesivo de todo el modelo puede causar un problema al trabajar con bajo recurso computacional.

2.2.11. Tipos de elementos finitos.

Según el análisis a realizar, el método empleado para la solución o el proceso de diseño de los modelos a estudiar, se tendrá que seleccionar el o los elementos que conformarán la malla de elementos finitos dependiendo de su aplicación.

Gráfico 16. Tipos de elementos finitos.



FUENTE: LS-DYNA® KEYWORD USER'S MANUAL

**AUTOR: (LSTC), LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION,
[2018]**

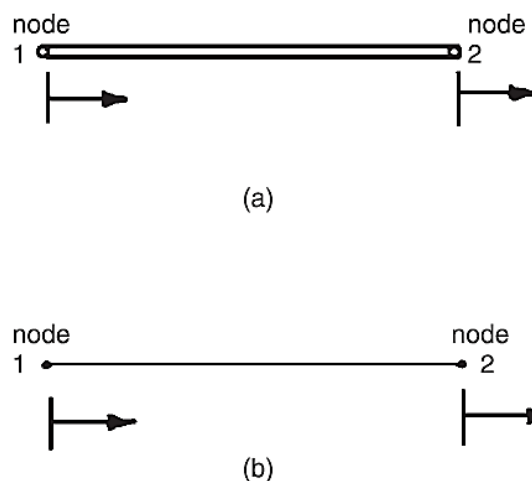
Como se muestra en la figura anterior existen varios tipos de elementos que se pueden utilizar en el análisis asistido por computadora, los cuales son de mucha ayuda dependiendo del estudio que se esté realizando. Cuando la pieza es un modelo sólido en la mayoría de los casos se utiliza los elementos de tipo sólido 3D, siempre y cuando el estudio que se esté realizando sea acorde a la temática. Para análisis de ensamble donde se encuentran en interacción varios cuerpos, existe la posibilidad de involucrar varios tipos de elementos finitos para cada rol del análisis. Este es el caso de los análisis de impacto, choques o colisiones entre cuerpos, para esto se debe especificar cuál será su comportamiento mecánico estructural con el fin de obtener respuestas de esfuerzos, deformaciones o desplazamientos adecuados.

Como se mencionó anteriormente, el tipo de análisis que se realiza define los tipos de elementos presentes en el estudio. Algunos elementos menos comunes como los Damper que representan los amortiguadores, los elementos tipo Springs siendo su representación la de un muelle o resorte y Lumped Masses que representan las masas agrupadas, están presentes en muchos casos relacionados con análisis de choques y vuelcos de vehículos, para lograr un entorno correcto se utilizan varios de estos elementos para la representación de las masas, centros de gravedad, cuerpos rígidos, cuerpos con amortiguación etc. Las formas, tamaños, número y configuraciones de los elementos deben elegirse cuidadosamente de modo que el cuerpo o dominio original se simule lo más fielmente posible sin aumentar el esfuerzo computacional necesario para la solución [31].

2.2.11.1. Elementos de tipo Beam 1D.

Este tipo de elementos son los más comunes en programas de análisis estructural, constan de sección transversal, pero se los representa con una línea recta. Además del cálculo de estructuras existen otras aplicaciones como el cálculo de distribución de temperaturas, distribución de presión en el flujo de tuberías, deformación de la barra por carga axial etc.

Gráfico 17. Elemento tipo Beam 1D.

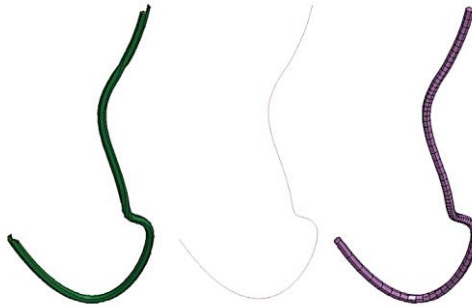


FUENTE: THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING

AUTOR: RAO, SINGIRESU S, [2005]

Si la geometría, las propiedades del material y la variable de campo del problema se pueden describir en términos de una sola coordenada espacial, podemos usar los elementos unidimensionales o lineales [31]. Así mismo se pueden encontrar representaciones más complejas de estos elementos de tipo viga como los que se muestran a continuación.

Gráfico 18. Representación de varilla hexagonal compleja con sección transversal y elementos tipo BEAM.

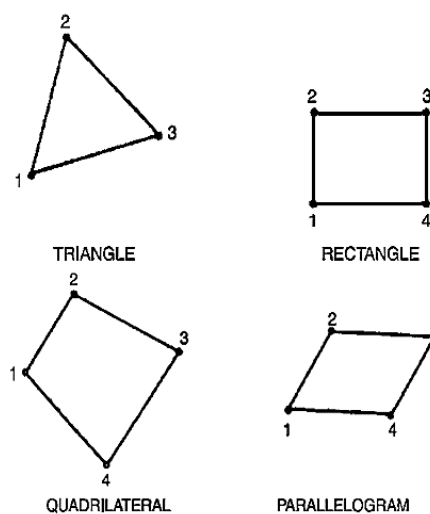


FUENTE: 13TH INTERNATIONAL LS-DYNA USERS CONFERENCE
AUTOR: RYAN ALBERSON, DAVID STEVENS, JAMES D. WALKER, TOM
MOORE, [2014]

2.2.11.2. Elementos de tipo Shell 2D.

Cuando la configuración y otros detalles del problema se pueden describir en términos de dos coordenadas espaciales independientes, podemos usar los elementos bidimensionales. El elemento básico útil para el análisis bidimensional es el elemento triangular. Aunque se puede obtener un elemento cuadrilátero (o sus formas especiales, rectángulo y paralelogramo) ensamblando dos o cuatro elementos triangulares. en algunos casos el uso de elementos cuadriláteros (o rectángulo o paralelogramo) resulta ser ventajoso [31].

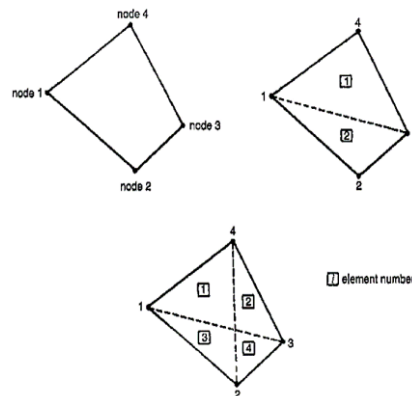
Gráfico 19. Elementos tipo Shell 2D.



FUENTE: THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING
AUTOR: RAO, SINGIRESU S, [2005]

Para algunos casos de análisis la implementación de mallas de elementos finitos con elementos tipo Shell es de gran utilidad para el modelado de superficies que carecen de grandes espesores, algunos de los ejemplos más sencillos para esta aplicación son las chapas metálicas y miembros estructurales de carrocerías, así mismo algunos elementos de protección que integran la estructura de protección.

Gráfico 20. Elemento cuadrilátero como conjunto de elementos triangulares.

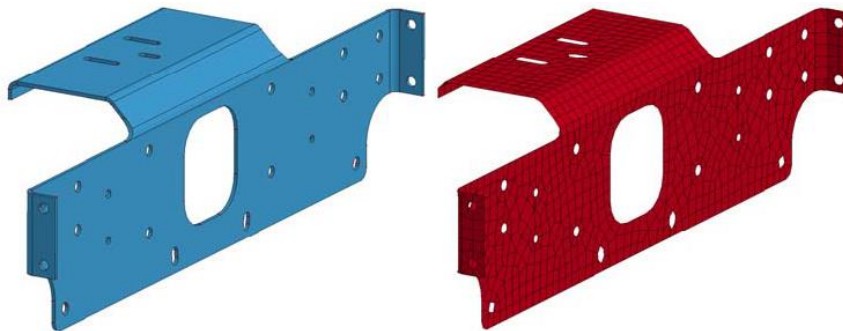


FUENTE: THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING

AUTOR: RAO, SINGIRESU S, [2005]

Estos elementos de superficie también conocidos como elementos 2D además de las aplicaciones mencionadas, estos pueden ser utilizados para el análisis de componentes diversos. Su función principal es la representación de los modelos reales para la obtención de resultados apropiados, teniendo en cuenta el principio del análisis asistido por computadora, teniendo en cuenta que al utilizar este tipo de elementos se simplifica el modelo real evitando el alto consumo computacional.

Gráfico 21. Chapa modelo CAD con representación de elemento de tipo cáscara.



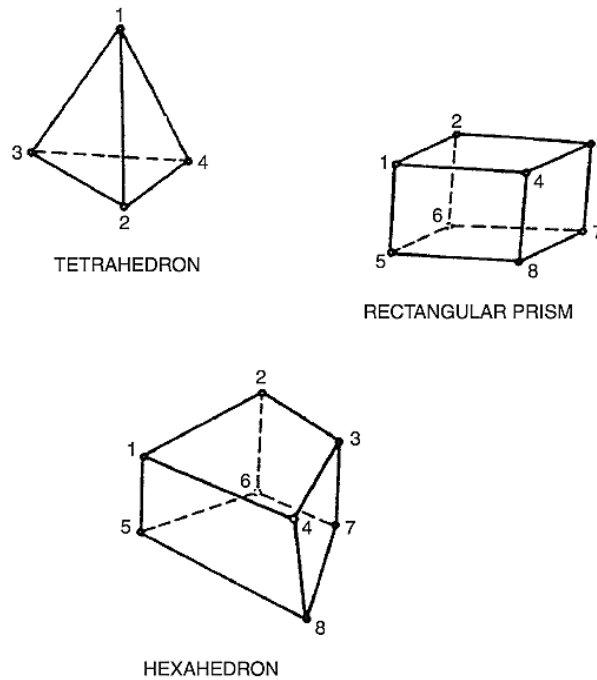
FUENTE: THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING

AUTOR: RAO, SINGIRESU S, [2005]

2.2.11.3. Elementos de tipo Solid 3D.

Si la geometría, las propiedades del material y otros parámetros del cuerpo pueden describirse mediante tres coordenadas espaciales independientes, podemos idealizar el cuerpo utilizando los elementos tridimensionales [31].

Gráfico 22. Elementos de tipo sólido 3D

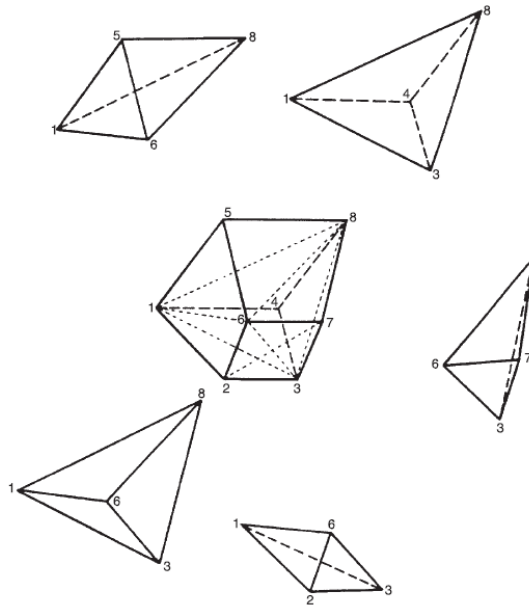


FUENTE: THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING

AUTOR: RAO, SINGIRESU S, [2005]

El elemento tridimensional básico, análogo al elemento triangular en el caso de problemas bidimensionales, es el elemento tetraedro. En algunos casos, el elemento hexaedro, que se puede obtener ensamblando cinco tetraedros se puede usar de manera ventajosa. Algunos problemas, que en realidad son tridimensionales, pueden describirse con solo una o dos coordenadas independientes. Estos problemas se pueden idealizar utilizando un eje simétrico o de tipo anillo de elementos. Los problemas que poseen simetría axial, como pistones, tanques de almacenamiento, válvulas, toberas de cohetes y escudos térmicos de vehículos de reentrada, entran en esta categoría [31].

Gráfico 23. Un elemento hexaedro como ensamblaje de cinco elementos tetraedro.



FUENTE: THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING

AUTOR: RAO, SINGIRESU S, [2005]

En muchos casos y como se menciona los elementos tipo sólido 3D, son utilizados para el mallado de cuerpos complejos en donde el tamaño de los elementos de malla tendrá que ir variando para alcanzar una discretización buena para la obtención de resultados.

Algunas de sus aplicaciones en las que se emplea a parte de los cuerpos sólidos es el campo de los fluidos en donde rigen ecuaciones distintas y los análisis varían según su necesidad.

2.2.12. Criterios de aceptación de malla de elementos finitos.

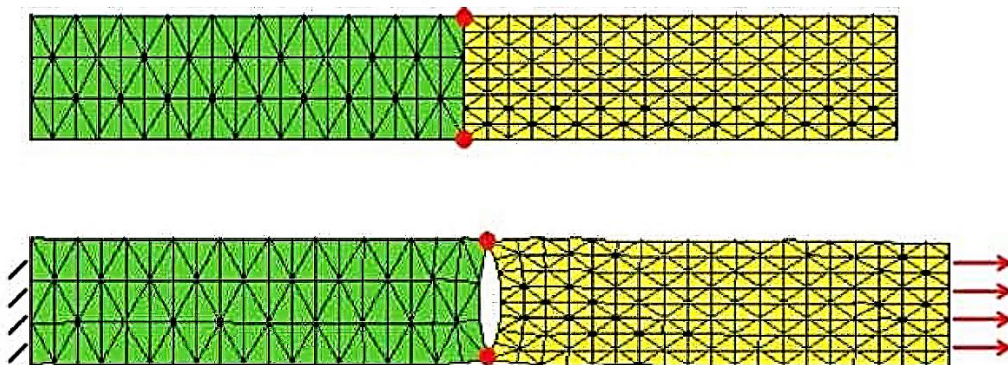
Una malla de elementos finitos es óptima si se obtiene como resultado de aplicar ciertos criterios preestablecidos de forma que en su solución se logren los valores de error determinados previamente. Partiendo de diferentes criterios se pueden elaborar diferentes estrategias o procedimientos para obtener una malla óptima resultando que una malla que es óptima bajo ciertos criterios puede no serlo para otros [32]. A veces, es ventajoso o necesario combinar diferentes tipos de elementos en una malla. Por ejemplo, las formas “voluminosas” pueden combinarse con elementos sólidos y las paredes delgadas con elementos de carcasa. Sin embargo, el uso de diferentes tipos de elementos en la misma malla plantea el problema de la compatibilidad de la malla [33].

La relación que tienen los diferentes tipos de elementos es un punto clave para que la compatibilidad de malla sea apropiada. Se debe considerar que la solución de las mallas difiere según el método, criterios o índices de calidad utilizados en los programas CAE, así mismo para los procesos de discretización y la asignación de los elementos.

2.2.12.1. Compatibilidad de los elementos de malla.

Dos elementos son compatibles si se produce un campo de desplazamiento continuo a través del borde de los elementos. Dependiendo del tipo de elemento, este borde puede ser de cara (elemento sólido), borde (armazón 3D y placa 2D) o punto (elemento de viga). Debe considerarse que un "campo de desplazamiento continuo" significa que los seis componentes de desplazamiento (tres traslaciones y tres rotaciones) también son continuos. Esto requiere que las funciones de interpolación de desplazamiento que describen los desplazamientos en los bordes o caras de elementos vecinos sean idénticas. Si los elementos son del mismo tipo y comparten los nodos correspondientes, esta condición se satisface, de lo contrario, el desplazamiento es discontinuo a través del borde de los elementos de conexión [33].

Gráfico 24. Malla incompatible.



FUENTE: FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR DESIGN ENGINEERS

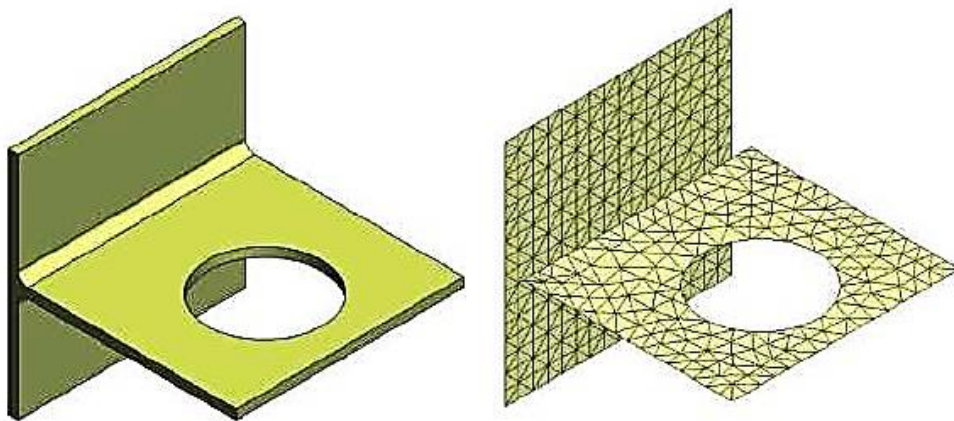
AUTOR: KUROWSKI, PAUL M, [2017]

Generalmente esta irregularidad ocurre por una compatibilidad deficiente entre las caras bordes o aristas y vértices de los elementos que dan forma a la geometría del modelo. Al realizar el proceso de mallado sin una previa revisión, limpieza y tratamiento de la geometría, esto provocará que no se genere la conexión entre los componentes que forman el modelo. Sin embargo, esto no es una regla general, para modelos únicos como las piezas mecánicas, componentes de máquinas u objetos sólidos de estudio, la conectividad se reduce a un solo cuerpo que estará mallado de tal forma que los elementos finitos estarán conectados entre sí.

Asu vez los modelos de ensamble como las estructuras metálicas, bastidores de carrocerías o estructuras de protección necesitan un tratamiento previo para garantizar que su topología sea compartida entre los elementos que forman su estructura. Con el fin de aprovechar los recursos computacionales se crean estrategias con el fin de adaptar el modelo real a un modelo virtual. Este es el caso de los elementos estructurales unidos por soldadura, se tiene conocimiento que para análisis más específicos es posible modelar esas condiciones de trabajo, aunque el consumo computacional tiende a ser elevado.

La implementación del concepto de topología compartida en los análisis de ensamble de las estructuras metálicas, que se encuentran unidas a través de bordes a caras, permite modelar la condición de unión entre elementos estructurales. Así mismo, se logra una malla donde los cuerpos se encuentren combinados y puedan interactuar al ser sometidos a cargas transmitiendo las fuerzas y desplazamientos.

Gráfico 25. Geometría CAD representada por malla de elementos incompatibles.

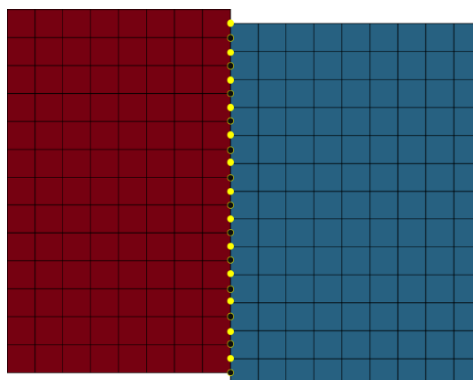


FUENTE: FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR DESIGN ENGINEERS

AUTOR: KUROWSKI, PAUL M, [2017]

Para ilustrar este ejemplo se tomará en consideración dos modelos CAD. Se creará la malla de elementos finitos para el modelo 1 sin una previa preparación de la geometría y poder observar la diferencia que este tendrá respecto al modelo 2 que cumple con el concepto de topología compartida creando una unión entre sus componentes.

Gráfico 26. Modelo 1 sin topología compartida.

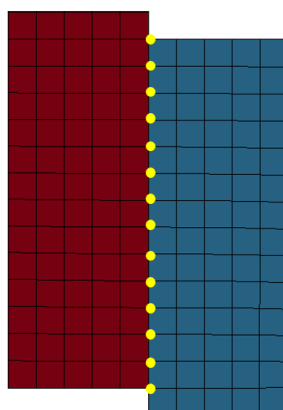


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en la gráfica, ambas partes constan de la malla de elementos finitos, pero sin compartir su topología. Esto indica claramente la falta de unión entre los nodos de la parte de color azul y la parte de color rojo, provocando que al ser sometido a la solución las posibilidades de que falle el análisis sean elevadas, a su vez, puede presentar errores de interferencia entre cuerpos causando que los elementos no puedan transmitir las fuerzas o desplazamientos entre sí.

Gráfico 27. Modelo 2 con topología compartida.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Contrario al modelo 1, el modelo 2 presenta una unión entre los nodos de los elementos adyacentes de un cuerpo con el otro, creando la topología compartida entre las partes. Esto permite crear un entorno aproximado a la realidad causando que, al ser sometido un miembro estructural a una carga determinada, este podrá transmitir las fuerzas y desplazamientos al otro miembro común.

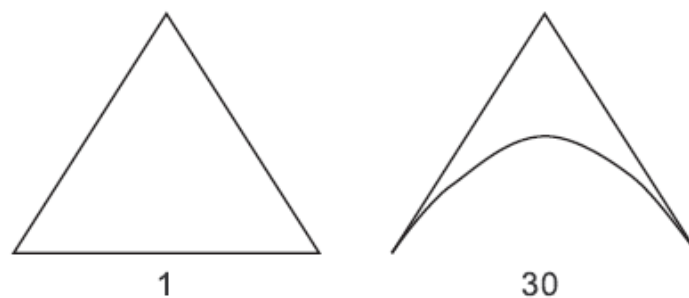
2.2.12.2. Índices de calidad de malla.

La importancia de obtener resultados favorables depende muchas veces de una malla de elementos finitos eficiente, es por esta razón que los índices de calidad de malla juegan un rol importante para determinar la idoneidad de los elementos. Existen varios índices de calidad de malla, la aplicación dependerá del programa CAE y la metodología que el diseñador analista utilice, a continuación, se mencionan algunos de estos índices más utilizados.

- Element Quality (Calidad de elementos)
- Aspect Ratio (Relación de aspecto)
- Jacobian Ration (Relación del Jacobiano)
- Skewness (Oblicuidad)
- Warping Factor (Factor de deformación)
- Parallel Deviation (Desviación paralela)
- Maximum Corner Angle (Ángulo máximo de esquinas)
- Orthogonal Quality (Calidad ortogonal)

Existen varios tipos de índices de calidad de malla, aunque dependiendo de su aplicación estos serán utilizados. Para casos prácticos se detallará el índice de calidad de malla de relación Jacobiano por su fácil interpretación y aplicación.

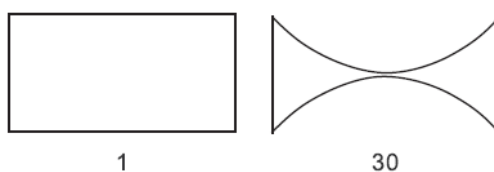
Gráfico 28. Coeficiente Jacobiano para triángulos.



FUENTE: ANSYS MESHING USER'S GUIDE

AUTOR: ANSYS, INC, [2010]

Gráfico 29. Coeficiente Jacobianos para cuadriláteros.



FUENTE: ANSYS MESHING USER'S GUIDE

AUTOR: ANSYS, INC, [2010]

El coeficiente Jacobiano indica la medida de desviación de un elemento en referencia a un elemento ideal. Estos valores van desde -1 a 1 donde 1 representa una calidad de elemento excelente e inaceptable para -1, a su vez, cuando el coeficiente jacobiano se aproxima a cero el elemento tiende a deformarse provocando un elemento de mala calidad. Como se muestra en los gráficos, la interpretación que realizan algunos programas CAE para revisar la calidad de malla son los porcentajes, para este caso en especial se toma el valor de 1 como el 100% representando el tamaño del elemento perfecto mientras que cuando este valor disminuye y se aproxima a cero la calidad del elemento es ineficiente, el valor del coeficiente jacobiano mínimo utilizado es del 30%.

2.2.13. Aplicación de software en el trabajo de investigación.

2.2.13.1. Software para modelado 3D.

En el camino a realizar cualquier análisis de simulación de ingeniería asistida por computadora de sus siglas en inglés CAE, se debe partir de un boceto en 2D con la representación del modelo que se quiere lograr. Al pasar de la idea del dibujo a un modelo tridimensional se puede obtener varias ventajas tanto para la conceptualización, análisis de simulación, validación, fabricación y control de calidad del diseño planteado.

2.2.13.2. SOLIDWORKS.

La aplicación SOLIDWORKS® es un software de automatización de diseño mecánico que aprovecha la conocida interfaz de usuario gráfica Microsoft® Windows®. Esta herramienta de fácil aprendizaje hace posible para los diseñadores mecánicos croquizar con rapidez sus ideas, experimenten con operaciones y cotas, y produzcan modelos y dibujos detallados. SOLIDWORKS 3DS, una marca de Dassault Systèmes, es líder mundial en soluciones 3D que contribuyen al éxito de millones de ingenieros y diseñadores a través de la innovación [34].

2.2.13.3. Software para el procesamiento.

Existe una preparación previa antes de realizar un análisis o simulación por medio de los elementos finitos, así mismo existen muchos programas encargados de realizar el procesamiento del modelo de estudio para lograr simular las condiciones más aproximadas a la realidad y obtener resultados óptimos para ser utilizado en la industria. Sabiendo que estos procedimientos son utilizados frecuentemente queda a elección del diseñador analista la elección del software más adecuado que cumpla con sus necesidades según su campo de acción.

Actualmente existen programas que involucran todos los aspectos de ingeniería para el desarrollo de un producto partiendo desde el CAD, CAM y CAE, las desventajas que estos presentan son las limitadas opciones para análisis y recursos computacionales para ser utilizados. Es por esto que para la presente investigación se utilizara el software CAE, con la finalidad de obtener el máximo aprovechamiento de las herramientas con los recursos disponibles.

LS-PREPOST es el preprocesador que realiza la preparación del modelo partiendo desde la preparación y limpieza de la geometría, creación de la malla de elementos finitos y la asignación de condiciones de contorno para su posterior solución. Al ser resuelto el código que define el problema de análisis, este preprocesador muestra los resultados obtenidos, desde los más comunes como deformación, desplazamientos y esfuerzos de Von Mises hasta resultados más explícitos como aceleraciones, velocidades, fuerzas, etc.

2.2.13.4. Software de solución.

En la actualidad existe una gran variedad de softwares que realizan el cálculo para la solución de los problemas de ingeniería, es por esta razón que debe tomarse en consideración cuál es la opción más adecuada para el campo de aplicación en la cual se realiza el análisis.

2.2.13.5. LS-DYNA.

LS-DYNA es un código de elemento finito de propósito general para analizar la respuesta estática y dinámica de deformación de las estructuras, incluidas las estructuras acopladas a fluidos. La metodología principal de la solución se basa en la integración explícita del tiempo. Un solucionador implícito está actualmente disponible con capacidades algo

limitadas, incluyendo análisis estructural y transferencia de calor. Un algoritmo de impacto de contacto permite tratar fácilmente los problemas de contacto difíciles con la transferencia de calor incluida en las interfaces de contacto [35].

El propósito de este software es proporcionar las herramientas para el cálculo avanzado del análisis estructural no lineal empleando un código para la solución de multiprocesamiento, así como la simulación multifísica, teniendo un alcance considerable a las aplicaciones como:

- Seguridad de peatones y choques de automóviles.
- Manufactura de piezas automotrices.
- Simulación de procesos de manufactura.
- Aplicaciones en el campo de la medicina.
- Pruebas de choque e impacto.
- Ingeniería sísmica.
- Aeronáutica

Generalmente para llegar a la solución de un problema se necesita un Pre-proceso previo en la cual se definirán los parámetros para la simulación deseada y de esta forma funcione adecuadamente y se puedan obtener los resultados deseados. Por esta razón LS-DYNA cuenta con un preprocesador con una amplia gama de opciones capaces de replicar los fenómenos reales en simulaciones computacionales. A diferencia de otros programas CAE, LS-DYNA utiliza un código para la solución del problema que se esté ejecutando. Este código está definido por una serie de comandos o palabras clave conocidas como KEYWORD las cuales son las responsables de definir los parámetros que el usuario considere necesario para el análisis que esté realizando.

Existen una gran variedad de comandos que definen el comportamiento de la simulación, a continuación, se mencionan los comandos o KEYWORD generales necesarios para la ejecución de un análisis.

- *CONTROL_TERMINATION
- *CONTACT
- *CONSTRAINED
- *NODE

- *ELEMENT
- *SECTION
- *LOAD
- *MAT
- *DATABASE_BINARY_D3PLOT

Estos comandos se encargan de asignar propiedades como materiales, secciones, contactos entre elementos, cargas, restricciones, tipo de elementos finitos y tiempo de ejecución del análisis a las partes importadas del modelo CAD las cuales son preparadas para el proceso de simulación. Así mismo se debe considerar que la cantidad de KEYWORD puede variar dependiendo del análisis realizado. Así mismo este programa integra su conjunto de unidades para evitar errores a la hora de obtener los resultados.

Gráfico 30. Unidades consistentes.

Mass	Length	Time	Force	Stress	Energy	Density Steel	Young's	Gravity
kg	m	s	N	Pa	J	7,800	2.07e+9	9.806
g	mm	ms	N	MPa	N-mm	7.83e-03	2.07e+05	9.806e-03
kg	mm	ms	kN	GPa	kN-mm	7.83e-06	2.07e+02	9.806e-03
Ton (1,000 kg)	mm	s	N	MPa	N-mm	7.83e-09	2.07e+05	9.806e+03
Lbf-s ² /in (snail)	in	s	lbf	psi	lbf-in	7.33e-04	3.00e+07	386

FUENTE: LS-DYNA® ANALYSIS FOR STRUCTURAL MECHANICS

AUTOR: ENGINEERING, PREDICTIVE, [2018]

2.2.14. Métodos para la selección de materiales.

2.2.14.1. Metodología Ashby.

Tabla 3. Propiedades de los materiales.

Clase	Propiedad	Simbología y unidades SI	
General	Costo	C_m	$\left(\frac{\$}{\text{kg}}\right)$
	Densidad	ρ	$\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$
Mecánica	Módulos elásticos (Young, Cizallamiento, Compresibilidad)	E, G, K	(GPa)
	Esfuerzo (Fluencia, Último, Fractura)	$\sigma_y, \sigma_u, \sigma_f$	(MPa)
	Tenacidad	G_c	$\left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}\right)$
	Tenacidad a la fractura	K_{Ic}	$\left(\text{MPa m}^{\frac{1}{2}}\right)$
	Límite de fatiga	σ_e	(MPa)
Térmica	Conductividad térmica	λ	$\left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)$
	Difusividad térmica	a	$\left(\frac{\text{m}^2}{\text{seg}}\right)$
	Calor específico	C_p	$\left(\frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right)$
	Punto de fusión	T_m	(K)
	Dilatación térmica	α	(°K ⁻¹)
	Resistencia al choque térmico	C	(°K)
Desgaste	Ecuación de Archard	ka	(MPa ⁻¹)
Corrosión	Tasa de corrosión	K	$\left(\frac{\text{mm}}{\text{años}}\right)$
Oxidación	Tasa de constante parabólica	K_p	$\left(\frac{\text{m}^2}{\text{seg}}\right)$

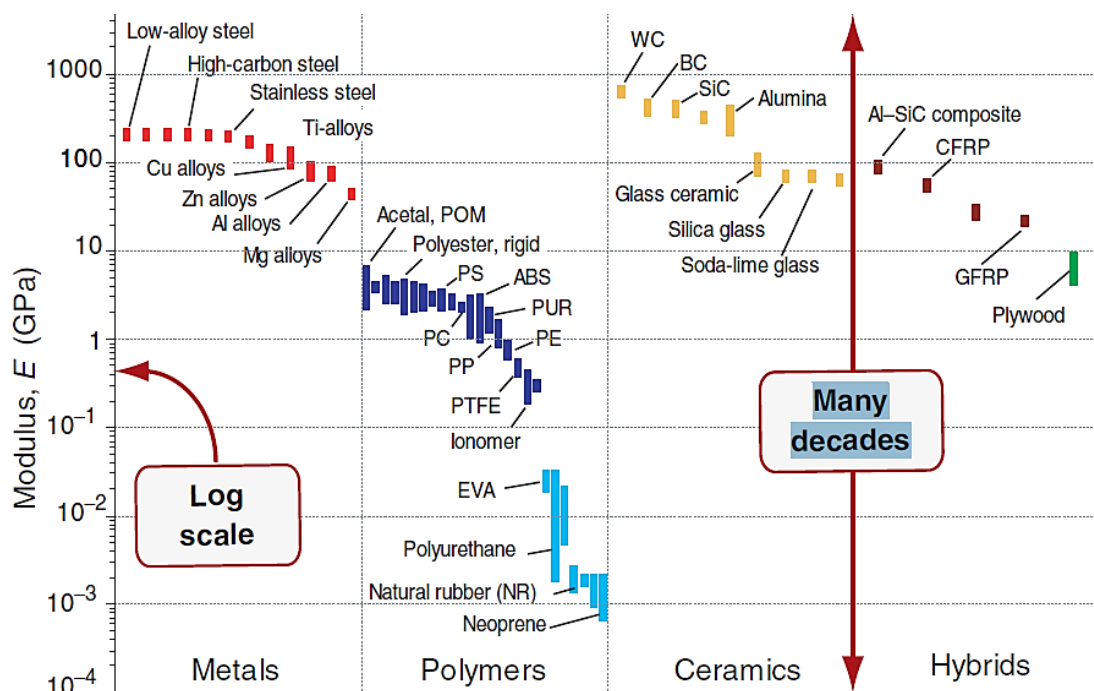
FUENTE: MATERIALS SELECTION IN MECHANICAL DESIGN

AUTOR: ASHBY, MICHAEL F, [1999]

La metodología Ashby en la actualidad y gracias al avance tecnológico en las bases de datos de materiales digitales, permite un extenso universo de opciones, mejorando las posibilidades de analizar las propiedades entre sí y obtener un resultado eficaz al decidir la alternativa más adecuada para el análisis de diseño.

El método fue diseñado exclusivamente para ser utilizado durante la etapa conceptual de la selección de materiales. En estos mapas se puede hacer una aproximación del material más adecuado (perteneciente a una determinada familia de materiales), con base en la relación de las propiedades más importantes que debe poseer el componente [36].

Gráfico 31. Gráfico de familias para materiales respecto al módulo de elasticidad

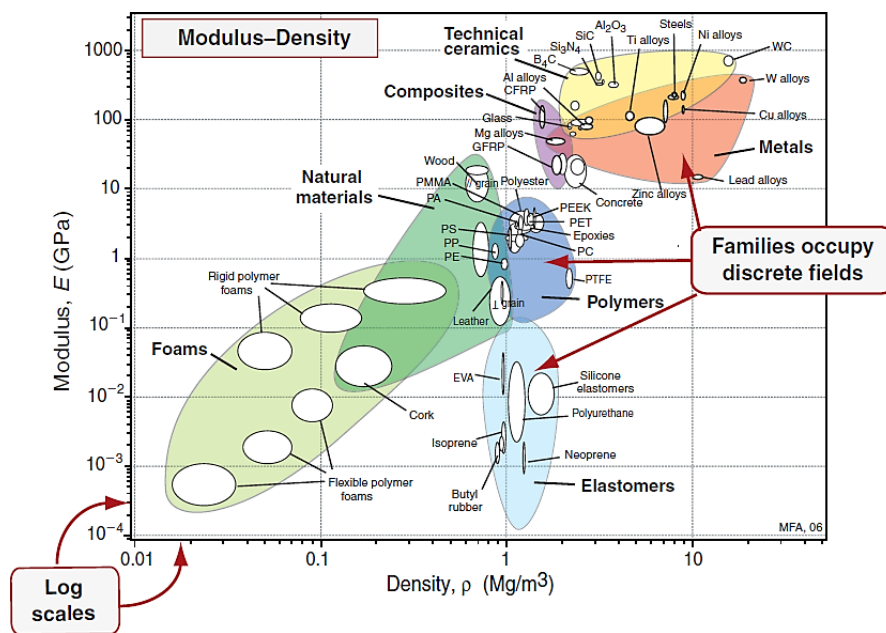


FUENTE: MATERIALS ENGINEERING, SCIENCE, PROCESSING AND DESIGN

AUTOR: MICHAEL ASHBY, HUGH SHERCLIFF, DAVID CEBON, [2007]

Este método utiliza los mapas a partir de gráficos en los cuales se relacionan las propiedades físicas, mecánicas y funcionales de los materiales. Existen varias formas de visualización para este método, los tipos de formas más comunes de visualización son de barras, como se muestra anteriormente y de burbujas respecto a una propiedad o propiedades específicas.

Gráfico 32.Un gráfico de burbujas de módulo y densidad.



FUENTE: MATERIALS ENGINEERING, SCIENCE, PROCESSING AND DESIGN

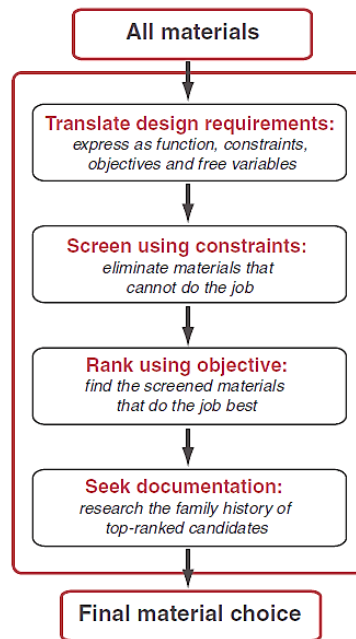
AUTOR: MICHAEL ASHBY, HUGH SHERCLIFF, DAVID CEBON, [2007]

La selección implica buscar la mejor correspondencia entre los perfiles de atributos de los materiales y procesos, teniendo en cuenta que estos deben ser compatibles entre sí, y los requeridos por el diseño [37].

La principal estrategia aplicada para la selección de materiales, engloba cuatro pasos generales los cuales ayudarán a traducir, seleccionar, clasificar y documentar cada opción disponible de propiedades y materiales. En la primera etapa se traducen los requerimientos de diseño para seleccionar el material, identificando necesariamente las limitaciones y los objetivos que el diseño analizado deba cumplir. En esta primera etapa se tiene en consideración las propiedades que limitan el diseño como las restricciones que deben cumplirse, esto se traduce en las siguientes preguntas las cuales dependen de la función, restricción, objetivo y variables libres respectivamente.

- ¿Qué función realiza el modelo?
- ¿Cuáles son los requisitos necesarios que tienen que cumplirse?
- ¿Qué características se deben mejorar?
- ¿Cuáles son las condiciones que el diseñador puede modificar?

Gráfico 33. Estrategia aplicada para la selección de materiales.



FUENTE: MATERIALS ENGINEERING, SCIENCE, PROCESSING AND DESIGN

AUTOR: MICHAEL ASHBY, HUGH SHERCLIFF, DAVID CEBON, [2007]

Como se menciona anteriormente y se ilustra en el gráfico, se deben seguir una serie de etapas para cumplir con los requisitos adecuados en una selección de materiales. La aparición de filtros que en conjunto con las restricciones limitarán el paso a la siguiente etapa a los materiales que no cumplan los objetivos de diseño.

Para la segunda etapa se eliminarán los materiales que no puedan cumplir con las limitaciones y restricciones asignadas a las propiedades de los materiales de estudio. A su vez, seguido de una clasificación de los materiales que cumplan con los requerimientos gracias a sus características, para así cumplir con un criterio en específico.

La tarea final es explorar en profundidad a los candidatos más prometedores, examinando cómo se utilizan en la actualidad, cuál es la mejor forma de diseñar con ellos, historias de casos de fallos y un paso que llamamos documentación [37].

Tabla 4. Restricciones y Objetivos Comunes.

Restricciones comunes	Objetivos comunes
Cumplir con un valor objetivo de:	Minimizar:
Rigidez	Costo
Resistencia	Masa
Resistencia a la fractura	Volumen
Conductividad térmica	Impacto en el medio ambiente
Resistividad eléctrica	Pérdida de calor
Remanencia magnética	Maximizar:
Transparencia óptica	Almacenamiento de energía
Coste	Flujo de calor
Masa	

**FUENTE: MATERIALS ENGINEERING, SCIENCE, PROCESSING AND
DESIGN**

AUTOR: MICHAEL ASHBY, HUGH SHERCLIFF, DAVID CEBON, [2007]

2.2.14.2. Selección asistida por computadora.

Los gráficos brindan una descripción general, pero la cantidad de materiales que se pueden mostrar en cualquiera de ellos es obviamente limitada. La selección que se utiliza es práctica cuando hay muy pocas restricciones, pero cuando hay muchas, ya que generalmente es complicado verificar que un material dado cumpla con todas ellas. Ambos problemas se superan mediante una implementación informática del método [37].

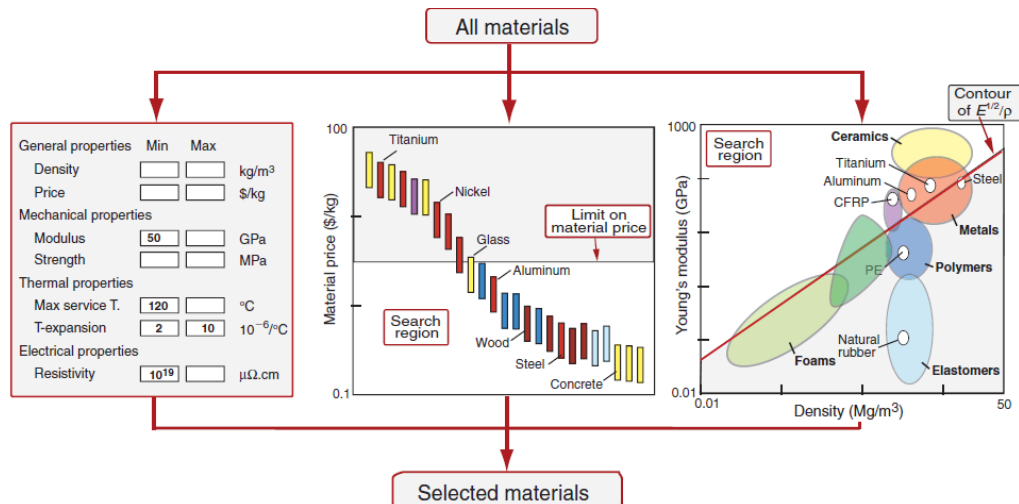
El software de selección de materiales y procesos CES contiene una extensa base de datos en las cuales se presentan registros de los materiales, mostrando datos, rangos y valores típicos para las propiedades, así como su documentación, siendo ideal para la selección de materiales en la industria. Se presenta una interfaz gráfica para la consulta de atributos de las propiedades del universo de materiales que se están evaluando para su posterior selección, donde se ingresan los rangos de valores para una propiedad específica, es así que el motor de búsqueda rechaza toda opción que no se encuentre dentro de los límites deseados.

El diagrama de barras construido automáticamente por la biblioteca de materiales del programa según los límites planteados, son formas tanto de aplicar restricciones como de clasificación. Como se muestra en el siguiente gráfico, en el diagrama de barras se traza una línea o un rectángulo cuyos bordes se encuentran en los límites restringidos de la propiedad

o propiedades como se aprecia en el diagrama de burbujas. Los materiales que se encuentren fuera de estos límites indican que no cumplen con las restricciones y serán eliminados.

Para la clasificación de estos materiales y partiendo de una previa asignación de todas las restricciones, se colocará una línea de índice en la cual solo aparecerán los mejores materiales clasificados que cumplen con los requerimientos antes mencionados.

Gráfico 34. Selección asistida por ordenador mediante el software CES.



FUENTE: MATERIALS ENGINEERING, SCIENCE, PROCESSING AND DESIGN

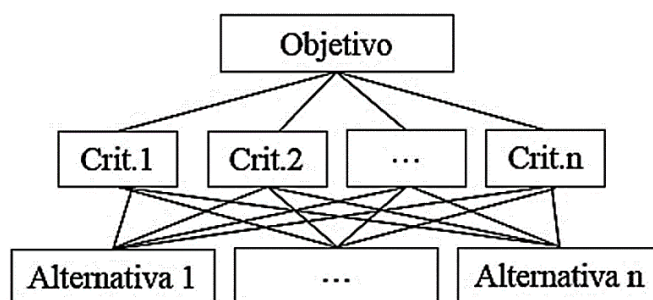
AUTOR: MICHAEL ASHBY, HUGH SHERCLIFF, DAVID CEBON, [2007]

2.2.14.3. Proceso Analítico Jerárquico AHP.

Mediante la aplicación de este método, los problemas complejos podrían descomponerse en jerarquías específicas, por lo que el análisis incluirá aspectos cuantitativos y cualitativos del problema. AHP conecta todos los niveles de la jerarquía, lo que permite reconocer cómo el cambio de un criterio afecta a los demás criterios y alternativas [38]. El método AHP es muy flexible porque produce una forma sencilla de encontrar la relación entre criterios y alternativas. Este método y, por lo tanto, para evaluar la relevancia de los criterios en el mundo real y determinar la interacción entre los criterios, en caso de problemas complejos con muchos criterios y un número relativamente grande de alternativas [38].

La estructura jerárquica es una representación gráfica del problema a modo de jerarquía, con el objetivo en la cúspide, las alternativas en el escalón inferior, y los criterios en el nivel (o niveles) intermedios [39].

Gráfico 35. Estructura Jerárquica



FUENTE: INGENIARE. REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA

AUTOR: ADEL MENDOZA, CRISTIAN SOLANO, DANIEL PALENCIA, DAVID GARCIA, [2019]

AHP descompone un problema complejo en jerarquías, donde cada nivel es descompuesto en elementos específicos. El objetivo principal se coloca en el primer nivel, los criterios, subcriterios y alternativas de decisión se listan en los niveles descendientes de la jerarquía. Para este método, la comparación de las diferentes alternativas y la comparación de sus diferentes criterios dan lugar a una matriz cuadrada denominada matriz de comparación pareada [40]. Las condiciones de reciprocidad que esta matriz debe cumplir son:

- Si $a_{ij} = x$ entonces $a_{ji} = \frac{1}{x}$
- Si i y j son igualmente importantes $a_{ij} = a_{ji} = 1$
- Si $a_{ii} = 1$ par todo i

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Como se indica los valores recíprocos de la comparación son ubicados en la a_{ji} de la matriz A , con la finalidad de la consistencia de la matriz. A su vez se debe calcular el índice de consistencia que está representado por la siguiente expresión [40].

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

Donde:

$\lambda_{\max}$: es el máximo autovalor de A.

n: es la dimensión de la matriz de decisión.

Una vez calculado el índice de consistencia, se obtiene la relación de consistencia RC para verificar la calidad de los juicios, la relación de consistencia se representa con la siguiente ecuación [40].

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (12)$$

RC está en función de IA el cual es denominado como índice aleatorio. El RC es una medida de la relación del error cometido por el decisor y el error aleatorio, este debe ser menor al 0,1 ó 10% [40].

$$IA = \frac{1,98(n - 2)}{n} \quad (13)$$

A continuación, se muestra la escala fundamental de comparación por pares propuesta por Thomas L. Saaty, para la valoración de los juicios de la matriz A.

Gráfico 36. Escala para comparaciones pareadas.

VALOR	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

FUENTE: PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS, AHP)

AUTOR: PIQUERAS, VÍCTOR YEPES, [2018]

Gráfico 37. Índice aleatorio.

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

**FUENTE: PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (ANALYTIC HIERARCHY
PROCESS, AHP)**

AUTOR: PIQUERAS, VÍCTOR YEPES, [2018]

Los valores que se muestran en el gráfico anterior corresponden al índice aleatorio IA de la Ecuación 13. Los valores de la relación de consistencia RC dependen del tamaño de la matriz n para lo cual se obtienen los siguientes valores.

Gráfico 38. Porcentajes máximos de la relación de consistencia

Tamaño de la matriz (n)	Ratio de consistencia
3	5%
4	9%
5 o mayor	10%

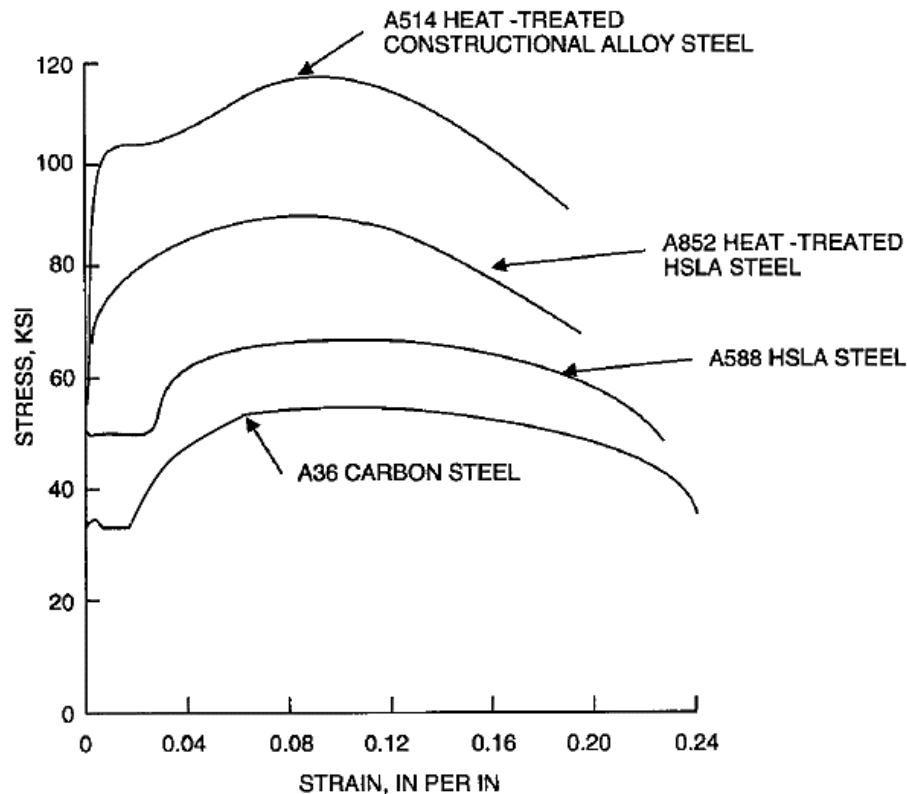
**FUENTE: PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (ANALYTIC HIERARCHY
PROCESS, AHP)**

AUTOR: PIQUERAS, VÍCTOR YEPES, [2018]

2.2.14.4. El acero como material de estudio.

El acero es un material extremadamente versátil disponible en una amplia gama de propiedades y composiciones químicas para adaptarse a todos los campos de la tecnología [41]. En el siguiente Gráfico se ilustra las curvas típicas de esfuerzo deformación para los aceros según su clasificación, en los cuales se presentan los niveles de resistencia reflejando las propiedades mínimas requeridas.

Gráfico 39. Curvas típicas de tensión-deformación para aceros estructurales.



FUENTE: STRUCTURAL STEEL DESIGNER'S HANDBOOK

AUTOR: BROCKENBROUGH, ROGER L.

Los aceros para usos estructurales pueden clasificarse por composición química, propiedades de tracción y método de fabricación como aceros al carbono, aceros de baja aleación de alta resistencia (HSLA), aceros al carbono tratados térmicamente y aceros aleados para la construcción tratados térmicamente [42]. La disponibilidad de esta amplia gama de resistencias mínimas especificadas, así como otras propiedades del material, permite al diseñador seleccionar un material económico que realizará la función requerida para cada aplicación [42].

Aceros al carbono.

Algunos de los tipos de aceros deben presentar ciertas características en su composición química para considerarse de esta categoría. El acero más común según la denominación ASTM es el A36 el cual es principal acero al carbono con aplicaciones estructurales variadas presentando un mínimo límite elástico en todos sus miembros estructurales de 36 ksi.

Aceros de alta resistencia y baja aleación.

Aquellos aceros que tienen puntos de fluencia mínimos especificados superiores a 40 ksi y alcanzan esa resistencia en la condición de laminado en caliente, en lugar de por tratamiento térmico, se conocen como aceros HSLA. Debido a que estos aceros ofrecen una mayor resistencia a incrementos moderados de precio sobre los aceros al carbono, son económicos para una variedad de aplicaciones [42].

Aceros al carbono tratados térmicamente y aceros HSLA.

Tanto los aceros al carbono como los aceros HSLA se pueden tratar térmicamente para proporcionar puntos de fluencia en el rango de 50 a 75 ksi. Esto proporciona un nivel de resistencia intermedio entre los aceros HSLA laminados y los aceros de aleación para construcción tratados térmicamente [42].

Aceros de aleación para construcción tratados térmicamente.

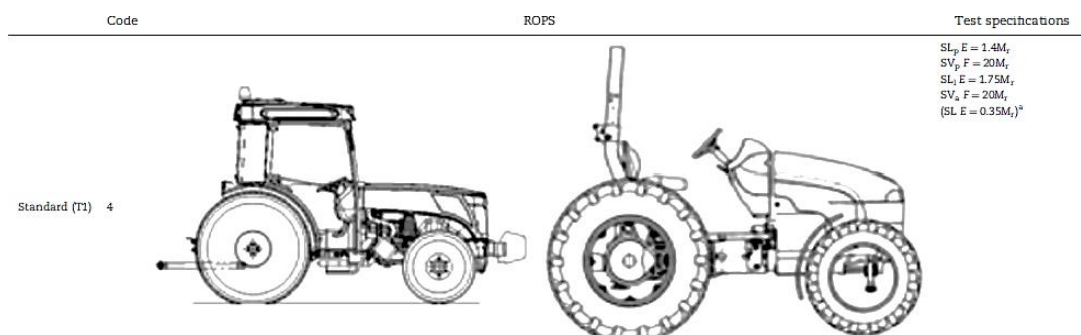
Los aceros que contienen elementos de aleación que superan los límites del acero al carbono y se tratan térmicamente para obtener una combinación de alta resistencia y tenacidad se denominan de construcción. Aceros aleados con un límite elástico de 100 ksi, estos son los aceros más resistentes en uso estructural general [42]. Para ilustrar apropiadamente los tipos de acero, vea el ANEXO 1 y 2, donde se presentan las tablas que especifican las propiedades mínimas para los diferentes tipos y grados de aceros estructurales según la designación ASTM mencionados en este escrito.

Las láminas y tiras de acero se utilizan para muchas aplicaciones estructurales, incluidos los miembros conformados en frío en la construcción de edificios y la piel estresada de los equipos de transporte [42]. El término piel estresada se les asigna a las placas de acero que en su forma final presentan un perfil especial con forma de panel o perfiles irregulares con la finalidad de aportar resistencia a los fuselajes de todo tipo de vehículos de transporte. A menudo se prefiere a otros miembros de acero cuando se requiere resistencia a la torsión y cuando es estéticamente deseable una sección cerrada y lisa. Los tubos cuadrados y rectangulares se fabrican mediante tubos redondos soldados o sin costura conformados en frío o en caliente en un proceso continuo [42].

2.2.15. Parámetros generales para la evaluación del modelo.

2.2.15.1. Categoría T1.

Gráfico 40. Modelos de tractor agrícola categoría T1.



FUENTE: BIOSYSTEMS ENGINEERING

AUTOR: VALDA RONDELLI, ANDREW LOUIS GUZZOMI, [2010]

Según lo estipulado por el reglamento UE 1322 el ámbito de aplicación para tractores agrícolas categoría T1 debe estar provisto de dos ejes para ruedas de neumáticos con una velocidad máxima de 40 Km/h, una masa sin lastrar superior a 600 kg, pero inferior a 6000 kg y el ancho de vía mínimo para las ruedas traseras superior a 1150 mm.

2.2.15.2. Reglamento delegado UE 1322.

El presente Reglamento tiene por objeto establecer las normas técnicas y los métodos de ensayo necesarios para la fabricación de vehículos agrícolas y forestales, a fin de minimizar el riesgo de lesiones para las personas que trabajen en o con el vehículo [43]. Así mismo este reglamento presenta conceptos útiles para el análisis de la estructura de protección al vuelco, requisitos para determinar la altura del bloque pendular y directrices para el dimensionamiento y obtención de la geometría. Algunos de los conceptos que se muestran a continuación son de utilidad para el reconocimiento de los parámetros requeridos del tractor agrícola y para la ubicación del bloque pendular respecto la estructura de protección.

2.2.15.3. Vía.

El plano mediano de la rueda es equidistante de los dos planos que incluyen la periferia de las llantas en sus bordes exteriores. El plano vertical que pasa a través del eje de una rueda corta su plano mediano a lo largo de una línea recta hasta un punto de la superficie de apoyo [43].

2.2.15.4. Batalla.

Distancia entre los planos verticales que pasan por las dos líneas de eje correspondientes a las ruedas delanteras y las ruedas traseras [43]. Esta distancia entre ejes permitirá seleccionar el tipo de tractor según la categoría escogida.

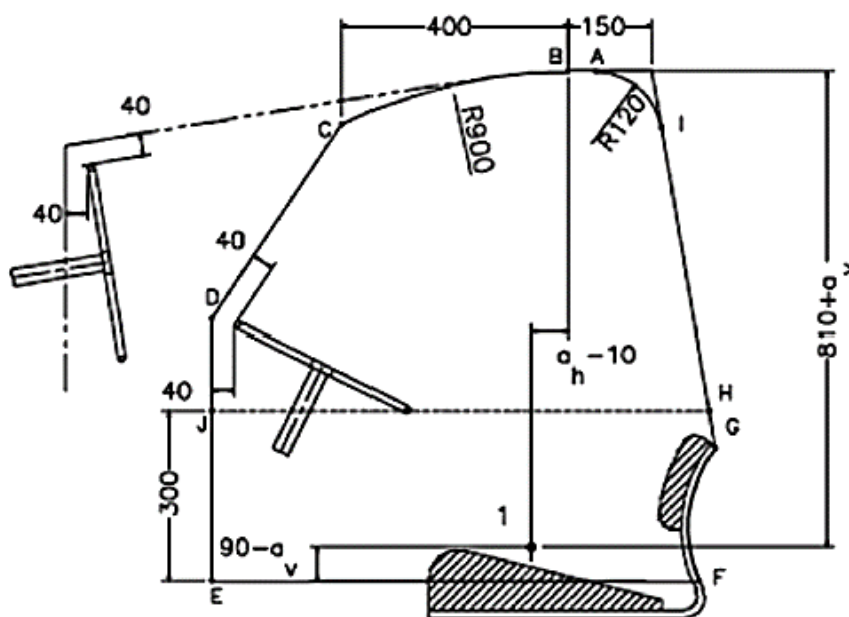
2.2.15.5. Zona libre.

Esta zona se define en relación con el plano de referencia y el punto índice del asiento. El plano de referencia es un plano vertical generalmente longitudinal al tractor que pasa por el punto índice del asiento y el centro del volante. Normalmente, el plano de referencia coincide con el plano longitudinal mediano del tractor [43].

- 1 Punto índice del asiento
- 2 Fuerza
- 3 Plano de referencia vertical

Donde a_v y a_h son la mitad del ajuste horizontal y vertical del asiento respectivamente medido en mm.

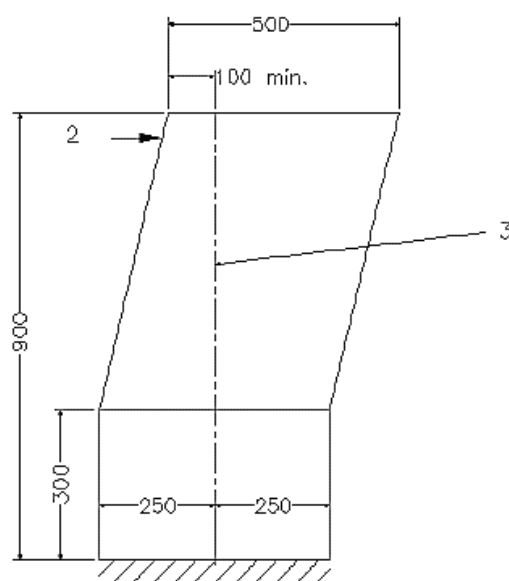
Gráfico 41. Vista lateral de la zona libre de la cabina del conductor.



FUENTE: REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 1322/2014

AUTOR: DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, [2014]

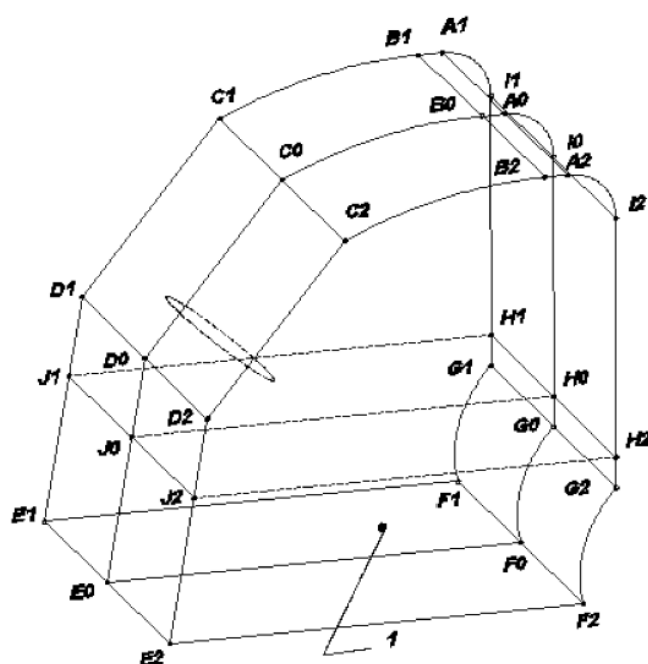
Gráfico 42. Vista frontal de la zona segura de la cabina del conductor.



FUENTE: REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 1322/2014

AUTOR: DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, [2014]

Gráfico 43. Zona libre.



FUENTE: REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 1322/2014

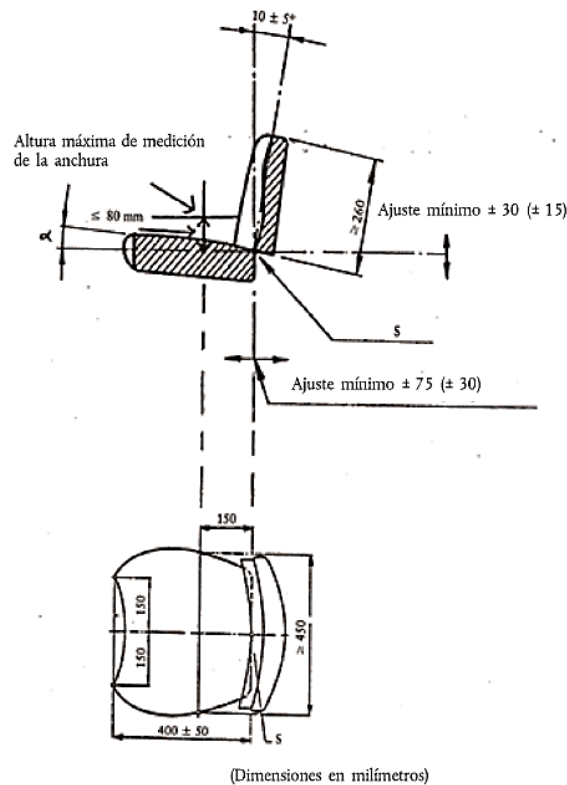
AUTOR: DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, [2014]

La vista isométrica de la zona libre o zona de seguridad del conductor del tractor está formada por una serie de planos que se encuentran conectados entre sí, de modo que forman un espacio en el cual el ocupante podría estar a salvo si el tractor con la ROPS volcara.

Para el dimensionamiento de la zona libre se utilizarán los valores definidos por el reglamento utilizado para este caso de estudio y los gráficos anteriores. Para determinar el punto índice del asiento se considera lo estipulado en anexo XIV del reglamento UE 1322 apartado 3.4 lo cual indica la distancia longitudinal mínima del asiento cuya vía mínima de las ruedas traseras sea superior a 1150 mm deberá ser de 150 mm, a su vez la distancia mínima del sentido vertical del asiento será de 60 mm para tractores con una vía mínima para las ruedas traseras superior a 1150 mm.

Estas medidas ayudarán al proceso de obtención de la zona de seguridad o zona libre del conductor, así mismo será un indicador para verificar si existe o no penetración de los miembros estructurales.

Gráfico 44. Requisitos para el asiento del conductor.



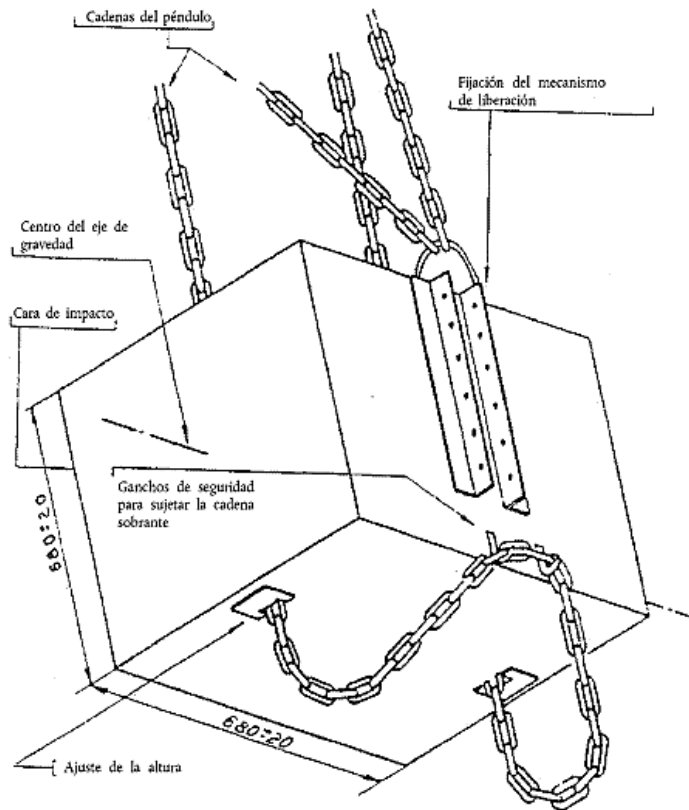
FUENTE: REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 1322/2014

AUTOR: DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, [2014]

2.2.15.6. Equipo para condiciones de ensayo.

El anexo VI del reglamento delegado UE 1322 indica que el bloque pendular que se utilizará para los ensayos de impacto deberá tener una masa equivalente a 2000 kg cuyas dimensiones se indican en el siguiente Gráfico.

Gráfico 45. Bloque pendular.

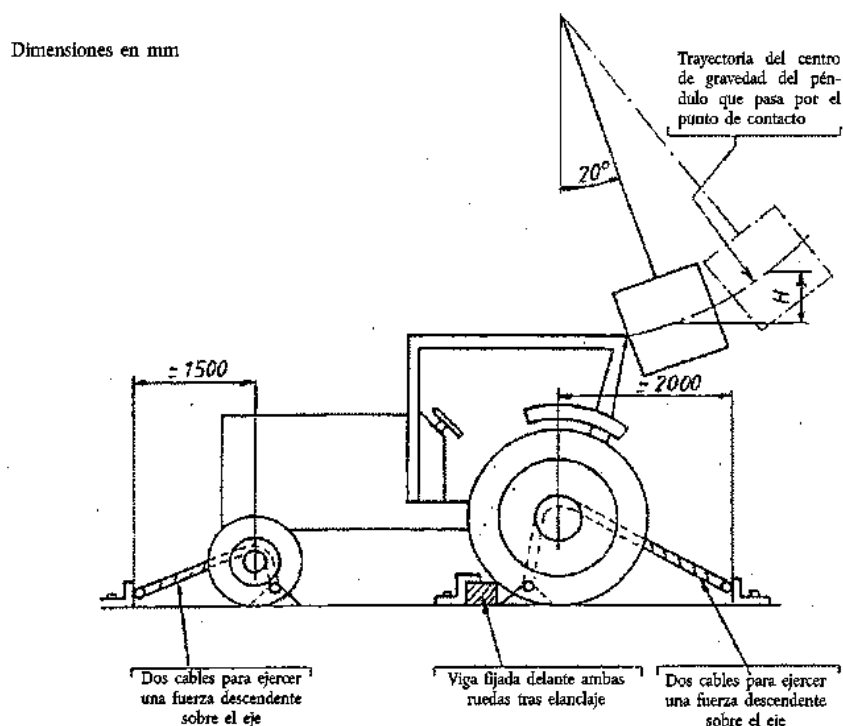


FUENTE: REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 1322/2014

AUTOR: DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, [2014]

Como se muestra las caras de impacto del bloque pendular tendrán unas dimensiones de 680 x 680 ± 20 mm, el mismo que será suspendido 6 m desde el suelo hasta su punto de pivotación con el fin de proporcionar un ajuste correcto respecto a la estructura de protección de la cabina del tractor. Las expresiones utilizadas para el cálculo de la altura a la que se encuentra situado el bloque pendular para el método de impacto trasero se muestra a continuación. A su vez, se muestra la ubicación espacial del bloque pendular respecto a la estructura de protección de la cabina del tractor según el método de aplicación.

Gráfico 46. Método de impacto trasero.



FUENTE: REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 1322/2014

AUTOR: DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, [2014]

Como se muestra en el Gráfico 46 la cara de impacto debe impactar la estructura cuando forme un ángulo de 20° con la vertical, el punto de impacto será la parte de la estructura que tenga el primer contacto con el suelo al volcarse hacia atrás, habitualmente la parte superior.

Para determinar la altura del bloque pendular para el método de impacto trasero el cual depende de la masa y la batalla del tractor que se esté utilizando según la categoría se utiliza la siguiente fórmula [43].

$$H = 2.165 \times 10^{-8} ML^2 \quad (14)$$

Donde:

H [mm] : Altura del centro de gravedad del bloque pendular

M[kg] : Masa del tractor

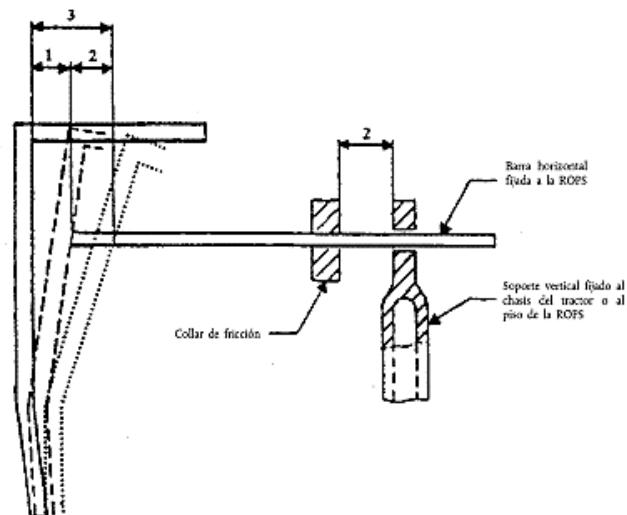
L [mm]: batalla del tractor

2.2.15.7. Equipo para medición de la deformación elástica.

Para la medición de la deformación elástica de la estructura el reglamento plantea el siguiente arreglo estructural para la medición física después de realizarle el ensayo de impacto.

Gráfico 47. Equipo de medición de la deformación elástica.

Ejemplo de aparato de medición de la deformación elástica



- 1 = Deformación permanente
- 2 = Deformación elástica
- 3 = Deformación total (permanente y elástica)

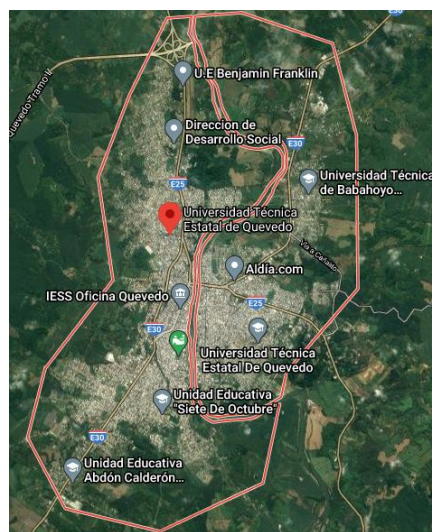
FUENTE: REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 1322/2014
AUTOR: DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, [2014]

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

3.1. Localización.

La presente investigación se desarrolla en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo Campus "Ingeniero Manuel Agustín Haz Álvarez", Av. Quito km. 1 1/2 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas, ubicada en la ciudad de Quevedo en la provincia de los Ríos. Así mismo esta se encuentra al centro de la región litoral del Ecuador a una altitud de 74 m s. n. m., además de poseer un clima lluvioso tropical beneficioso para el cultivo del sector agrícola ya que cuenta con una temperatura promedio de 28°C.

Gráfico 48. Ubicación geográfica



FUENTE: GOOGLE MAPS [2020]

3.2. Tipo de investigación.

A continuación, se presenta el modelo de investigación junto con los métodos que permiten llevar una sincronía adecuada con relación al objeto de estudio en cuestión.

3.2.1. Investigación Exploratoria.

La aplicación de la investigación exploratoria en este estudio, se centra en el primer acercamiento del tema que se está realizando junto con los conceptos, métodos, procedimientos y tecnologías aplicados, con el fin de obtener antecedentes o soluciones que beneficien a este proyecto, además ayudar a contribuir al sector industrial y a posteriores investigaciones.

3.2.2. Investigación Documental.

Para la correcta fundamentación teórica de este estudio, la recopilación de información pertinente es capaz de brindar una estructura conceptual adecuada, siendo necesario utilizar fuentes como artículos científicos, tesis, libros, fichas técnicas o manuales. Así mismo, toda la información de páginas confiables que, a su vez, permitan la obtención adecuada de datos que serán utilizados en los procedimientos que se realicen en este proyecto.

3.2.3. Investigación Aplicada.

La aplicación correcta de los conceptos del método de elementos finitos, parámetros de malla, propiedades de materiales entre otros, estos serán de suma importancia para determinar el objeto específico de esta investigación determinando la mejor alternativa para el modelo planteado, mejorando la resistencia de las estructuras de protección.

3.2.4. Investigación Explicativa.

Al aplicar este método se busca encontrar la causa-efecto que el objeto de estudio plantea, permitiendo el entendimiento de los procedimientos y estrategias para la solución del problema.

3.3. Métodos de investigación.

3.3.1. Método Inductivo.

Con la implementación de este método se obtiene una visión general de los hechos que conforman el problema de estudio, permitiendo realizar un análisis para observar el comportamiento de las propiedades mecánicas de los materiales, a través de la mecánica computacional y el método de elementos finitos. A su vez probar nuevas metodologías y tecnologías que permiten obtener resultados para una selección de materiales basada en sus propiedades, plantando las bases para posteriores investigaciones relacionadas al campo de aplicación del problema de investigación.

3.3.2. Método Analítico.

Por medio del método analítico y en base a la recopilación de información, se examina el modelo CAD basado en el método de elementos finitos, para observar el cambio en el comportamiento mecánico de la estructura de protección al ser sometida a una carga de impacto mediante un bloque pendular de una masa específica.

Con el objetivo de verificar la interacción entre los miembros estructurales y el cambio que estos presentan al ser analizados con dos materiales distintos, se evalúan las propiedades mínimas del acero con el fin de encontrar entre un universo de materiales las alternativas más apropiadas según su aplicación en el campo de estudio, para su jerarquización y encontrar el material más apropiado con el fin de mejorar el rendimiento de la estructura la estructura de protección.

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos en base al ensayo de impacto realizado en la estructura, según el reglamento utilizado para evaluar el modelo, se determinará si la estructura cumple o no con los requisitos de aceptación en base a los materiales utilizados en el análisis, así mismo, las limitación y modificaciones realizadas para lograr su cumplimiento.

3.4. Fuentes de recopilación de información.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se tomaron en cuenta fuentes primarias y secundarias las cuales brindan información adecuada proveniente de libros, tesis, artículos científicos, fichas técnicas y manuales, además de reuniones con profesionales del área de aplicación del objeto de estudio.

3.5. Diseño de la investigación.

3.5.1. Diseño no experimental.

Con el fin de observar el comportamiento de los fenómenos que ocurren en el mundo físico se realiza un modelo de elementos finitos (FEM) a partir de un modelo estructural CAD con la finalidad de observar la interacción entre componentes al ser sometido a condiciones de carga de impacto y tipos de materiales para realizar un posterior análisis que determine la alternativa más adecuada y resistente.

3.6. Instrumentos de investigación.

Algunos instrumentos utilizados en esta investigación son el análisis de documentos y procedimientos experimentales que ayudan a la recolección de datos necesarios para la evaluación de los criterios para la selección de los materiales que se utilizaran en las simulaciones. Así mismo herramientas que permiten medir los resultados de dichos ensayos computacionales ayudando a la toma de decisiones.

3.7. Tratamiento de los datos.

El tratamiento de los datos para este proyecto de investigación se realiza siguiendo los siguientes lineamientos.

- Para determinar el material adecuado de análisis y poder definir sus criterios más relevantes y obtener el mejor resultado se utiliza el Software del paquete de Office Microsoft Excel. Así también para la organización y evaluación de los resultados finales del proyecto de investigación.
- En el proceso de modelado 3D se utilizará el software de diseño mecánico SOLIDWORKS 2020, permitiendo obtener la geometría deseada, así como sus posteriores correcciones, adaptando el modelo de tipo superficie y adecuándolo para el preprocesamiento FEM.
- Para el preprocesamiento se utiliza el programa de LST (Livermore software Technology), LS-PREPOST el cual gracias a su amplia capacidad de herramientas se podrá ingresar todos los parámetros necesarios para obtener los resultados deseados.
- Para realizar los análisis en la estructura de protección al vuelco se utilizará el software de elementos finitos LS-DYNA capaz de resolver los problemas complejos del mundo real siendo la herramienta más avanzada para el análisis estructural no lineal. Así mismo este programa está desarrollado por LST (Livermore software Technology). Se debe mencionar que el programa utilizado para la solución y preprocesamiento tiene la capacidad de realizar los análisis considerando la parte plástica del material y su fractura o falla, es por esta razón que es apropiado para el análisis.

3.8. Recursos humanos y materiales.

3.8.1. Recursos humanos.

Tabla 5. Recursos Humanos

Nombre	Cargo	Institución	Observación
Diego Javier Punina	Ing. Mec. Prof.	UTEQ	Director de Tesis
Ariel Eduardo Avila Romero	Estudiante	UTEQ	Autor de Tesis

ELABORADO POR: AUTOR

3.8.2. Recurso material.

3.8.2.1. Materiales de oficina.

Tabla 6. Materiales de oficina

Cantidad	Descripción	Característica
1	Computadora portátil	Hp Core i7 7th Gen
1	Memoria USB	8 Gb
1	Mouse	Inalámbrico
1	Cuaderno de apuntes	
3	Esferos	

ELABORADO POR: AUTOR

3.8.2.2. Software.

Tabla 7. Recursos de Software

Categoría	Nombre	Observación
Redacción y presentación	Microsoft Word, PowerPoint	Paquete Office
Análisis de datos	Microsoft Excel	
Diseño y Modelado 3D	SOLIDWORKS 2020	Versión estudiantil
Selección de Material	CES Edupack	Versión estudiantil
Pre-Post procesamiento	LS-PREPOST	Licencia de Prueba
Solución	LS-DYNA	Licencia de Prueba

ELABORADO POR: AUTOR

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

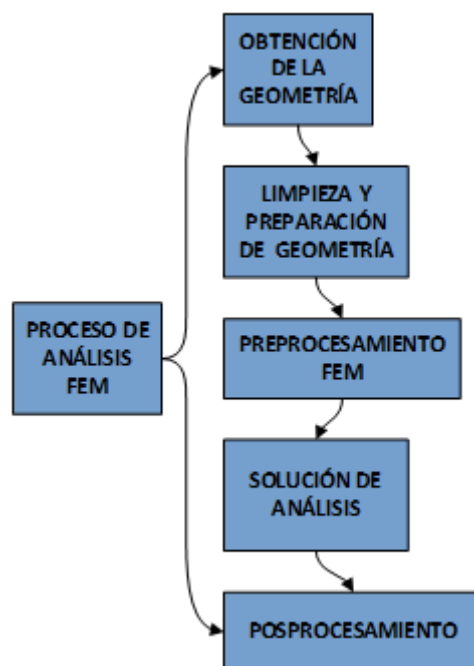
4.1. Consideraciones generales para el análisis.

4.1.1. Flujo de trabajo para el proceso de análisis.

En la industria, para la fabricación y validación de estructuras de protección, previamente existe una serie de análisis que permiten observar las deficiencias y puntos críticos que afectarían al rendimiento de dicha estructura. El método de elementos finitos en la actualidad es una de las herramientas más eficaces, capaces de cumplir con las necesidades de las problemáticas que se presentan día a día en la industria, junto a normativas y códigos que establecen requisitos los cuales deben cumplirse para la aceptación de un diseño o análisis antes la etapa de producción.

A continuación, se presenta el flujo general de trabajo para realizar el ensayo de impacto en la parte trasera de la estructura de protección al vuelco, con el fin de proporcionar al lector la información necesaria para su entendimiento.

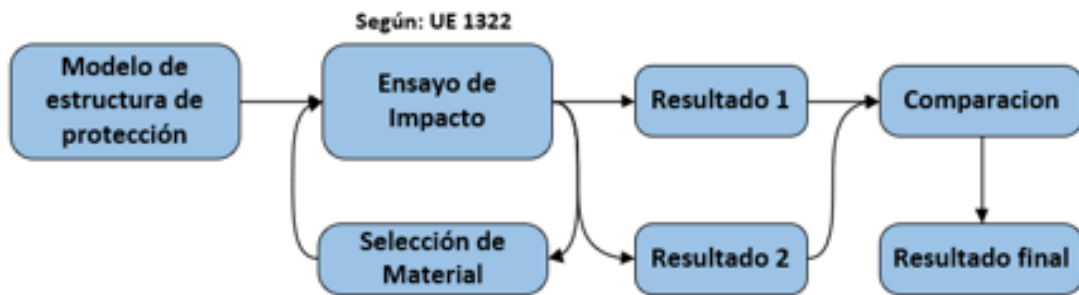
Gráfico 49. Proceso general para el análisis FEM.



ELABORADO POR: AUTOR

Para realizar el objeto de estudio se plantea la siguiente estrategia que permitirá evaluar la geometría de la estructura de protección y mediante una serie de pasos obtener resultados que serán comparados con el fin de encontrar la opción más resistente.

Gráfico 50. Flujo de trabajo para el análisis.



ELABORADO POR: AUTOR

4.1.2. Requisitos para la obtención de geometría.

Para la obtención de la geometría y en base a lo estipulado respecto la categoría utilizada para este estudio. Inicialmente se realizó la previa selección del tractor el cual tendría que cumplir con los parámetros mínimos de masa, dimensiones y velocidad.

El tractor agrícola que cumple con estos requisitos es el modelo T120 Valtra, el cual presenta una disponibilidad de datos necesarios para la obtención de la geometría, puntos de referencia para la ubicación la de estructura de protección, masa total del tractor así mismo su distribución porcentual para cada eje y medidas para el ancho de vía, estos valores pueden ser revisados en el apartado de anexos de este documento, así como las medidas para las secciones de los miembros estructurales utilizados.

A partir de estudios realizados para este campo de aplicación, y en base a la disponibilidad de perfiles estructurales comerciales en el país, según las compañías de productos de acero nacionales como IPAC y las NTE INEN, se pudo tomar de referencia las dimensiones necesarias para las secciones de los miembros estructurales.

Con el fin de observar el cambio en el comportamiento mecánico de la estructura de protección entre dos materiales, se utiliza como material inicial para los ensayos computacionales un acero ASTM A36 cuyas propiedades mecánicas se encuentran por defecto en el programa de preprocesamiento para los análisis como unidades consistentes las cuales se presentan en el Gráfico 30 del capítulo 2 de este documento.

Esto se realiza con el fin de obtener una base de resultados que puedan ser utilizados para seleccionar una mejor alternativa de material y a su vez pueda presentar mejor comportamiento y características al ser sometido a las condiciones de carga de los ensayos.

Tabla 8. Secciones de perfil estructural redondo.

Perfiles de Acero Según la NTE INEN 2415 y catálogos IPAC.		
Tubería estructural redonda		
Cantidad de partes	Diámetro (mm)	Espesor (mm)
2	31.8	2
1	63.5	4
2	76.2	4

FUENTE: NTE INEN 2415, [2016]

ELABORADO POR: AUTOR

Tabla 9. Secciones de tubería estructural rectangular y cuadrada.

Perfiles de Acero Según la NTE INEN 2415 y catálogos IPAC.			
Tubería estructural rectangular y cuadrada			
Cantidad de partes	Ancho (mm)	Alto (mm)	Espesor (mm)
1	30	50	3
1	25	50	3
2	40	60	3
4	40	80	3
2	40	80	4
2	50	50	4
3	60	60	4
1	70	70	4

FUENTE: NTE INEN 2415, [2016]

ELABORADO POR: AUTOR

Tabla 10. Secciones de perfiles especiales.

Perfiles especiales		
Cantidad de partes	Diámetro inscrito (mm)	Espesor (mm)
2	139	4

FUENTE: NTE INEN 1623, [2015]

ELABORADO POR: AUTOR

Tabla 11. Secciones de planchas.

Planchas laminadas en caliente	
Cantidad de partes	Espesor (mm)
1	2.5
2	3
4	5

FUENTE: NTE INEN 115, [2014]

ELABORADO POR: AUTOR

4.1.3. Cálculo de la altura del bloque pendular.

Para este estudio se considera la ubicación que tendría el bloque pendular respecto a la estructura de protección al realizarse un ensayo físico. A su vez, este estudio solo se centra en la estructura de protección y en analizar su comportamiento mecánico bajo condiciones de carga de impacto.

Para determinar la altura del centro de gravedad del bloque pendular a la que se soltaría para impactar la estructura en la parte trasera, se realiza el siguiente cálculo que relaciona la masa y la batalla del tractor. EL modelo de tractor seleccionado para este análisis cuenta con una masa de 5530 kg, y una longitud de batalla de 2748 mm, estos datos serán utilizados para realizar los siguientes cálculos.

4.1.3.1. Impacto trasero.

A continuación, se procede a calcular la altura del bloque pendular para el impacto trasero a partir de la Ecuación 14 [43].

$$H = 2.165 \times 10^{-8} ML^2 \quad (14)$$

Donde:

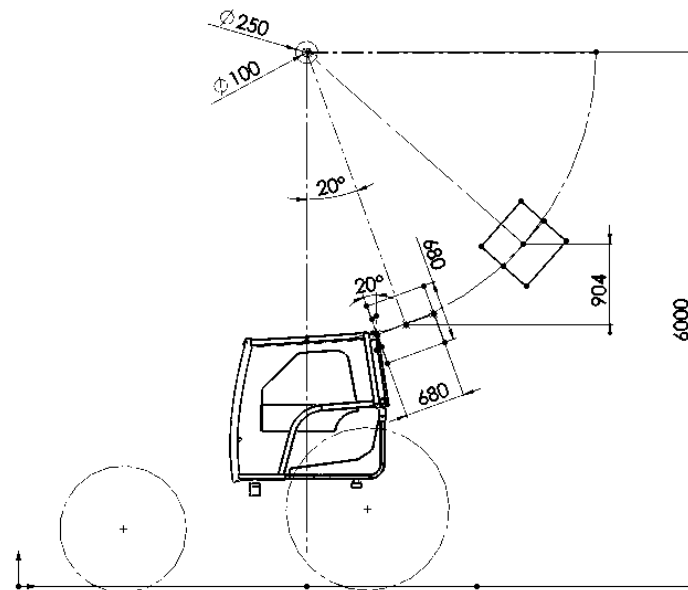
$$M = 5530 \text{ kg}$$

$$L = 2748 \text{ mm}$$

$$H[\text{mm}] = 2.165 \times 10^{-8}(5530)(2748)^2$$

$$H = 904.10 \text{ mm}$$

Gráfico 51. Ilustración de la altura calculada para el impacto trasero.



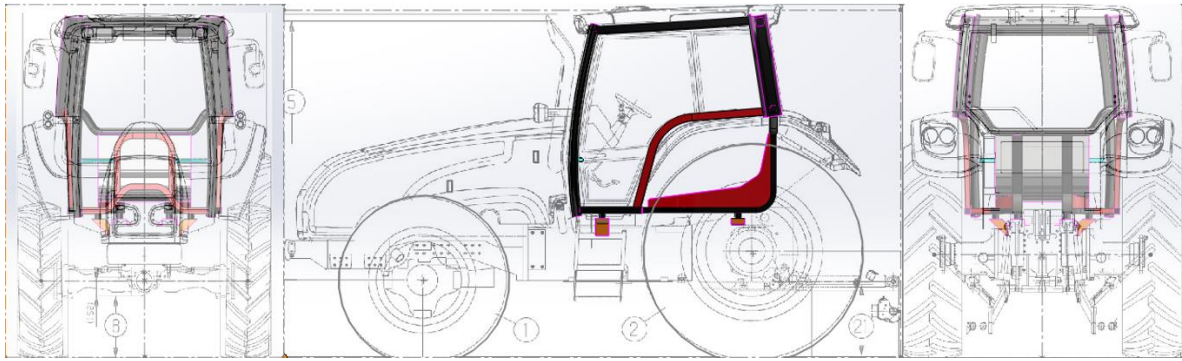
ELABORADO POR: AUTOR

4.2. Modelado CAD de los elementos para simulación.

4.2.1. Modelado de la estructura de protección de la cabina del tractor.

En el proceso de modelado de la estructura de protección del tractor agrícola, se consideró las vistas principales del mismo y dimensiones las cuales ayudaron a obtener la geometría de la estructura como se muestra en el siguiente Gráfico, a su vez esto ayudará a determinar las ubicaciones para los ensayos de impacto respecto al suelo y al tractor.

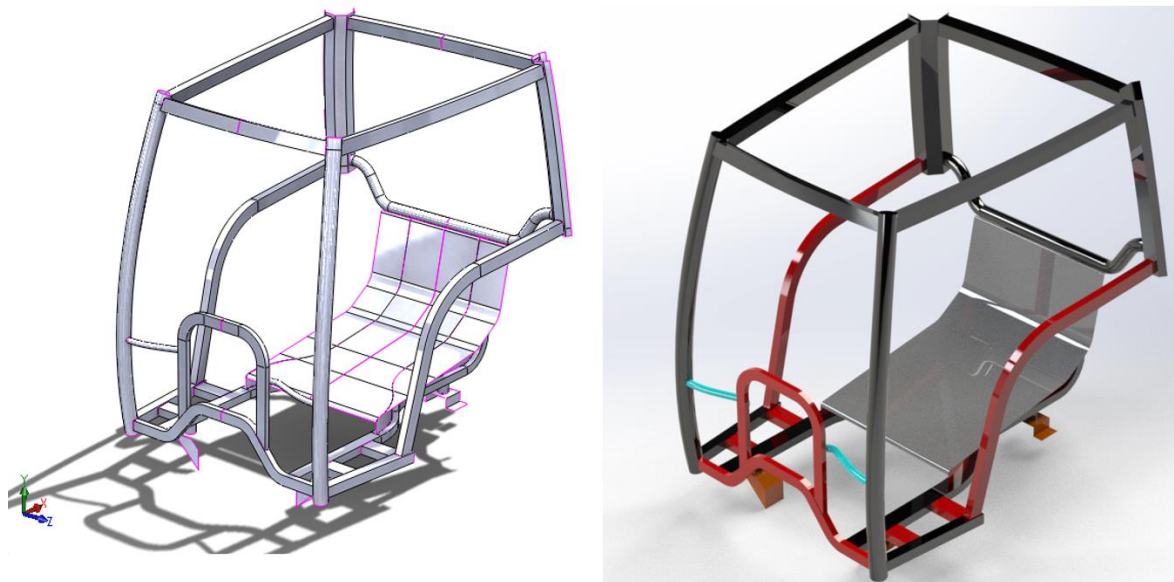
Gráfico 52. Ubicación de la estructura de protección respecto al tractor.



FUENTE: SOLIDWORKS 2020

ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 53. Vista isométrica de la estructura de protección y modelo CAD realista.



FUENTE: SOLIDWORKS 2020

ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en los gráficos anteriores, para el proceso de análisis por el método de elementos finitos se necesita una geometría capaz de proporcionar resultados que puedan ser utilizados para la evaluación o mejoramiento de un diseño. Para la estructura de protección se toma en cuenta los miembros estructurales principales, los cuales estarían recibiendo la carga total a la hora de sufrir un volcamiento o impacto.

Por esta razón y con la finalidad de ahorrar el consumo computacional a la hora de realizar la solución del análisis, se utilizan geometrías simples si un alto grado de detalle, evitando

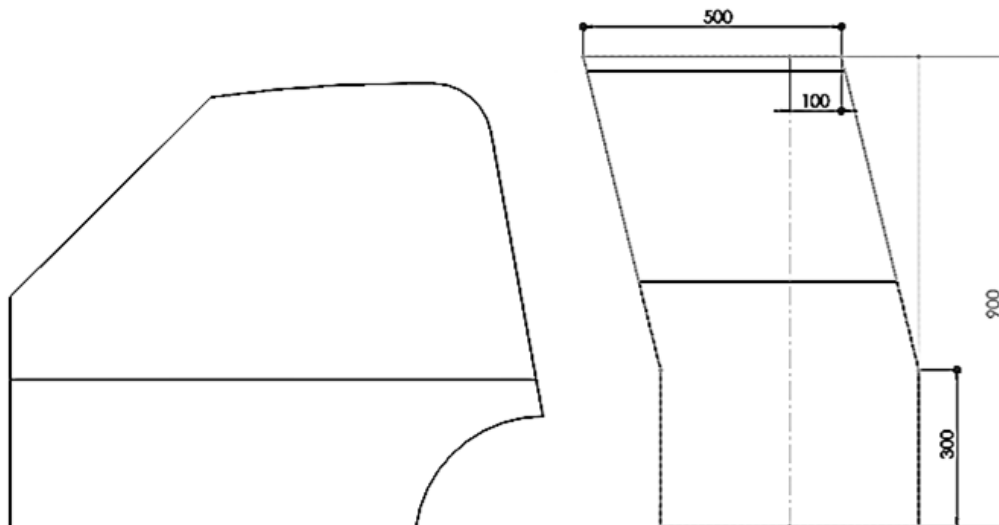
radios de empalme de los miembros estructurales, agujeros de placas, nervios, secciones pequeñas, los cuales provocarían una variación considerable en el tamaño de los elementos de malla causando posibles fallos en el proceso de discretización.

La estructura de protección está modelada de tal forma que se omiten los espesores para los miembros estructurales, cuya geometría está en su totalidad hecha de superficies, esto con la finalidad de utilizar elementos de tipo cáscara los cuales permiten ahorrar recursos y su utilización es la más conveniente para esta aplicación.

4.2.2. Modelado de la Zona libre del conductor.

La zona libre del conductor o zona de seguridad es el espacio al cual no debería ingresar ningún elemento estructural cuando ocurre el vuelco o aplastamiento de la cabina del tractor. Su utilidad en este estudio es la verificación de que se cumpla con lo mencionado anteriormente, sus dimensiones se muestran en el gráfico 42 del capítulo 2, las cuales están estipuladas por el reglamento UE 1322 para tractores agrícolas categoría T1.

Gráfico 54. Modelo de Superficie Zona libre.



FUENTE: SOLIDWORKS 2020

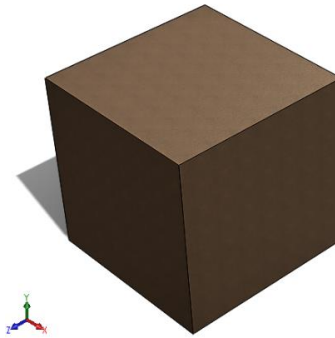
ELABORADO POR: AUTOR

Para la obtención de la geometría de la zona libre de la estructura de protección se tomó en consideración la posición del volante de conductor, junto con las dimensiones necesarias de separación indicadas en el gráfico de zona libre estipulado por el reglamento.

4.2.3. Modelado del bloque pendular.

Para el modelado CAD del bloque pendular se utilizó las indicaciones mencionadas en la sección 2.2.15.5. Las dimensiones de las caras de impacto son $680 \times 680 \pm 20$ mm, así mismo, la masa requerida para el bloque debe ser de 2000 kg.

Gráfico 55. Modelo CAD de bloque pendular.



FUENTE: SOLIDWORKS 2020

ELABORADO POR: AUTOR

La característica de este modelo es su comportamiento como elemento sólido rígido el cual no tiene deformación en el análisis, además de poder manipularse para que cumpla con algunos requerimientos que se utilizarán posteriormente.

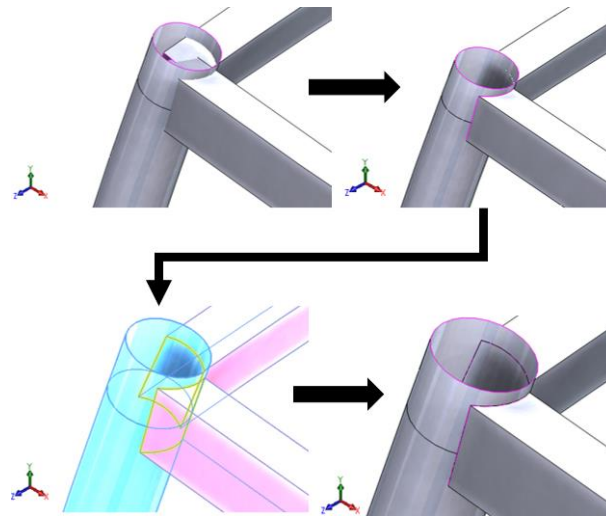
4.2.4. Limpieza y preparación de geometría.

Una vez obtenidas las diferentes geometrías que serán utilizadas en el ensayo de impacto, se debe realizar el proceso de revisión antes de iniciar el proceso de discretización de la malla de elementos finitos, asignación de propiedades, y condiciones de análisis.

4.2.5. Tratamiento de conexiones entre cuerpos.

Para que exista la interacción entre los miembros estructurales de la estructura de protección de la cabina del tractor agrícola, se aplica el concepto de topología compartida lo que permite al programa de preprocesamiento detectar las uniones entre los cuerpos permitiendo obtener una malla de elementos finitos conectada entre sí. Debido al proceso de modelado se crean interferencias en las conexiones entre esquinas, caras y bordes, la estrategia a seguir es la eliminación de interferencias entre las superficies y aplicar la partición y la unión de aristas y caras en las conexiones de la estructura respectivamente.

Gráfico 56. Proceso de tratamiento de conexiones.

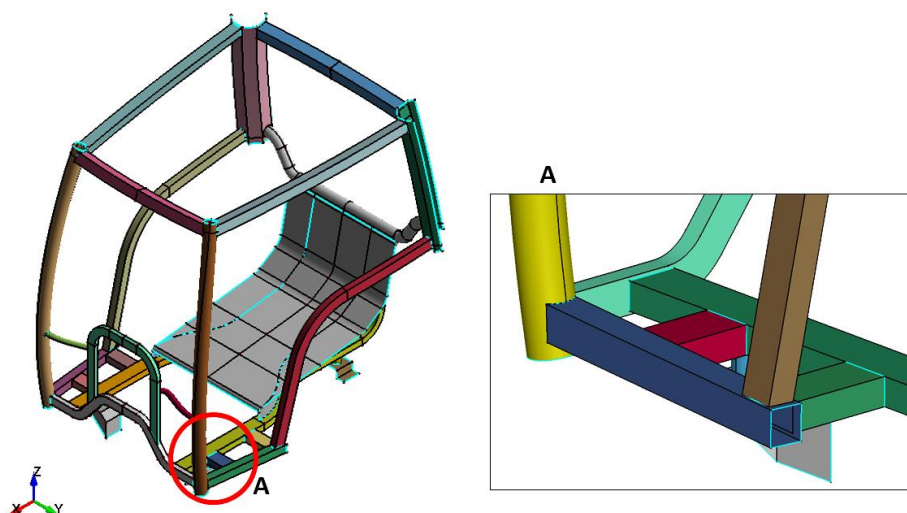


FUENTE: SOLIDWORKS 2020

ELABORADO POR: AUTOR

Este proceso de corrección de conexiones se utiliza mayormente en simulaciones de ensamble donde existe la interacción entre cuerpos, a su vez, estos pasos permiten al programa de preprocesamiento identificar las caras que cuentan con estas características para luego unirlos a través de partes de malla las cuales formarán la malla general de la estructura de protección. Antes de realizar el proceso de discretización de los elementos de superficie para formar la malla de elementos finitos de la estructura de protección, se debe realizar una revisión de las conexiones entre las partes.

Gráfico 57. Identificación de conexiones libres.



FUENTE: LS-PREPOST

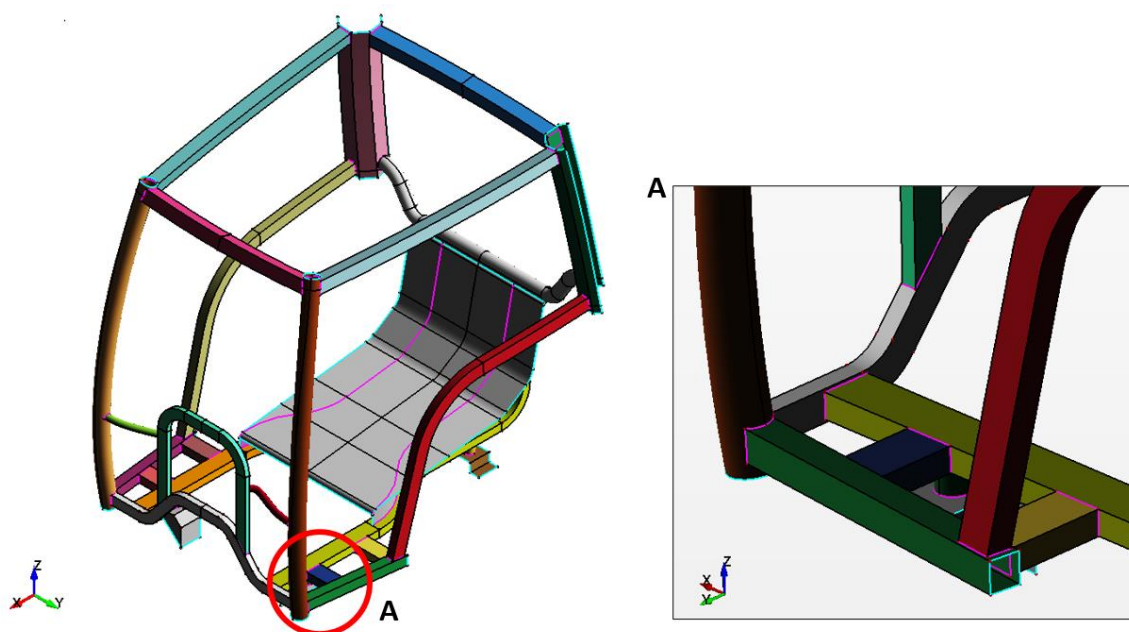
ELABORADO POR: AUTOR

En el Gráfico 57 se puede observar la estructura de protección modelada por medio de superficies, a su vez, se puede identificar por medio del color cian las aristas que se encuentran conectadas con las caras de los miembros de la estructura dando a entender que existe una conexión libre.

Para lograr una conexión entre los miembros de la estructura y obtener una topología compartida, se tuvo que realizar el tratamiento de conexiones entre cuerpos, realizar este proceso CAD, permite al programa de preprocesamiento identificar las posibles conexiones y unir las con el objetivo de compartir los nodos de los elementos de malla indistintamente de el cambio de propiedades de cada miembro estructural.

Al detectarse las operaciones de líneas divisorias de secciones las cuales permiten crear una conexión, LS-PREPOST une los miembros que mantienen esta relación para formar un solo cuerpo de malla pero con diferentes partes.

Gráfico 58. Identificación de unión entre cuerpos.



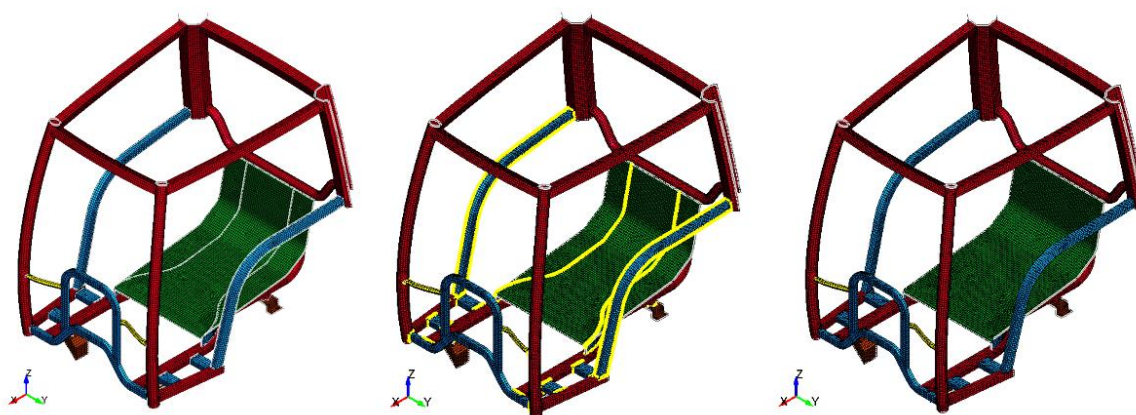
FUENTE: LS-PREPOST
ELABORADO POR: AUTOR

En el gráfico se aprecia la union por medio del cambio de color cian a magenta indicando una conexión entre los cuerpos, mientras que las aristas que permanecen con el color cian, representan los bordes de los perfiles estructurales los cuales no se conectan a otros cuerpos de la estructura de protección.

Un último paso para obtener una geometría adecuada para la malla de elementos finitos, es la identificación de nodos duplicados entre las conexiones de los miembros estructurales, los cuales se muestran en el siguiente gráfico.

Estos son fácilmente identificados, los nodos que se encuentran en las conexiones adoptan un color amarillo representando un error para la malla. Para ilustrar este ejemplo se utilizó la estructura de protección con su malla de elementos finitos la cual se explicará con más detalle en secciones posteriores.

Gráfico 59. Identificación de nodos duplicados.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Estos nodos son el resultado de aplicar la unión entre cuerpos, estos deben ser identificados y eliminados de la malla para evitar posibles errores de cálculo. La aparición de estos nodos se debe a la unión entre las mallas independientes de las partes que forman la estructura de protección, al ser unidas, los nodos sobrantes de cada malla se ubican en la misma posición que el nodo que conecta los elementos de una parte con otra.

4.3. Preprocesamiento.

En esta etapa se detallará los requisitos aplicados al modelo de elementos finitos de la estructura de protección de la cabina del tractor agrícola. Algunos de estos requisitos son parámetros de malla, propiedades de secciones de los miembros estructurales, propiedades de materiales de todos los elementos requeridos para los ensayos, condiciones de carga restricciones, contacto, etc.

Tabla 12. Asignación de espesores a las partes de la estructura de protección.

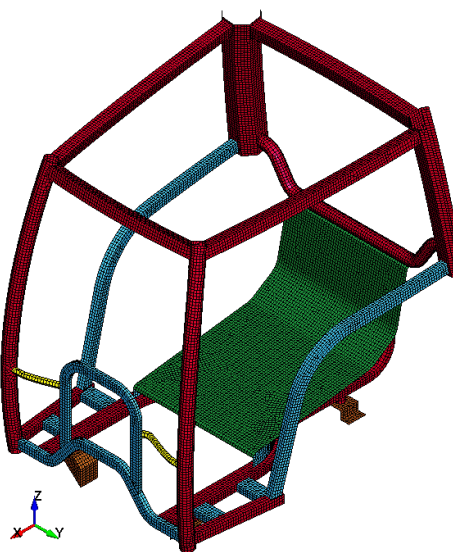
Asignación de espesores de sección según color de parte de la ROPS		
# Parte	Espesor (mm)	Color de parte
1	4	
2	3	
3	2.5	
4	2	
5	8	

ELABORADO POR: AUTOR

4.3.1. Generación de la malla de elementos finitos

La malla de elementos finitos utilizada para el modelo de superficie de la estructura de protección al vuelco ROPS, consta de elementos cuadrados y elementos triangulares para los cambios de sección y forma de las mallas. Se utilizó la función de Auto Mesher en el programa LS-PREPOST para generar las mallas de las partes que forman la estructura, con un tamaño de elementos de 15 mm. Se debe considerar que para casos más explícitos existen métodos de mallados avanzados en los cuales se pueden obtener mallas estructuradas, esto puede variar dependiendo del modelo que se esté analizando.

Gráfico 60. Malla de elementos finitos de la estructura de protección.



FUENTE: LS-PREPOST

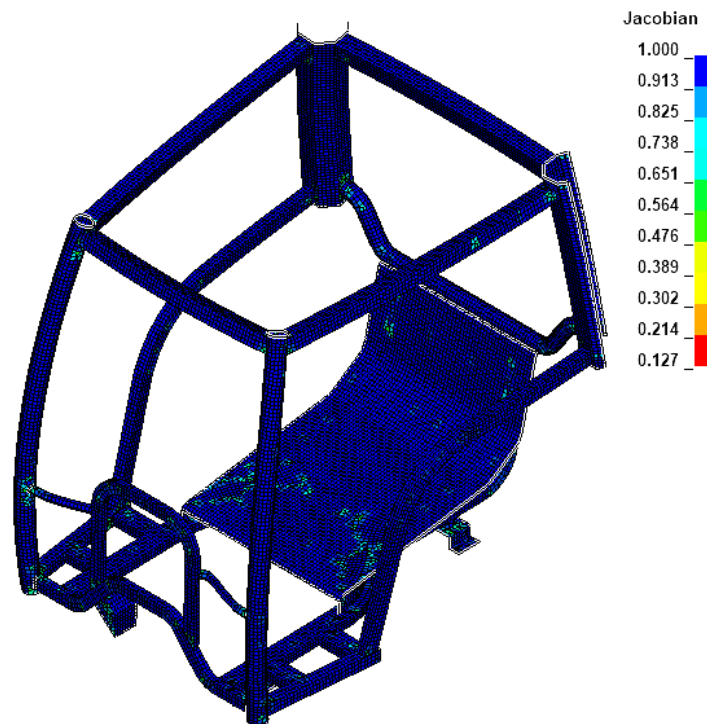
ELABORADO POR: AUTOR

Otra de las consideraciones para este modelo de malla es la variación de la cantidad de elementos, al utilizar una función automática adaptativa al modelo 3D el número de elementos puede disminuir o aumentar dependiendo de la forma a la que debe adaptarse, además de los elementos erróneos generados.

4.3.2. Revisión del índice de calidad de malla.

Estos elementos al adaptarse a curvas o secciones estrechas tienden a deformarse para lograr su conexión, esto provoca errores de cálculo al exceder los índices de calidad de malla establecidos por el programa. Por esta razón se debe realizar la revisión de la calidad de la malla para detectar estos posibles elementos deformados y poder modificarlos o eliminarlos del modelo de análisis.

Gráfico 61. Revisión del índice de calidad de malla.



FUENTE: LS-PREPOST

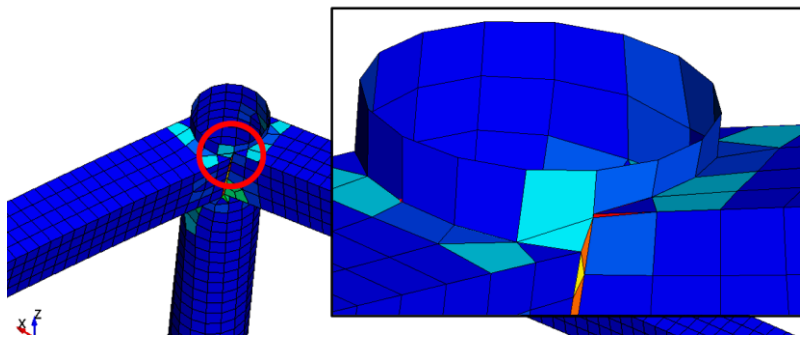
ELABORADO POR: AUTOR

El valor mínimo aceptable para el coeficiente jacobiano utilizado para la revisión de la calidad de malla en este modelo es del 30%, con relación a lo mencionado en capítulos anteriores, este valor es el mínimo permitido al acercarse a cero.

En otras palabras, para un coeficiente de 1 corresponde al 100% indicando un elemento excelente sin deformación, para un coeficiente de valor cero o negativo significa que el elemento está totalmente deformado, el mínimo valor aceptado es de 0.3.

Para este modelo de malla el resultado del análisis muestra que para un índice mínimo de 0.3 existe un total de 18 elementos erróneos que sobrecargan el modelo. Estos elementos se encuentran normalmente en los cambios de sección donde existen caras pequeñas como se muestra a continuación.

Gráfico 62. Detección de elementos deformados.

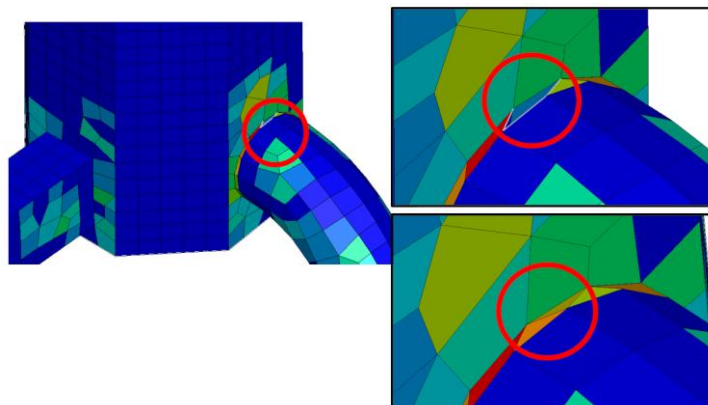


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Para finalizar el proceso de revisión de la malla, al haber detectado los elementos erróneos y haberlos eliminado o modificado, se debe revisar la estructura total para revisar si no existen espacios abiertos que influyan en el proceso de análisis, si existen estos espacios se deben reparar uniando los elementos.

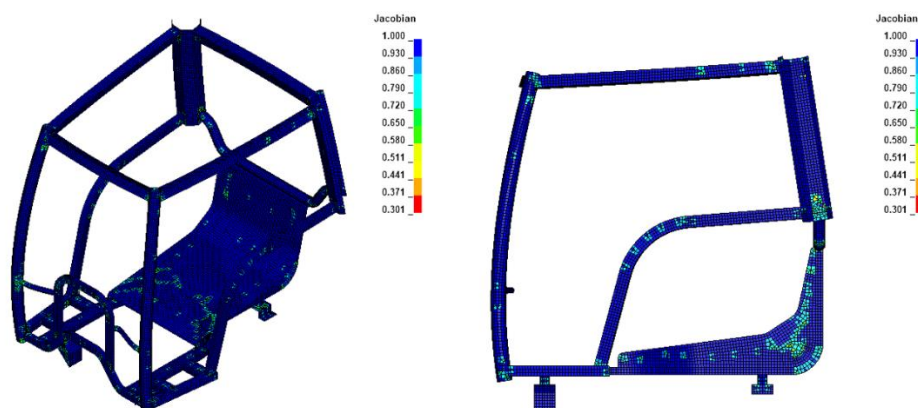
Gráfico 63. Reparación de elementos de malla.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 64. Comprobación del índice de calidad de la malla de elementos finitos.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Al revisarse la malla de elementos finitos y reparado los elementos erróneos, se puede determinar que para las partes de malla que forman las estructura de protección cuenta con una cantidad de 31361 elementos y 31874 nodos. El número de elementos para la zona libre es de 1920 y 1940 nodos, así mismo el bloque pendular cuenta con 343 elementos, 512 nodos, el modelo general de análisis cuenta con una cantidad de 33978 elementos y 33995 nodos. Estos valores se muestran a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 13. Cantidad de elementos y nodos para el análisis.

Numero de elementos y nodos del modelo de simulación		
# Elementos	# Nodos	Observación
33624	34326	Estructura ROPS, Zona Libre, bloque pendular
33978	33995	Ítems anteriores mas anillos para pendulo

ELABORADO POR: AUTOR

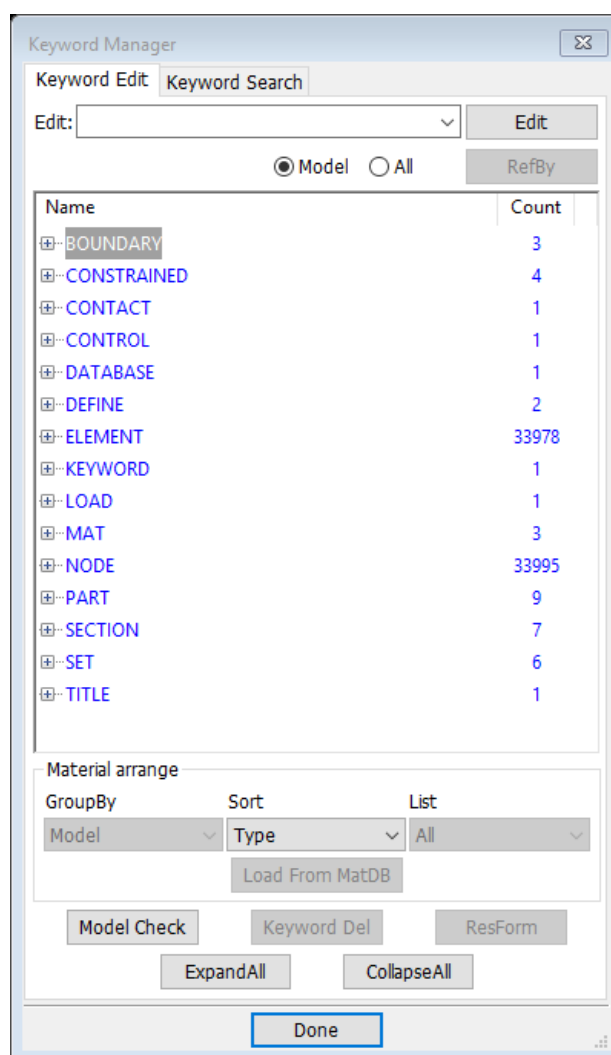
4.3.3. Asignación de restricciones y condiciones de contorno.

4.3.3.1. Cartas de control.

Una vez revisado el modelo de análisis se procede a preparar las cartas de control para el ensayo de impacto trasero de la estructura de protección.

En este modelo de análisis se utilizaron las siguientes cartas de control definidas en el programa de preprocesamiento LS-PREPOST, encargadas de especificar las funciones a los elementos que forman la estructura de protección, elementos de péndulo y zona de seguridad.

Gráfico 65. Cartas de control en LS-PREPOST.



FUENTE: LS-PREPOST

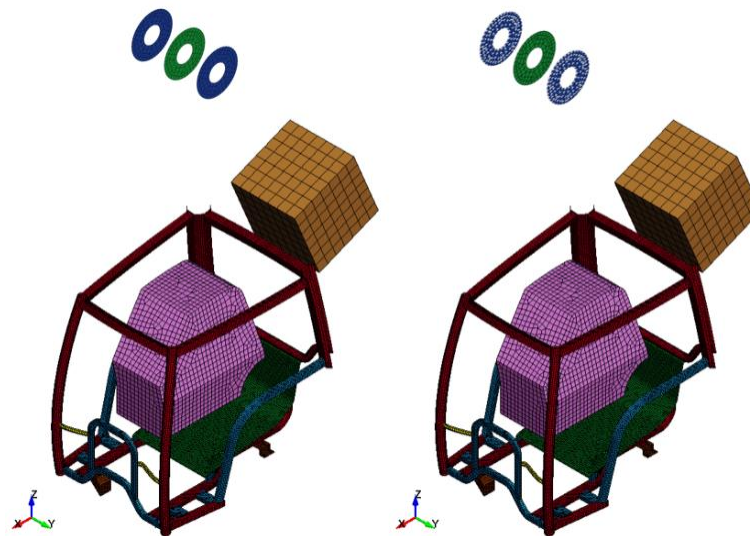
ELABORADO POR: AUTOR

Estas cartas de control determinan las propiedades de los elementos para el análisis, las cartas más relevantes como se muestran son:

- **BOUNDARY.**

Esta carta permite definir los elementos fijos del análisis, los cuales simulan una restricción de rotación y traslación en los tres ejes, además de permitir a otros elementos mantener su posición inicial en el caso de la zona de seguridad para la verificación de la penetración de los elementos estructurales, así también, mantener la ubicación fija del punto pivote del bloque pendular, como se muestra a continuación respectivamente.

Gráfico 66. Asignación de restricción fija a los anillos de péndulo.

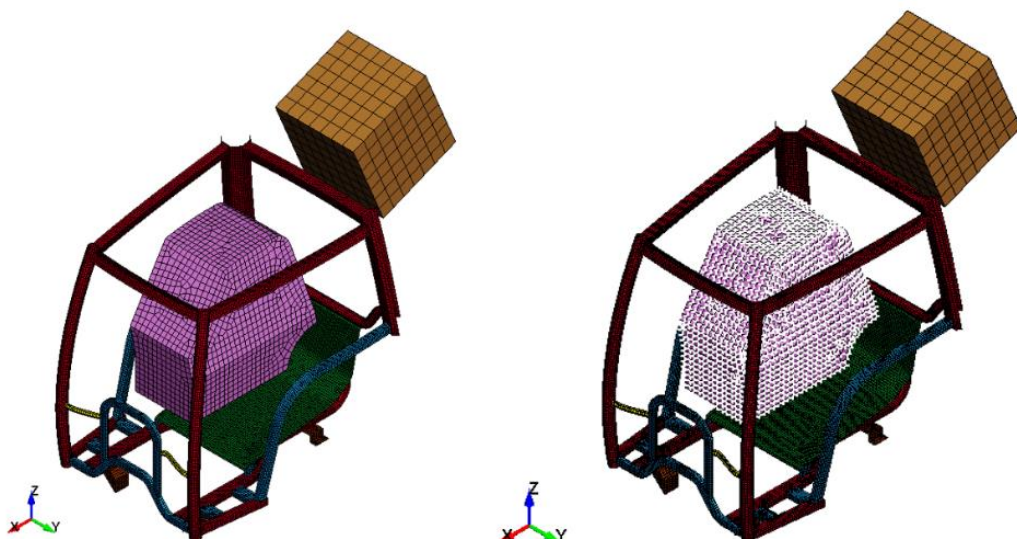


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

La asignación de propiedad fija en la parte de la zona libre, se debe a que no se incluye en la deformación de la estructura de protección, más bien su posición fija hace referencia a la ubicación inicial que tendría la estructura antes de ser deformada por el impacto del bloque pendular.

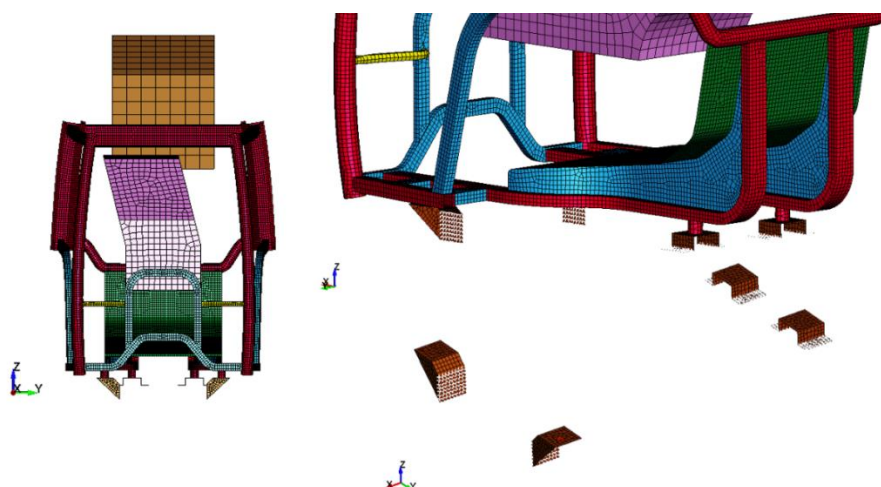
Gráfico 67. Asignación de restricción fija a zona libre.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 68. Asignación de restricción fija a las bases de la estructura de protección.



FUENTE: LS-PREPOST

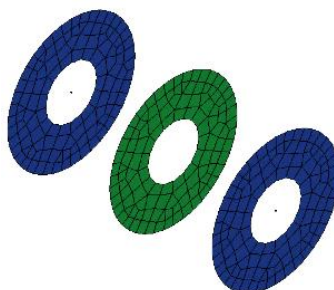
ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en el gráfico anterior, para obtener una base fija para la estructura de protección se asigna la restricción a estas partes haciendo referencia a la ubicación y fijación del soporte de la estructura respecto al tractor.

- **CONSTRAINED.**

La función de esta carta de control es permitir crear la junta de péndulo para el bloque de impacto, se crean una serie de anillos y nodos como se muestra a continuación, las medidas de estas partes son indiferentes y no tiene relación con la estructura de protección. Así mismo, para este estudio con el fin de obtener una geometría igualitaria para cada parte se utilizó un tamaño de diámetro exterior de 200 mm para los tres discos y un diámetro interior de 100 mm, la función de estas partes es dar forma a la conexión de péndulo como se muestra a continuación.

Gráfico 69. Anillos para conexión de péndulo.

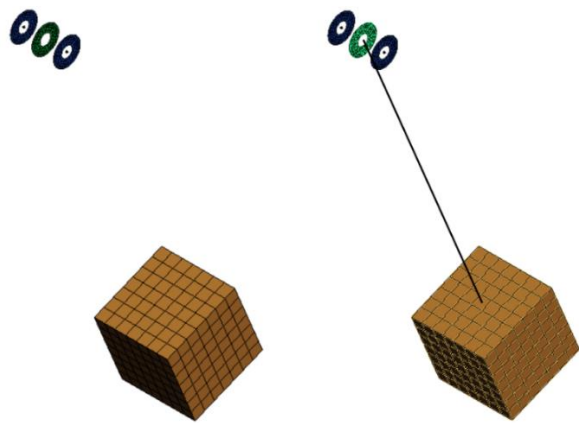


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en el Gráfico anterior cada parte cumple un rol para la ejecución de la conexión, la parte de color verde es la que ejecuta el movimiento giratorio junto con el bloque pendular, los cuales están unidos por la propiedad de cuerpos rígidos, esta propiedad indica la unión de elementos que compartan la misma propiedad de material rígido.

Gráfico 70. Conexión de péndulo entre cuerpos rígidos.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Se mencionó como esos cuerpos no sufrirán deformación alguna ya que su función es proporcionar un cuerpo que pueda ser utilizado como objeto de impacto, pero manteniendo sus propiedades físicas como densidad y masa. Algunas otras cartas de control relevantes son las de contacto, la cual se utiliza para dar una restricción entre los cuerpos al momento de ser impactados, se utiliza el contacto AUTOMATIC SINGLE SURFACE de la base de datos del programa LS-PREPOST para dar una conexión entre las partes que forman el bloque pendular y la estructura de protección.

Para las cartas de control de secciones se utiliza el tipo SHELL y SOLID, las cuales hacen referencia a las partes que se están utilizando para el análisis, a excepción del bloque pendular todas las partes están utilizando secciones de tipo SHELL.

Tabla 14. Asignación de tipo de sección.

	Tipos de sección	
Sólida Bloque pendular	Sección tipo Shell	Espesor
	Estructura ROPS	Definido
	Anillos de péndulo	Defecto 2mm

ELABORADO POR: AUTOR

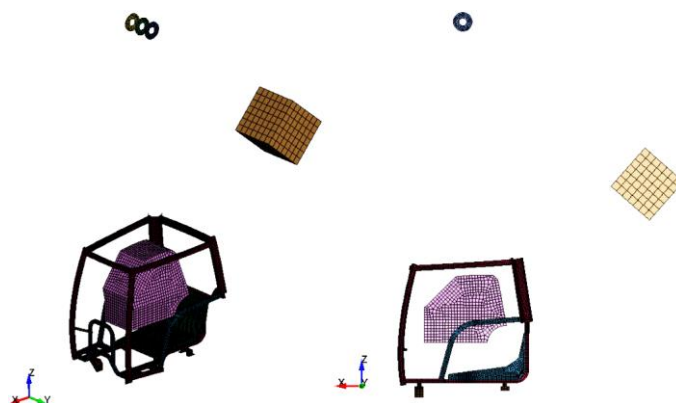
Los tipos de materiales que se utilizan en este estudio son de la base de datos del programa de preprocesamiento LS-PREPOST los cuales son el MAT 020 RIGID para las partes que no presentaran deformación alguna y MAT 024 PIECEWISE LINEAR PLASTICITY para las partes de la estructura de protección, este tipo de material le permitirá al programa poder analizar el comportamiento de las propiedades mecánicas en la zona plástica considerando la zona elástica como un pequeño porcentaje de deformación. A su vez esto permite observar el comportamiento plástico de la estructura de protección al ser impactada por el bloque pendular el cual tendrá una masa determinada.

CONTROL y DATABASE son las cartas de control encargadas de asignar al análisis el tiempo de cálculo y los pasos de tiempo para la salida de resultados respectivamente, las cartas de control de LOAD y DEFINE hace referencia a una aceleración y la curva que la define, en este caso la aceleración utilizada es la gravedad, la cual permite que el péndulo caiga por esta acción y pueda impactar la estructura, la curva se utiliza para determinar que su comportamiento será constante para todo el tiempo de análisis.

4.3.4. Condiciones iniciales para el ensayo de impacto trasero.

Los requerimientos para el ensayo de impacto para la parte trasera de la estructura de protección según el reglamento UE 1322 indica, que el bloque pendular debe tener una masa de 2000 kg, a su vez debe estar ubicado a una altura de 904,10 mm calculada en la sección 4.1.3.1, la ubicación de bloque pendular respecto la estructura de protección se muestra a continuación.

Gráfico 71. Ubicación del bloque pendular para ensayo de impacto trasero.



FUENTE: LS-PREPOST

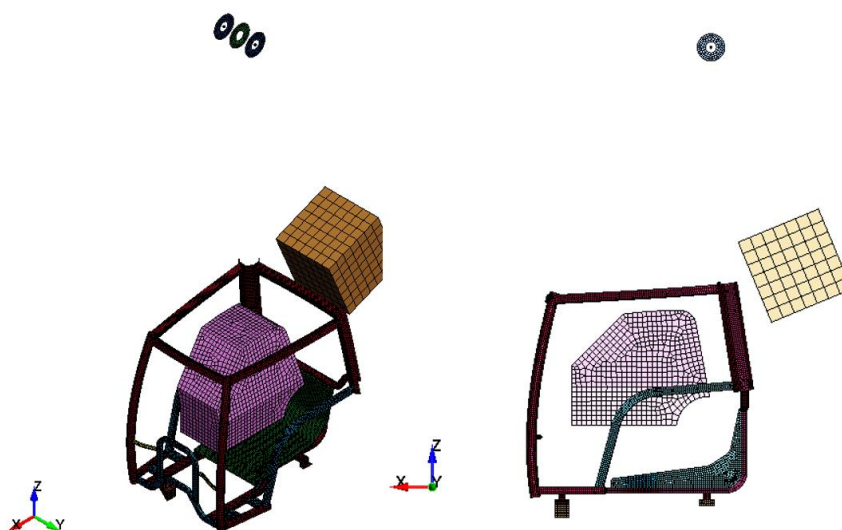
ELABORADO POR: AUTOR

4.3.4.1. Modificación de la altura del péndulo.

Debido a la complejidad del análisis, se modificó la altura del péndulo para evitar pérdidas de tiempo y cálculo incensario, el concepto de análisis de impacto referente al programa utilizado, el cual calcula grandes tensiones y deformaciones en pequeños intervalos de tiempo, al realizar simulaciones con recorridos largos de los elementos el tiempo de cálculo se ve afectado ya que tu tendencia es aumentar significativamente.

Este problema se presenta debido a que el péndulo se encuentra en una posición elevada y el programa realiza cálculos desde su posición inicial. Para reducir y mejorar el tiempo de cálculo del análisis de impacto trasero, se modificó la altura a 53 mm desde el punto centro del bloque pendular. Esta modificación permitió reducir el tiempo de cálculo de 15 a 7 horas para una ambientación de simulación de 0,7 segundos la ilustración de la nueva ubicación del bloque pendular se muestra a continuación.

Gráfico 72. Modificación de la altura del péndulo.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Partiendo de las limitaciones computacionales presentes al realizar la simulación de impacto del bloque pendular con la estructura de protección, se debe considerar que en esta modificación el bloque pendular es lanzado desde el reposo indicando que la velocidad generada no será igual a la que presentaría al ser lanzado de la altura calculada en la sección 4.1.3.1 por lo cual no se cumple con esta condición mencionada en el reglamento. Por ende, los resultados obtenidos no serán iguales a los de un ensayo físico, pero si proporcionará

información respecto al comportamiento que la estructura muestre al ser golpeada por el bloque pendular dado lugar a una base inicial de estudio para investigaciones futuras. Así mismo, se considerar que el reglamento indica que para ensayos físicos esta condición debe cumplirse para una posterior validación. Para caso prácticos de estudios se realiza esta modificación con la finalidad de obtener resultados para evaluar el comportamiento de la estructura mas no para realizar un proceso de validación mediante un ensayo físico.

4.3.4.2. Propiedades de los materiales para el análisis

A continuación, se presentan las tablas con los valores de las propiedades requeridas para el ensayo de impacto trasero de la estructura de protección. Las propiedades utilizadas para el análisis se obtuvieron en referencia a la tabla de aceros las cuales se encuentran en el apartado de anexos de este documento.

Tabla 15. Material rígido del bloque pendular.

Requisito (masa = 2000 kg)	Valor	Unidad
Densidad	$6,36 \times 10^{-9}$	$\frac{\text{Ton}}{\text{mm}^3}$
Módulo de elasticidad	200000	(MPa)
Coefficiente de Poisson	0,26	(%)

ELABORADO POR: AUTOR

Tabla 16. Modificación de la masa del bloque pendular.

Requisito (masa = 2000 kg)		
	Valor	Unidad
Dimensiones del bloque	(680 x 680 x 680)	mm
Densidad inicial	2400	$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
Masa inicial bloque	754,64	kg
754636,8 g		
Masa final bloque	2000	kg
Densidad final	6360,68	$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en la Tabla anterior, el objetivo que debe cumplir el bloque pendular es mantener una masa constante de 2000 kg, para traducir este requisito y llevarlo al programa de preprocesamiento se modificó la densidad del material y su vez se mantienen el Módulo Elástico y Coeficiente de Poisson. Para determinar la densidad final la cual define la masa de 2000 kg se utilizó una regla de tres simple donde:

$$\text{Densidad final} = \frac{\text{Masa final bloque} * \text{Densidad inicial}}{\text{Masa inicial bloque}} \quad (15)$$

Tabla 17. Propiedades para el material rígido de la Zona Libre y Anillos de péndulo.

	Valor	Unidad
Densidad	$7,85 \times 10^{-9}$	$\frac{\text{Ton}}{\text{mm}^3}$
Módulo de elasticidad	200000	(MPa)
Coeficiente de Poisson	0,26	(%)

ELABORADO POR: AUTOR

Tabla 18. Propiedades Mecánicas del acero ASTM A36 para el ensayo de Impacto.

	Valor	Unidad
Densidad	$7,85 \times 10^{-9}$	$\left(\frac{\text{Ton}}{\text{mm}^3} \right)$
Módulo de elasticidad	200000	(MPa)
Coeficiente de Poisson	0,26	(%)
Límite elástico	250	(MPa)
Límite último	400	(MPa)

ELABORADO POR: AUTOR

Estas propiedades son utilizadas para la asignación de los materiales a las partes que forman las estructuras de protección, zona libre, bloque pendular y anillos de péndulo mediante las cartas de control de material las cuales se mencionaron en la sección 4.3.3.1.

4.4. Resultado 1 del ensayo de impacto.

En esta sección se muestran los primeros resultados del comportamiento mecánico de los miembros estructurales que forman la estructura de protección al ser sometidos a

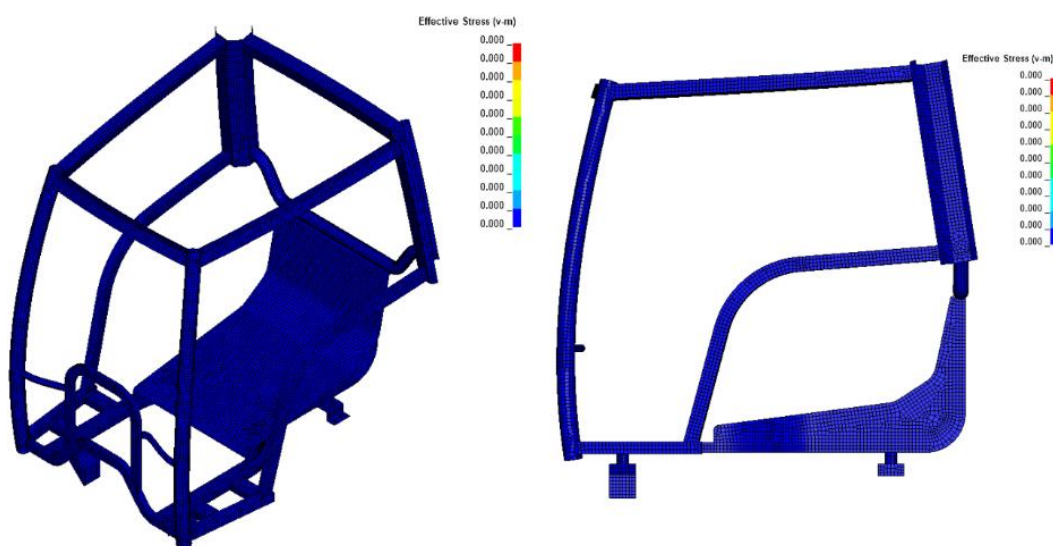
condiciones de carga de impacto. Las variables que se tomarán en cuenta son los esfuerzos máximos de Von Mises, el porcentaje de deformación plástica, desplazamientos resultantes de los miembros estructurales y la verificación de la zona libre.

4.4.1. Esfuerzo de Von Mises.

Bajo las condiciones de carga de impacto y materiales iniciales definidos anteriormente, se obtuvo el comportamiento mecánico de la estructura de protección para la distribución de esfuerzos de Von Mises bajo las propiedades del acero ASTM A36.

Este estudio trata sobre el comportamiento mecánico de la estructura de protección cuando es sometida a una carga de impacto, mediante el análisis dinámico. Por esta razón se dividirán los gráficos de resultados en tres estados de carga, los cuales son, estado de la estructura antes del impacto, estado de estructura en el impacto máximo y estado de la estructura después del impacto.

Gráfico 73. Estado de la estructura antes del impacto.

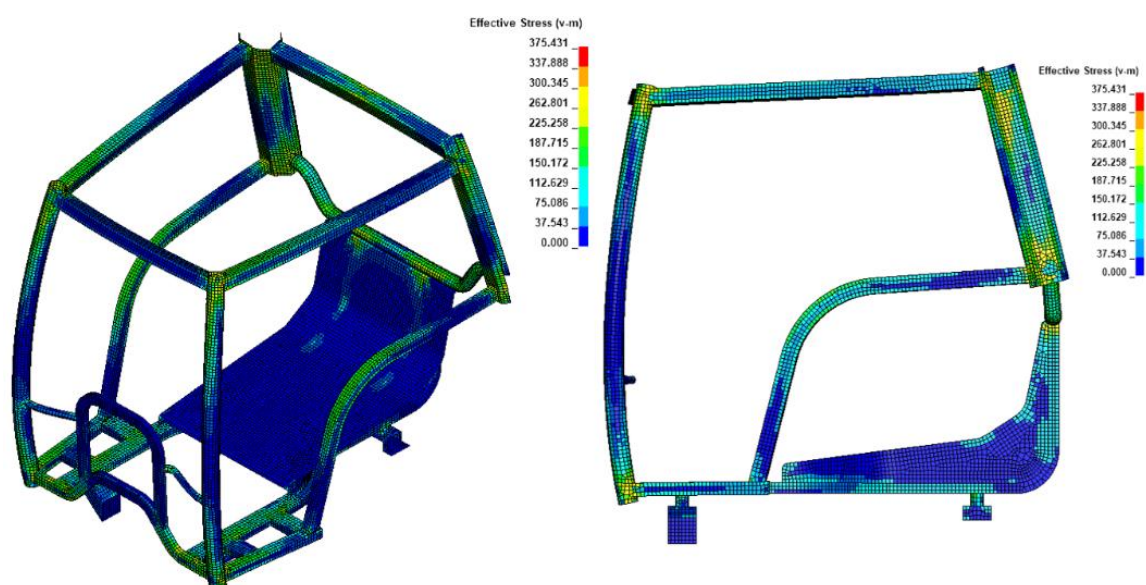


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Al ser golpeada la estructura de protección con el bloque pendular, la distribución de los esfuerzos se va evidenciando al superar el valor del límite elástico del material en ciertas zonas de la estructura, provocando que esta sufra deformaciones plásticas. Esto no significa que el material falle, pero es un claro indicador de que se está alcanzando tensiones máximas por debajo del esfuerzo último del material como se muestra en el siguiente gráfico.

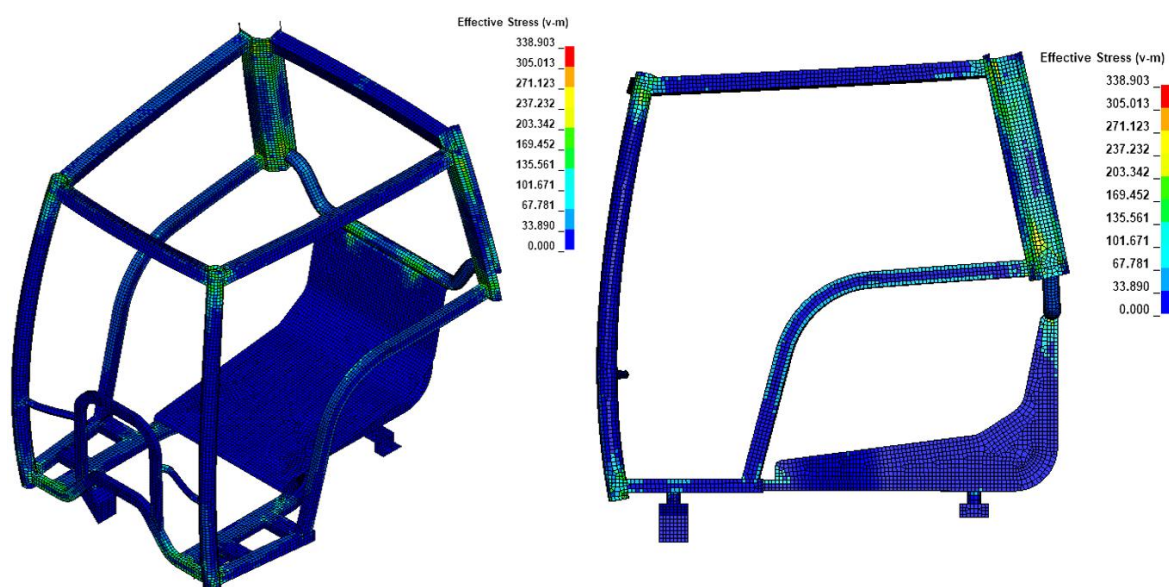
Gráfico 74. Estado de estructura en el impacto máximo.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 75. Estado de la estructura después del impacto.

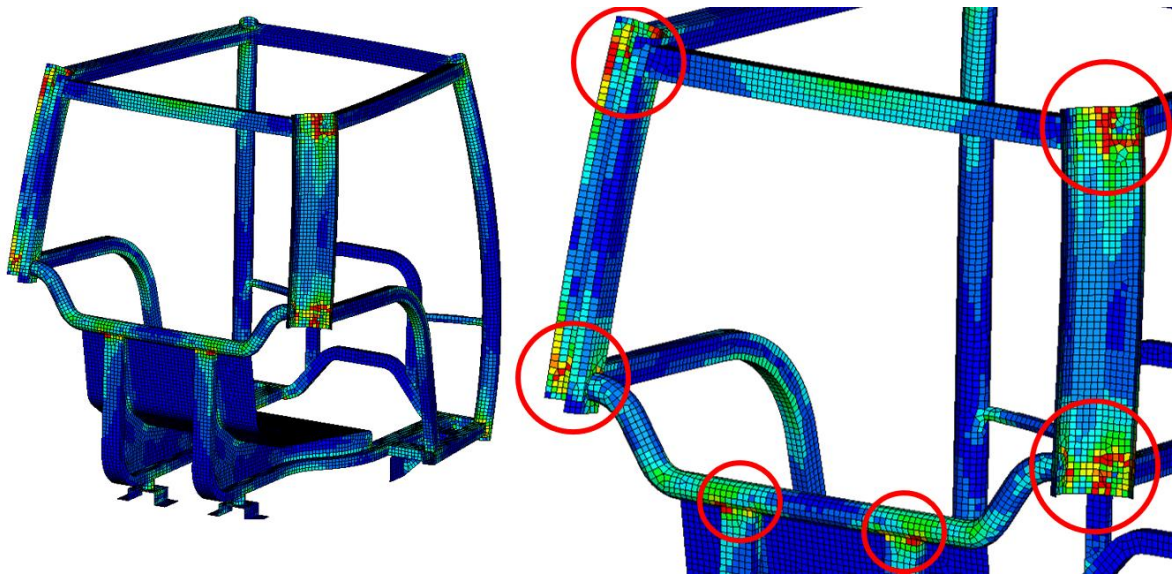


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

La mayoría de los esfuerzos se concentran en las conexiones entre los miembros de la estructura, elementos de refuerzo y los elementos estructurales laterales, la distribución de esfuerzos alcanza un valor de 375,4 MPa en las conexiones principales como se muestra en el siguiente gráfico.

Gráfico 76. Distribución de esfuerzos en el estado de impacto máximo.

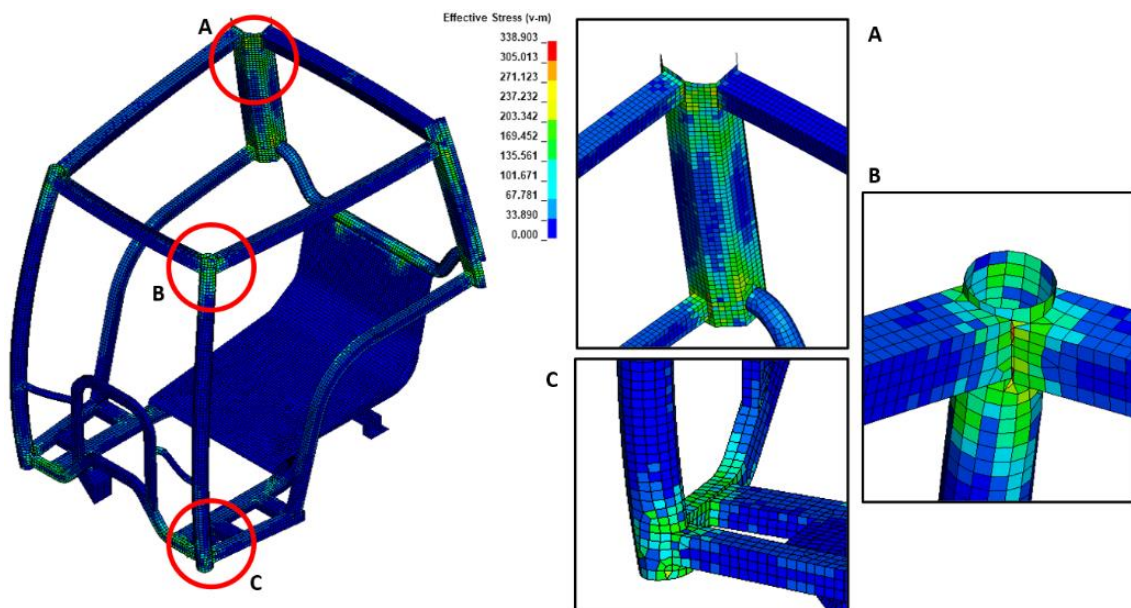


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Al retirarse el bloque pendular por efecto del impacto con la estructura, aparece la distribución de los esfuerzos residuales los cuales alcanzaron un valor de 339 MPa a lo largo de los miembros estructurales y conexiones principales como se muestra en el siguiente gráfico.

Gráfico 77. Distribución de los esfuerzos residuales después de la carga de impacto.



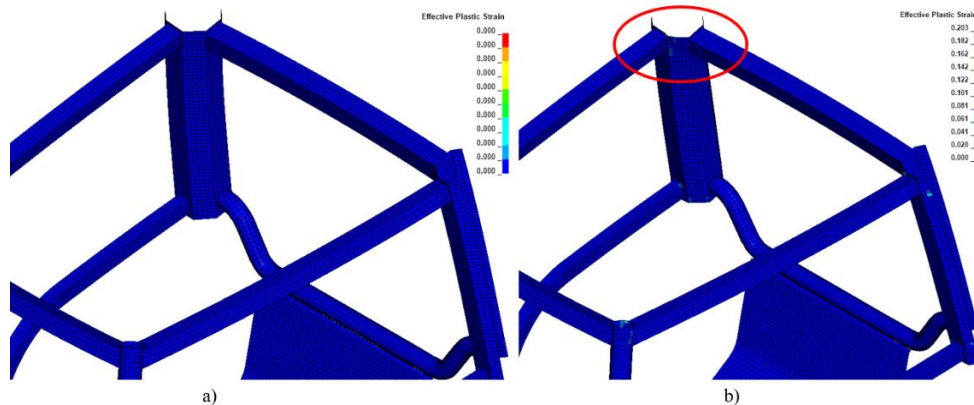
FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

4.4.2. Porcentaje de deformación plástica.

La estructura de protección al vuelco al ser sometida al impacto de bloque pendular alcanza tensiones por encima del valor del límite elástico, esto indica que existirán deformaciones plásticas en la geometría de la estructura, a continuación, se muestra la distribución de deformación plástica en la estructura de protección.

Gráfico 78. Distribución de deformación plástica.

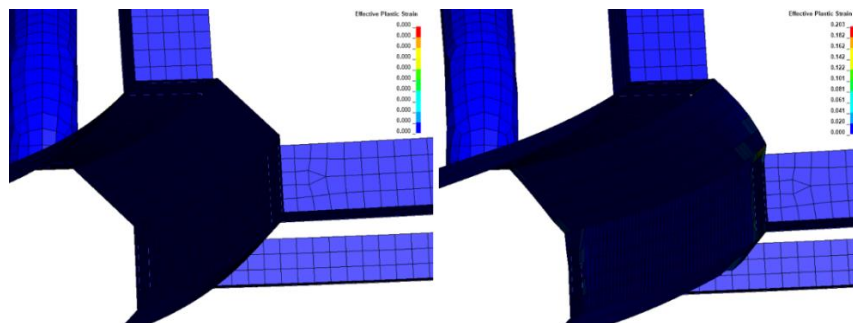


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en el gráfico, al retirarse la carga del impacto se presentan pequeñas deformaciones en algunos lugares como las conexiones de esquinas, el valor para el porcentaje de deformación plástica para el modelo de estructura y material utilizado es de 0,203 equivalente al 20,3% por debajo del porcentaje de elongación del material utilizado, esto indica que existe una deformación permanente en ciertas zonas de la estructura, pero sin llegar al fallo del material.

Gráfico 79. Comparación del miembro estructural antes y después del impacto.

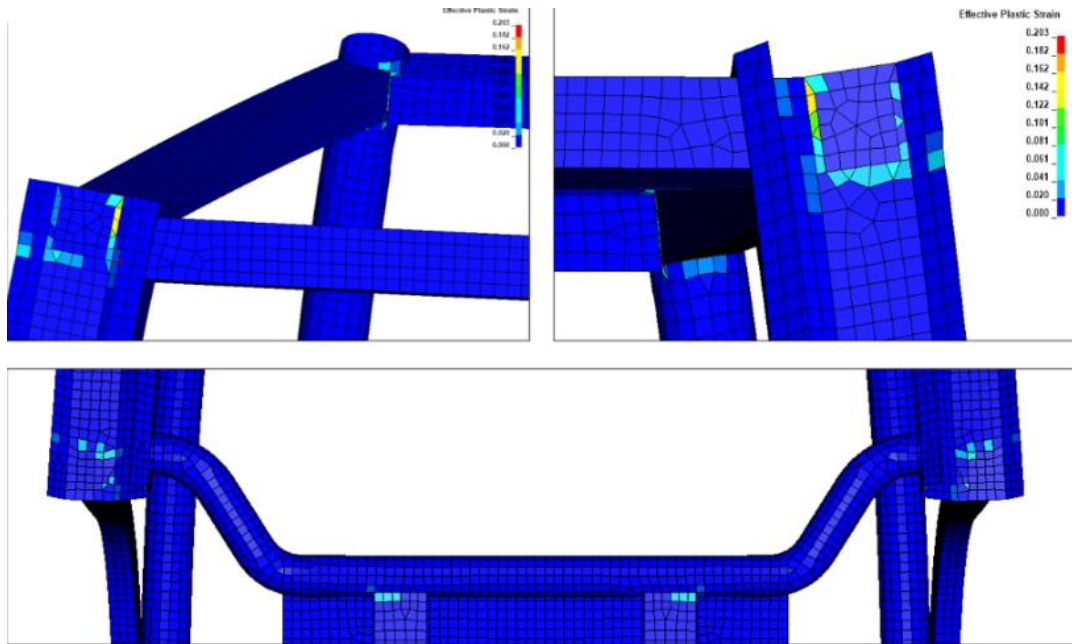


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Las zonas con más afectación por parte del impacto del bloque pendular son las conexiones principales entre los miembros tubulares cuadrados y redondos, así mismo en el perfil especial, el cual presenta una evidencia de deformación mientras se aplica la carga causando que al ser retirada presenten deformaciones permanentes en la estructura. A continuación, se muestran estas zonas donde se observa la distribución de deformación en los perfiles estructurales.

Gráfico 80. Distribución de la deformación plástica en las conexiones de la estructura.



FUENTE: LS-PREPOST

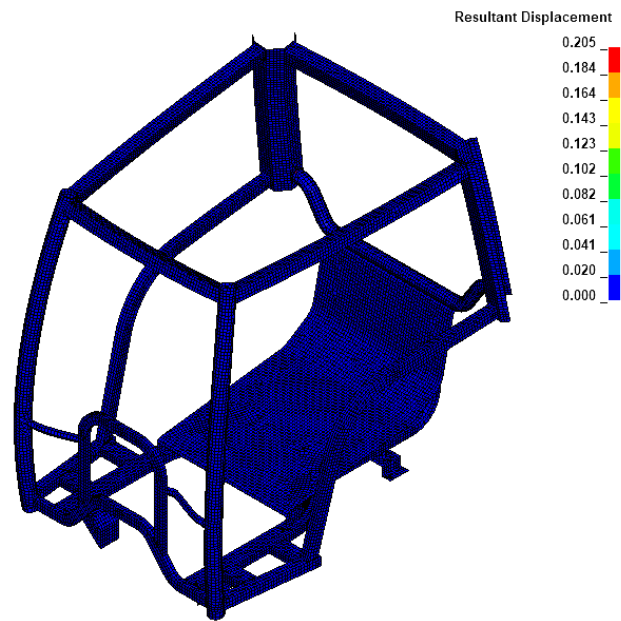
ELABORADO POR: AUTOR

4.4.3. Desplazamientos resultantes de la estructura.

Para este caso de estudio se excluirá el desplazamiento del bloque pendular, este podría proporcionar información errónea sobre el desplazamiento de los miembros estructurales, este es un cuerpo en movimiento y por ende presenta desplazamientos que serán adheridos a la métrica de medición de los desplazamientos totales.

Al igual que los esfuerzos de Von Mises, para los desplazamientos también existen los tres estados de carga de impacto, el primer estado de desplazamiento antes del impacto, el segundo estado de desplazamiento durante el impacto máximo y el último estado de desplazamiento después de la carga de impacto como se muestra a continuación.

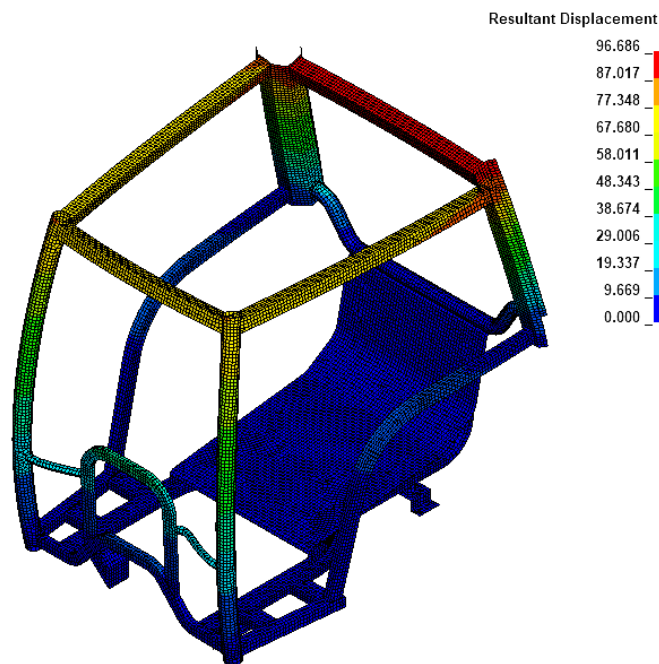
Gráfico 81. Estado 1 de desplazamiento antes del impacto.



FUENTE: LS-PREPOST
ELABORADO POR: AUTOR

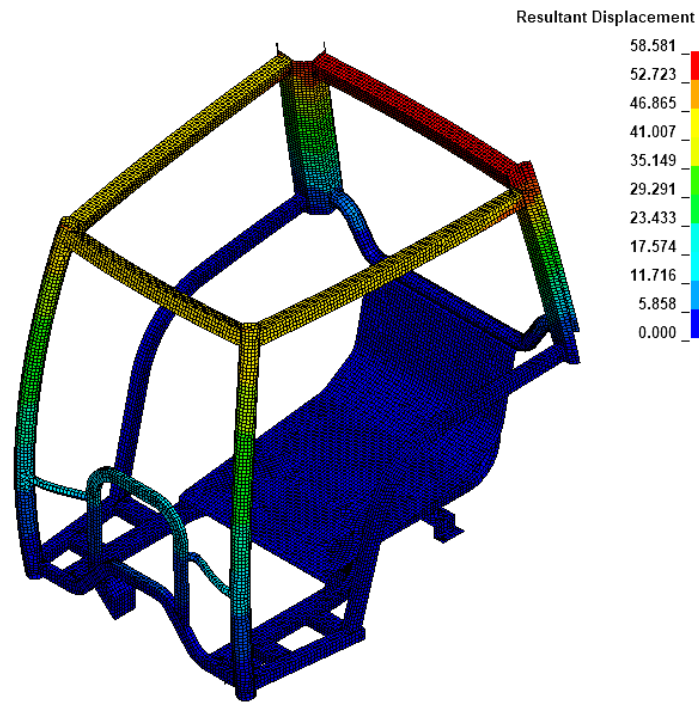
En este estado no se presentan desplazamientos significativos de la estructura, la medición de la métrica incluye valores asignados a pequeños desplazamientos debido a efectos de la gravedad.

Gráfico 82. Estado 2 de desplazamiento durante el impacto máximo.



FUENTE: LS-PREPOST
ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 83. Estado 3 de desplazamiento después de la carga de impacto.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en los gráficos anteriores respectivamente el máximo desplazamiento para el estado 2 es de 96,688 mm respecto a su posición inicial, así mismo, en el estado 3 de desplazamiento después de la carga de impacto se presenta un valor de 58,581 mm para los desplazamientos de los miembros estructurales de la parte superior del modelo.

Como se indica en la sección 2.2.15.7. para la medición de la deformación elástica que presenta la estructura de protección después de ser impactada por el bloque, se utiliza un equipo instalado en el modelo físico de la estructura, la cual permite determinar la deformación elástica en base a la deformación total y la deformación permanente. Este estudio solo considera el análisis computacional del modelo para la estructura de protección, es por esta razón que en base a la configuración prescrita se plantea la siguiente ecuación para determinar la deformación elástica que se presenta para este caso de estudio bajo las condiciones establecidas.

$$D_T = D_p - D_e \quad (16)$$

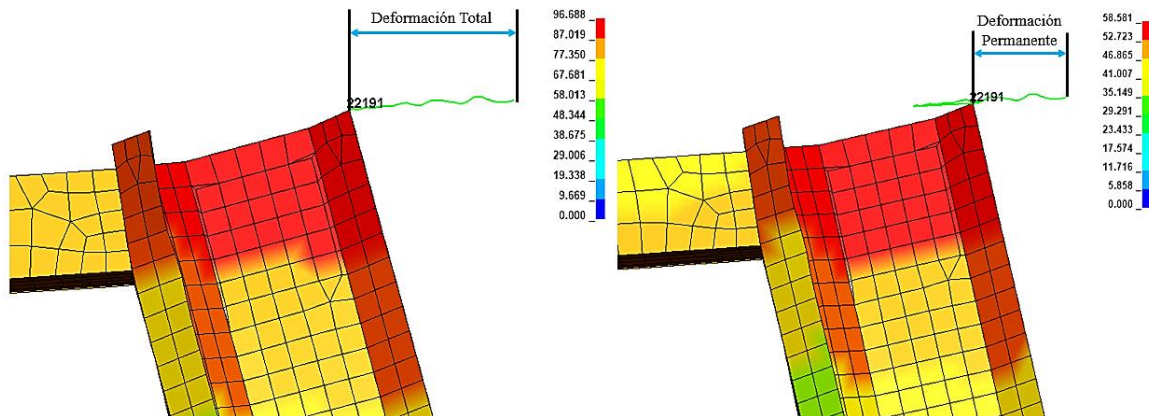
Donde:

D_T : Deformación total alcanzada

D_p : Deformación permanente después del impacto

D_e : Deformación elástica alcanzada durante el impacto máximo

Gráfico 84. Rastreo de nodos.

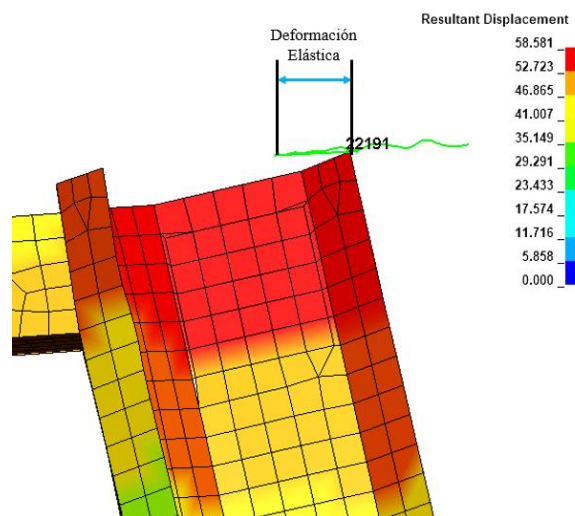


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en el gráfico anterior el valor de deformación total y deformación permanente se obtiene gracias a los desplazamientos, para detectar estos valores se utiliza las funciones de rastreo de nodos para verificar su posición durante el impacto.

Gráfico 85. Ubicación de la deformación Elástica.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Al reemplazar los valores obtenidos para los desplazamientos durante y después de la carga de impacto se obtienen los siguiente.

$$D_T = D_p - D_e \quad (16)$$

$$D_e = D_T - D_p$$

$$D_e = 96,688 - 58,581$$

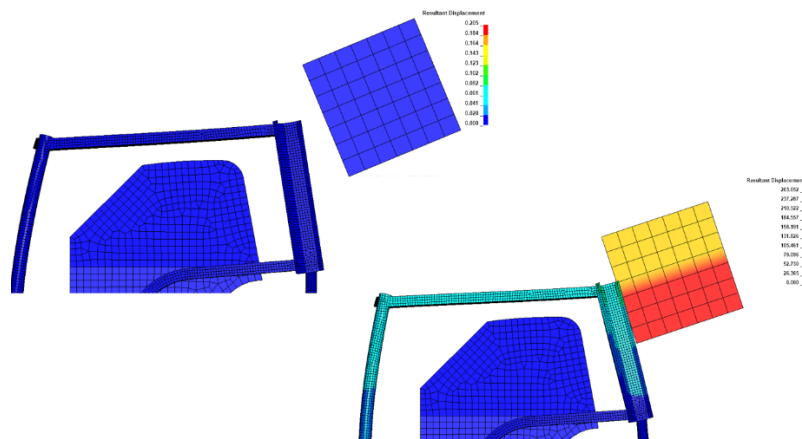
Para las condiciones prescritas y material asignado en la primera simulación se obtiene una deformación elástica en la estructura de:

$$D_e = 38,107 \text{ mm}$$

4.4.4. Verificación de la zona libre.

Para verificar que no exista penetración de los miembros estructurales en la zona libre se activan los elementos del bloque pendular y la zona libre como se muestra a continuación.

Gráfico 86. Verificación de la zona libre.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Se tomó en consideración la métrica de desplazamientos para verificar si existe penetración de los elementos en la zona libre del conductor. Para las condiciones iniciales consideradas para el ensayo referente a la ubicación del bloque pendular y las propiedades del material asignado, se verifica que no existe penetración de los elementos cuando se alcanza el estado máximo de desplazamiento para las condiciones de ensayo.

4.5. Selección de material.

En base al análisis realizado a la estructura de protección bajo las condiciones de ensayo de impacto y propiedades del material, como objetivo de mejorar las propiedades con el fin de observar el comportamiento de la estructura para determinar si el rendimiento mecánico aumenta o disminuye se procederá a realizar una selección de material adecuado para el ensayo requerido.

El objetivo principal de esta selección es mejorar las propiedades del material inicial el cual es un acero ASTM A36, para esto se utilizará la metodología Ashby y la selección computacional por el método gráfico, con el fin de obtener dentro de un universo de materiales las alternativas más adecuadas según sus propiedades y aplicación.

A su vez mediante la metodología de AHP poder jerarquizar estas alternativas y obtener el material más adecuado para someterlo a las mismas condiciones de análisis y verificar su comportamiento.

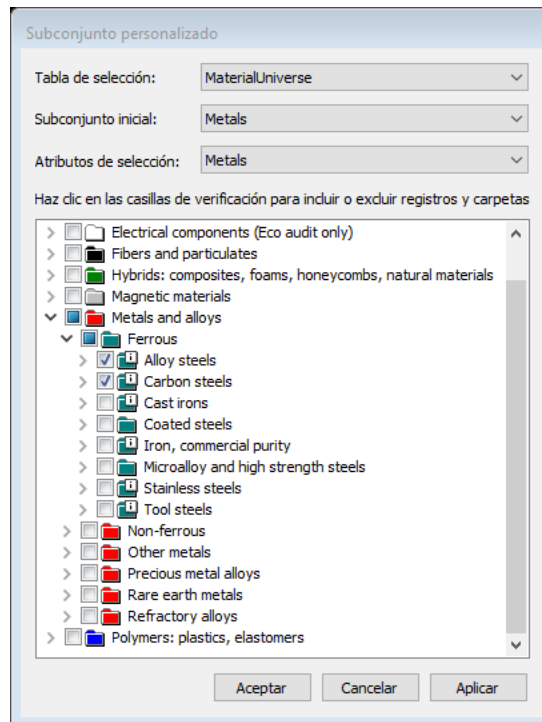
4.5.1. Selección computacional mediante el CES Edupack.

Para encontrar una serie de materiales aptos para ser seleccionados como alternativas se utilizó los siguientes requerimientos y limitaciones.

- Mejorar las propiedades del material ASTM A36
- Seleccionar la familia de materiales a utilizar
- Plantear límites de propiedades para la reducción de resultados
- Seleccionar 4 alternativas que cumplan los requisitos mínimos de propiedades y aplicación.

Como se menciona, el primer paso es la selección de la familia de materiales los cuales serán utilizados para su evaluación de propiedades para obtener las alternativas más adecuadas las cuales cumplen con los límites planteados.

Gráfico 87. Selección de la familia de materiales en el programa CES Edupack.

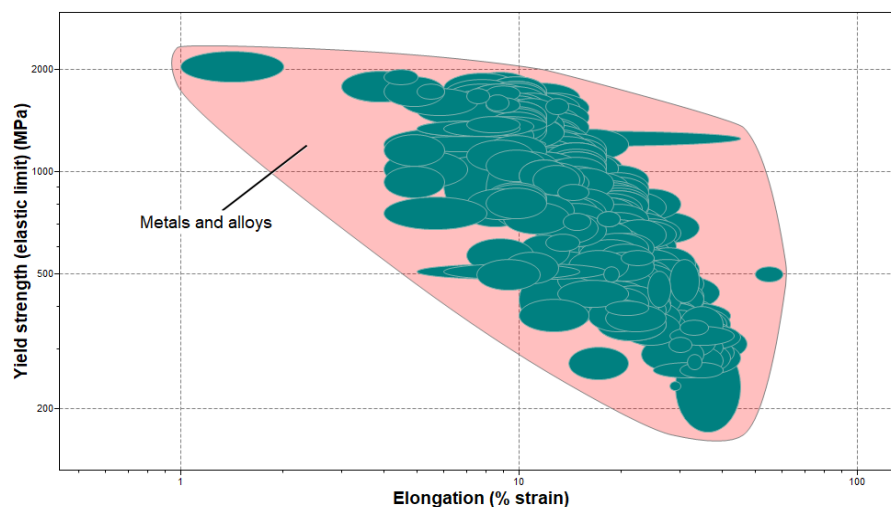


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

En base a estudios realizados y a la aplicación en industria se selecciona las familias de materiales de aceros los cuales presentan propiedades apropiadas para ser utilizadas en este estudio.

Gráfico 88. Familia de aceros según el límite elástico y el porcentaje de elongación.



FUENTE: CES EDUPACK

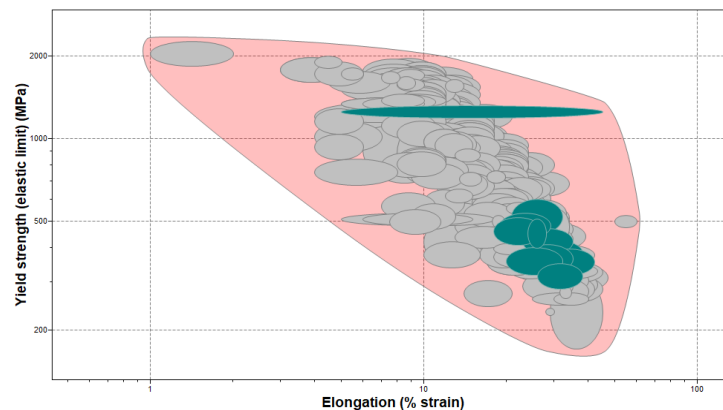
ELABORADO POR: AUTOR

Para reducir la cantidad de materiales disponibles, los cuales alcanzan un número de 308, se plantea inicialmente la discretización de las familias de aceros iniciando este proceso con los valores mínimos de las propiedades del acero ASTM A36 con el fin de disminuir las opciones disponibles según el Gráfico anterior. A continuación, se muestran los valores iniciales de las propiedades mínimas utilizadas como punto de partida para la selección de un material, el cual puede presentar mejores características en comparación con el material inicial.

- Módulo de Young: 200 GPa
- Límite elástico: 250 MPa
- Esfuerzo último: 400 MPa
- % Elongación: 26%

Estos valores son proporcionados por el programa de selección en base a documentación de códigos, normas y tablas predefinidas. Al ingresar los valores anteriores para la reducción de la cantidad de materiales, se obtuvo una respuesta de 308 a 12 materiales disponibles los cuales cumplen con las propiedades antes planteadas, estos materiales se muestran a continuación

Gráfico 89. Reducción de la cantidad de los aceros según las propiedades mínimas.

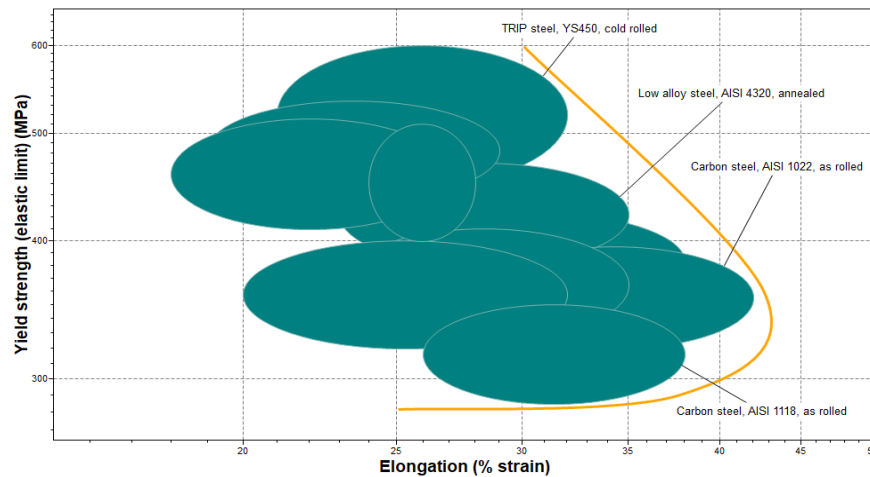


FUENTE: CES EDUPACK

ELABORADO POR: AUTOR

Los requerimientos que estos materiales deben presentar son el aumento del valor en sus propiedades mecánicas y el uso típico de estos materiales en la aplicación de estructuras de protección. Para minorar el número de alternativas disponibles se traza una curva con tendencia al aumento de las propiedades mecánicas mostradas en el siguiente Gráfico, esto se realiza para seleccionar a los materiales que se encuentren aproximado a dicha curva.

Gráfico 90. Alternativas de aceros según los requerimientos deseados.



FUENTE: CES EDUPACK

ELABORADO POR: AUTOR

Los materiales que se encuentran cerca de la curva y que presentan una etiqueta, muestran mejores características según el requerimiento del aumento en el valor de las propiedades como el límite elástico y el esfuerzo último, así mismo, su aplicabilidad en este campo de estudio. En el Gráfico 89, la familia de materiales resaltado en color verde de la parte superior es omitido de esta consideración, al no presentar una utilidad en el campo de aplicación tratándose de aleaciones especiales las cuales son de difícil adquisición. Así mismo, el precio promedio para este material denominado aleación intermedia, acero Fe-9Ni-4Co-0.20C, templado y revenido o ASTM A646 Grado 16 varía entre $(27,4 - 29,3) \frac{\text{USD}}{\text{kg}}$, mientras que para las opciones señaladas en el Gráfico 90 los precios promedios varían entre $(0,75 - 1,35) \frac{\text{USD}}{\text{kg}}$, estos valores son una aproximación general de los precios según las bases de datos del CES Edupack.

Algunos criterios de selección como el costo de los materiales o la disponibilidad fueron omitidos de este proceso de discretización, siendo el objetivo principal de estudio analizar el comportamiento de la estructura de protección y observar su comportamiento mecánico, las alternativas de aceros que se consideran para este análisis son los siguientes.

- Acero AISI 1118
- Acero AISI 1022
- Acero AISI 4320
- Acero TRIP YS450

4.5.2. Jerarquización AHP.

Para determinar cuál de las opciones disponibles es la alternativa más adecuada, se evaluarán las propiedades como criterios que deben cumplir los materiales con una tendencia superior al material inicial utilizado en el ensayo de impacto trasero y los materiales como alternativas como se muestra a continuación.

Tabla 19. Propiedades mínimas de las alternativas de material.

Alternativas	Límite elástico [MPa]	Esfuerzo último [MPa]	Elongación (%)	Densidad $\frac{kg}{m^3}$
AISI 1118	285	465	26	7800
AISI 1022	320	450	28	7800
AISI 4320	380	520	23	7800
YS450	450	780	21	7800

ELABORADO POR: AUTOR

Los valores mínimos mostrados son proporcionados por el programa CES Edupack, los cuales son la respuesta a los límites planteados en la sección anterior. En base a la sección 2.2.14.3 se aplica el método AHP para jerarquizar las alternativas de materiales mostrando en respuesta un solo material adecuado para ser utilizado bajo las mismas condiciones de carga del ensayo de impacto trasero.

Tabla 20. Matriz (A) de comparación de criterios.

Criterios	Límite elástico	Esfuerzo último	Elongación	Densidad
Límite elástico	1	0,2	0,333	3
Esfuerzo último	5	1	3	5
Elongación	3	0,333	1	5
Densidad	0,333	0,2	0,2	1
TOTAL	9,333	1,733	4,533	14

ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en la tabla, se realiza la ponderación de importancia según la escala de valoración de Saaty la cual se muestra en la sección 2.2.14.3 Gráfico 37, en la cual indica los pesos para cada valoración.

A continuación, se realiza la matriz normalizada para obtener los pesos de las valoraciones de cada criterio, este proceso consiste en tomar el cada uno de los valores de la columna de criterios y dividirlo para la sumatoria total de la misma columna respectivamente.

Tabla 21. Matriz normalizada.

Matriz normalizada			
0,11	0,12	0,07	0,21
0,54	0,58	0,66	0,36
0,32	0,19	0,22	0,36
0,04	0,12	0,04	0,07

ELABORADO POR: AUTOR

El valor de ponderación se obtiene a través del promedio de cada fila de la matriz normalizada.

Tabla 22. Ponderación de la Matriz normalizada y autovalor de (A).

Ponderación [w]	A*w
0,13	0,53
0,53	2,32
0,27	1,17
0,07	0,27

ELABORADO POR: AUTOR

A su vez el auto valor de la matriz de criterio (A) se obtiene por medio de la multiplicación de la matriz normalizada por la ponderación [w].

Para comprobar que no existan inconsistencias en la ponderación de los criterios se realiza el cálculo de la relación de consistencia a partir del índice de consistencia por medio de la Ecuación 11 planteada en el capítulo 2 [40].

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

Donde el autovalor de λ_{max} será igual a la sumatoria total de la matriz columna A*w, n es dimensión de la matriz de decisión.

$$\lambda_{max} = 4,28$$

$$n = 4$$

Al reemplazar estos valores en la ecuación 11 se obtiene lo siguiente:

$$IC = \frac{4,28 - 4}{4 - 1}$$

$$IC = 0,0949$$

A continuación, se calcula el índice aleatorio por medio de la ecuación 13, el valor de índice aleatorio para una matriz de comparación de $n = 4$ es igual a 0,99, según el Gráfico 38 de la sección 2.2.14.3 la siguiente ecuación se utiliza para comprobar si se cumple esta condición [39].

$$IA = \frac{1,98(n - 2)}{n} \quad (13)$$

$$IA = \frac{1,98(4 - 2)}{4}$$

$$IA = 0,99$$

Se calcula la relación de consistencia para comprobar si la ponderación de los criterios fue adecuados, así mismo existe un rango de aceptación para la relación de consistencia la cual se muestra en el Gráfico 39 de la sección 2.2.14.3 [40].

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (12)$$

Se reemplazan los valores obtenidos del índice de consistencia y el índice aleatorio en la ecuación de la relación de consistencia como se muestra a continuación.

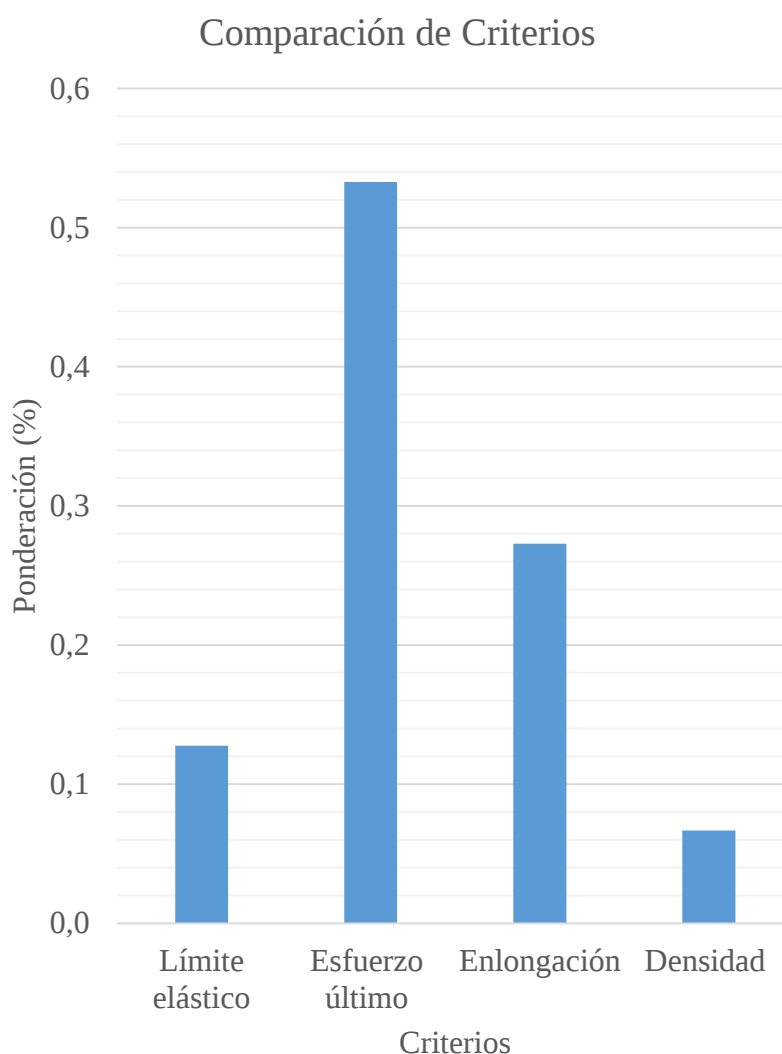
$$RC = \frac{IC}{IA}$$

$$RC = \frac{0,0949}{0,99}$$

$$RC = 0,959$$

La relación de consistencia calculada cumple con la condición de $RC < 0,1$ o el 10% presentando un valor de 9,6 %, al haber calculado los valores de ponderación para cada criterio de aceptación se obtuvo lo siguiente:

Gráfico 91. Comparación de criterios.



ELABORADO POR: AUTOR

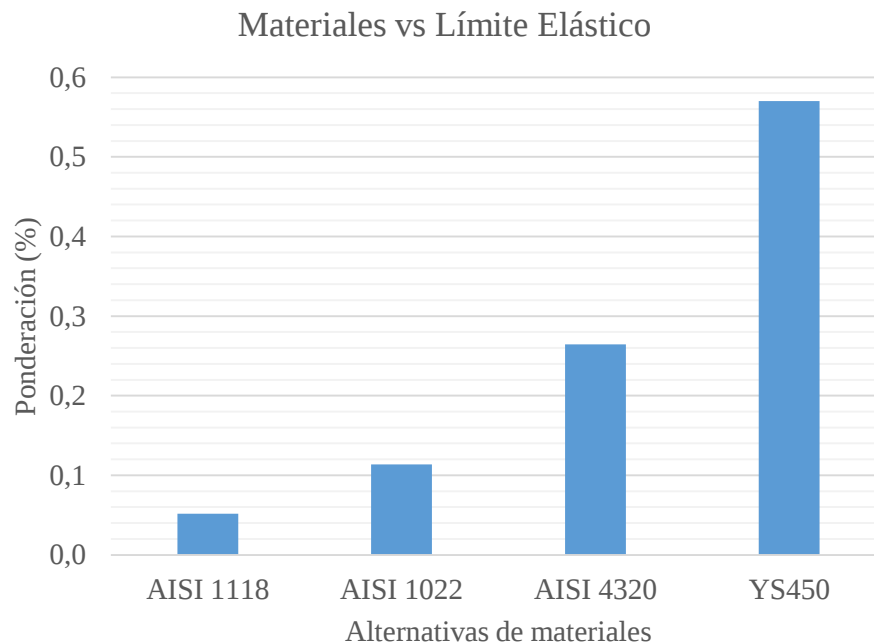
Los pesos porcentuales calculados para cada uno de los criterios, indican la importancia que estos tienen en relación a los requerimientos para los análisis de impacto a partir de la matriz de comparación de criterios. El ranking de importancia para los criterios se ordena del mínimo al máximo valor porcentual alcanzado, estos presentan valores de 6,67 % de importancia para el criterio de densidad, 12,76% de importancia para el criterio del límite elástico, 27,29% de importancia para el criterio de elongación y un 53,29% de importancia para el criterio de esfuerzo último del material, considerado para este estudio el criterio de mayor relevancia respecto los demás criterios. Se realiza el mismo proceso de comparación y de obtención de la ponderación en base a la matriz normalizada para las alternativas respecto cada criterio como se muestra a continuación.

Tabla 23. Matriz de comparación de Alternativas respecto el límite elástico.

Alternativas	Criterio: Límite Elástico			
	AISI 1118	AISI 1022	AISI 4320	YS450
AISI 1118	1	0,333	0,2	0,143
AISI 1022	3	1	0,333	0,2
AISI 4320	5	3	1	0,5
YS450	7	5	5	1
TOTAL	16	9,333	6,5333	1,843

ELABORADO POR: AUTOR**Tabla 24.** Matriz normalizada respecto al criterio de límite elástico.

Matriz normalizada				Ponderación
0,063	0,036	0,031	0,078	0,052
0,188	0,107	0,051	0,109	0,114
0,313	0,321	0,153	0,271	0,265
0,438	0,536	0,765	0,543	0,570

ELABORADO POR: AUTOR**Gráfico 92.** Comparación de alternativas respecto el límite de elasticidad.**ELABORADO POR: AUTOR**

Los valores para las ponderaciones para los materiales van desde el 5,16% para el AISI 1118, 11,35% para el AISI 1022, 26,46% para el AISI 4320, y el 57,03% para el acero YS450.

Tabla 25. Matriz de comparación de alternativas respecto el esfuerzo último.

Criterio: Esfuerzo Último				
Alternativas	AISI 1118	AISI 1022	AISI 4320	YS450
AISI 1118	1	3	0,2	0,143
AISI 1022	0,333	1	0,2	0,143
AISI 4320	5	5	1	0,2
YS450	7	7	5	1
TOTAL	13,333	16	6,4	1,486

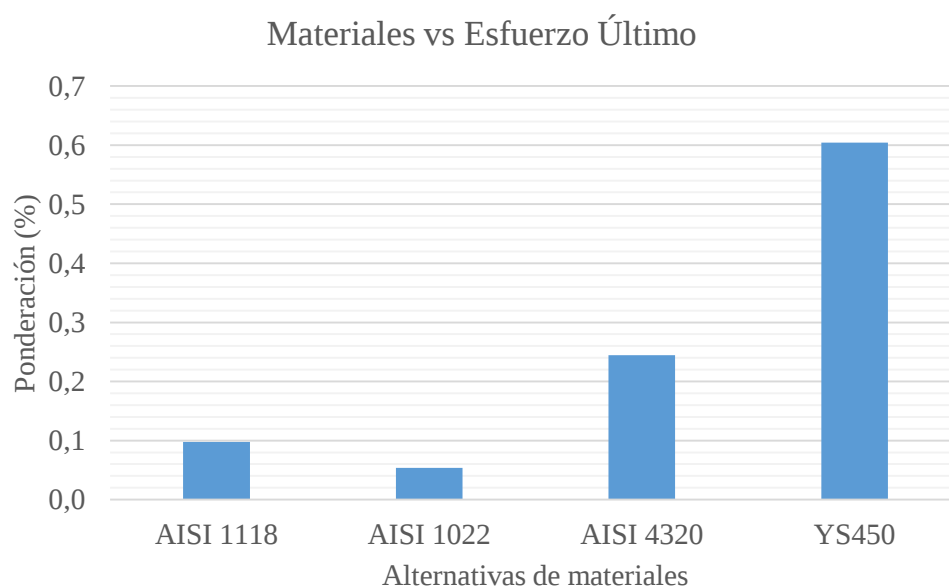
ELABORADO POR: AUTOR

Tabla 26. Matriz normalizada respecto al criterio de esfuerzo último.

Matriz normalizada				Ponderación
0,075	0,188	0,031	0,096	0,097
0,025	0,063	0,031	0,096	0,054
0,375	0,313	0,156	0,135	0,245
0,525	0,438	0,781	0,673	0,604

ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 93. Comparación de alternativas respecto al Esfuerzo Último.



ELABORADO POR: AUTOR

Para la gráfica anterior se tiene un valor de 9,75% para el AISI 1118, 5,37% para el AISI 1022, 24,46% para el AISI 4320 y un valor del 60,42% para el YS450.

Tabla 27. Matriz de comparación de alternativas respecto la elongación.

Alternativas	Criterio: Elongación			
	AISI 1118	AISI 1022	AISI 4320	YS450
AISI 1118	1	0,333	5	7
AISI 1022	3	1	7	9
AISI 4320	0,2	0,143	1	3
YS450	0,143	0,111	0,333	1
TOTAL	4,343	1,587	13,333	20

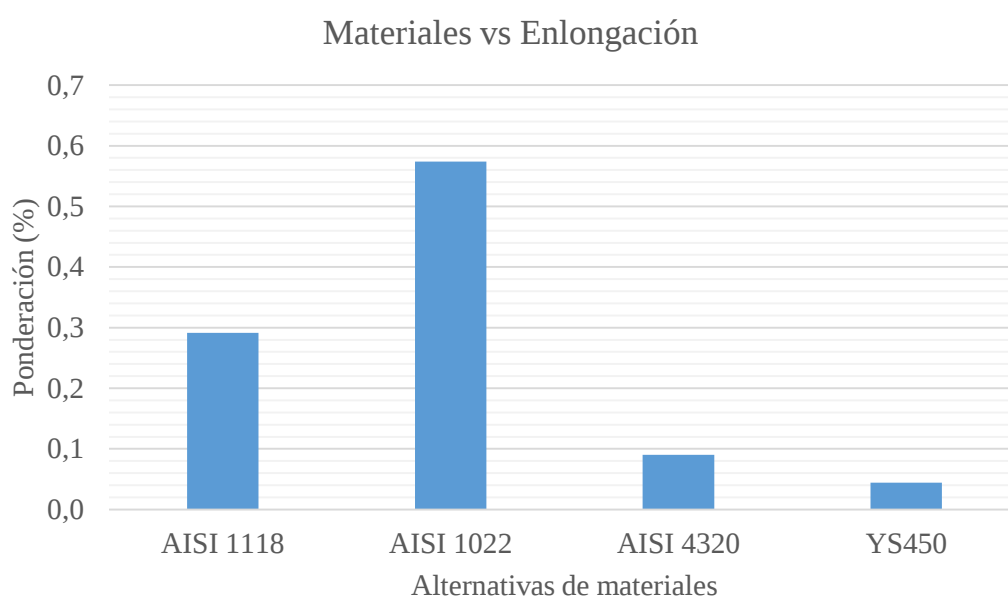
ELABORADO POR: AUTOR

Tabla 28. Matriz normalizada para las alternativas respecto el criterio de elongación.

Matriz normalizada				Ponderación
0,230	0,210	0,375	0,350	0,291
0,691	0,630	0,525	0,450	0,574
0,046	0,090	0,075	0,150	0,090
0,033	0,070	0,025	0,050	0,044

ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 94. Comparación de alternativas respecto a la elongación.



ELABORADO POR: AUTOR

Los valores para la gráfica van del 29,13% para el AISI 1118, 57,39% para el AISI 1022, 9,03% para el AISI 4320 y un valor del 4,45% para el YS450.

Tabla 29. Matriz de comparación de alternativas respecto la densidad.

Alternativas	Criterio: Densidad			
	AISI 1118	AISI 1022	AISI 4320	YS450
AISI 1118	1	1	1	1
AISI 1022	1	1	1	1
AISI 4320	1	1	1	1
YS450	1	1	1	1
TOTAL	4	4	4	4

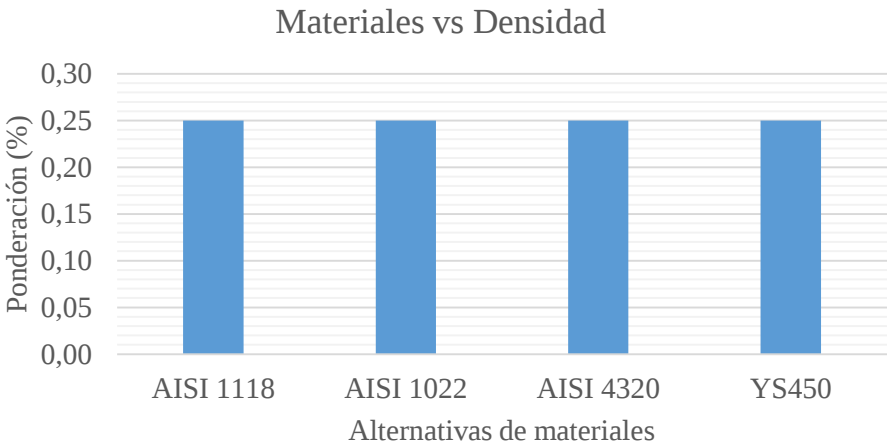
ELABORADO POR: AUTOR

Tabla 30. Matriz normalizada para las alternativas respecto el criterio de densidad.

Matriz normalizada				Ponderación
0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
0,250	0,250	0,250	0,250	0,250

ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 95. Comparación de alternativas respecto la densidad.



ELABORADO POR: AUTOR

Para el caso de la evaluación de las alternativas respecto la densidad para todos se obtiene un valor del 25%, esto sucede debido a que todos los materiales comparten el mismo valor de densidad y tienen la misma importancia. Se debe considerar que para este análisis se busca mejorar las propiedades mecánicas del material, para determinar si al existir un cambio en las propiedades del material existe una mejora en el rendimiento estructural bajo las condiciones prescritas.

Tabla 31. Matriz de Priorización de alternativas respecto los criterios.

Criterio / Alternativa	Límite Elástico	Esfuerzo Último	Elongación	Densidad
AISI 1118	0,052	0,097	0,291	0,250
AISI 1022	0,114	0,054	0,574	0,250
AISI 4320	0,265	0,245	0,090	0,250
YS450	0,570	0,604	0,044	0,250
Ponderación	0,128	0,533	0,273	0,067

ELABORADO POR: AUTOR

Al obtener todas las ponderaciones para cada uno de los criterios y alternativas de materiales se procede a obtener la matriz columna de priorización de alternativas.

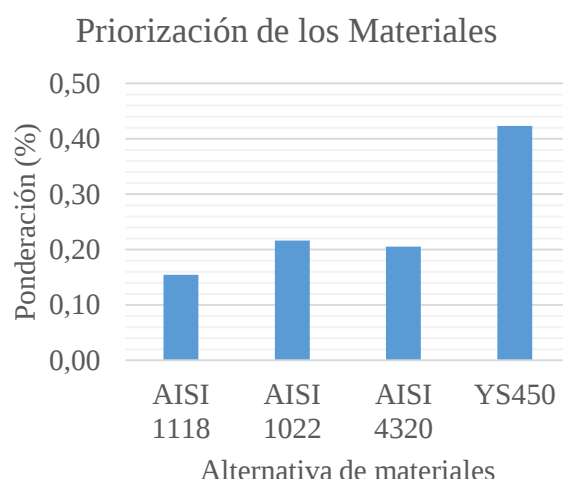
Tabla 32. Priorización de Alternativas y valores porcentuales.

Priorización	Porcentajes
0,155	15,47%
0,216	21,64%
0,205	20,54%
0,424	42,35%

ELABORADO POR: AUTOR

Para la obtención de los resultados de priorización se sigue la siguiente secuencia, la obtención del valor del 0,155 procede de la sumatoria de los productos de la fila del material 1 respecto los criterios entre la fila de ponderaciones respecto a cada criterio. Este paso se realiza para cada alternativa de material, con el fin de obtener su valor de priorización respecto los criterios asignados.

Gráfico 96. Jerarquización de la mejor alternativa de material.



ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en el gráfico, al haberse evaluado cada uno de los materiales con el fin de mejorar las propiedades mecánicas acero ASTM A36 para el ensayo de impacto trasero se obtuvo una alternativa de material, la cual cumple con estos requerimientos.

Este material en base a su aplicación en el campo de la automoción es apto para su utilización en bastidores, estructuras de protección, refuerzos y perfiles especiales con cambios de forma compleja, etc.

El material seleccionado pertenece a la familia de aceros TRIP lo cual indica el efecto de plasticidad inducida por transformación, esto se traduce en un aporte considerable a la combinación de ductilidad y resistencia del material, haciéndolo ideal para ser utilizado en el análisis comparativo del ensayo de impacto.

4.6. Resultado 2 del ensayo de impacto.

Luego de obtener una alternativa de material se volverá a realizar los análisis bajo las mismas condiciones de carga de impacto, cartas de control y propiedades de materiales como el bloque pendular, zona de seguridad, y anillos de péndulo, la diferencia radica en el cambio de las propiedades del material de la estructura de protección al vuelco.

Las nuevas propiedades del material seleccionado que se utilizara para el ensayo de impacto se muestran a continuación. En esta sección se seguirá la misma temática para la obtención de los resultados de las simulaciones del ensayo de impacto.

Tabla 33. Propiedades Mecánicas del acero TRIP YS450 para ensayos de Impacto.

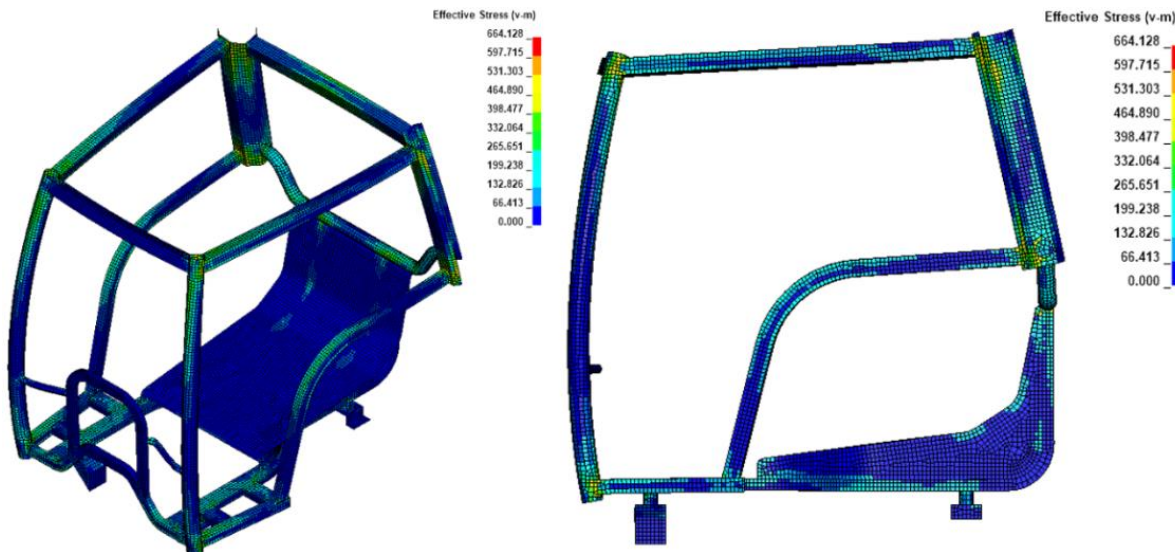
	Valor	Unidad
Densidad	$7,80 \times 10^{-9}$	$\left(\frac{\text{Ton}}{\text{mm}^3}\right)$
Módulo de elasticidad	191000	(MPa)
Coefficiente de Poisson	0,273	(%)
Límite elástico	450	(MPa)
Límite último	780	(MPa)

ELABORADO POR: AUTOR

4.6.1. Esfuerzos de Von Mises.

Bajo las mismas condiciones de ensayo y las nuevas propiedades de material para la estructura de protección se obtuvieron los siguientes esfuerzos máximos para el estado de carga de impacto en su punto máximo.

Gráfico 97. Estado de la estructura en el impacto máximo para el nuevo material.

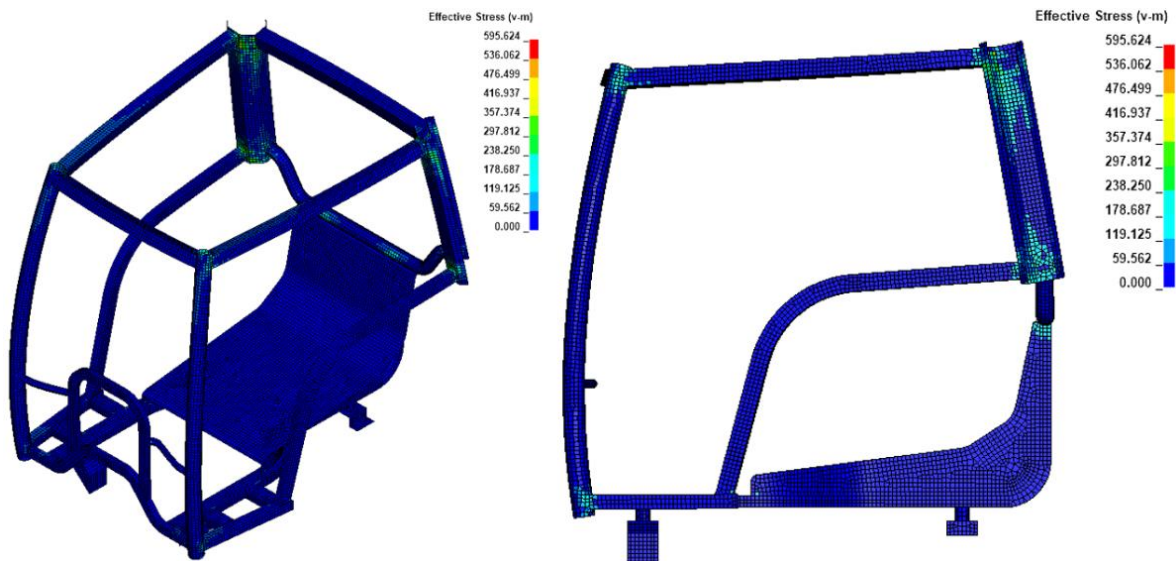


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Para la nueva disposición de material se obtuvo un valor de 664,128 MPa distribuidos entre las conexiones principales de la estructura de protección, cuando la carga de impacto del bloque pendular alcanza su máximo punto.

Gráfico 98. Estado de la estructura después del impacto para el nuevo material.

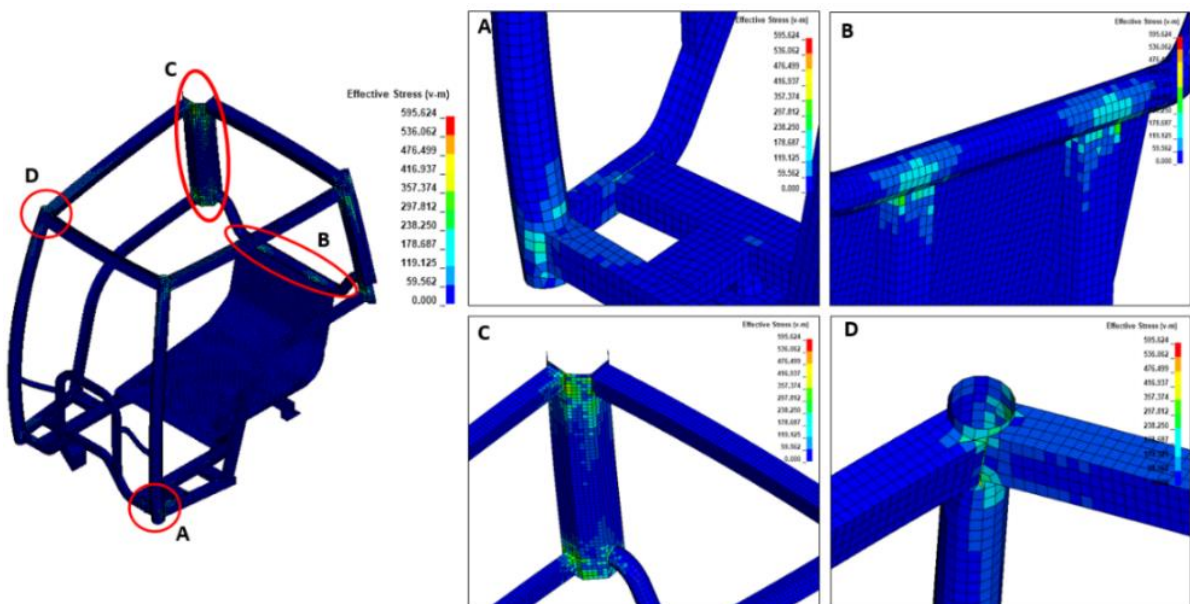


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Los esfuerzos residuales después del impacto del bloque pendular alcanzaron un valor de 595,624 MPa manteniéndose por encima del límite elástico del material, la distribución de estos esfuerzos se aprecia en las conexiones principales de la estructura de protección como se muestra a continuación.

Gráfico 99. Distribución de los esfuerzos residuales en las conexiones de la estructura.



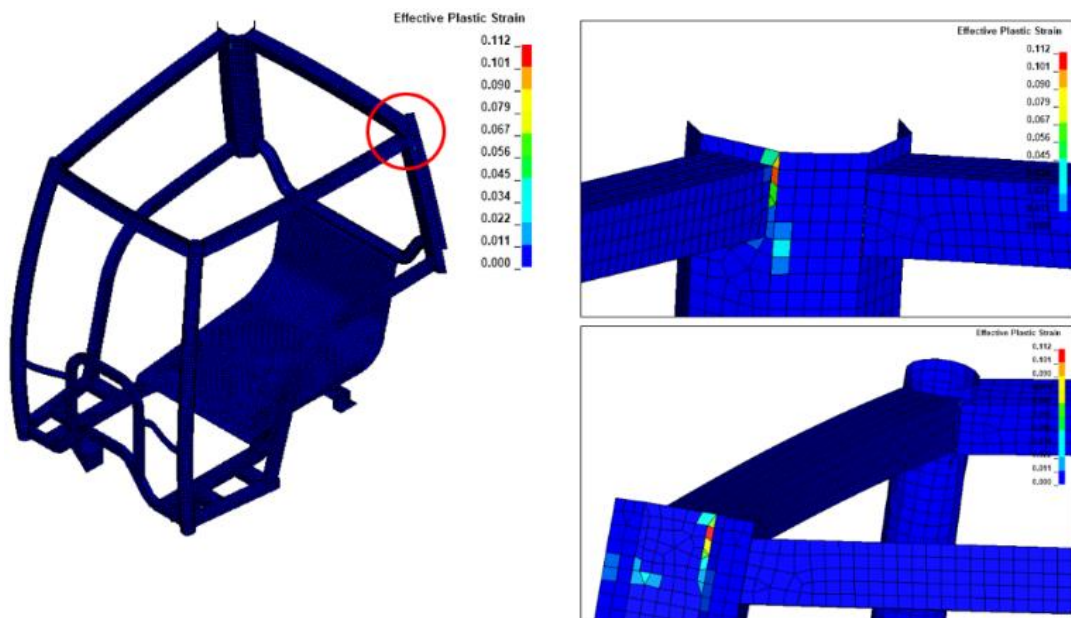
FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

4.6.2. Porcentaje de deformación plástica.

Para la nueva condición de ensayo con las nuevas propiedades de material se presenta un valor para la deformación plástica de 0,112 que equivale al 11,2% existente en ciertas zonas de la estructura de protección, este valor se encuentra por debajo del valor mínimo del porcentaje de elongación del material YS 450 utilizado para el nuevo estudio, a su vez es un claro indicador de que existen deformaciones plásticas en ciertas zonas las cuales son principalmente los concentradores de esfuerzo. Estas deformaciones aparecen en pequeñas proporciones en las esquinas de las conexiones principales de la estructura de protección como se muestra a continuación.

Gráfico 100. Distribución de deformación plástica para el nuevo material.

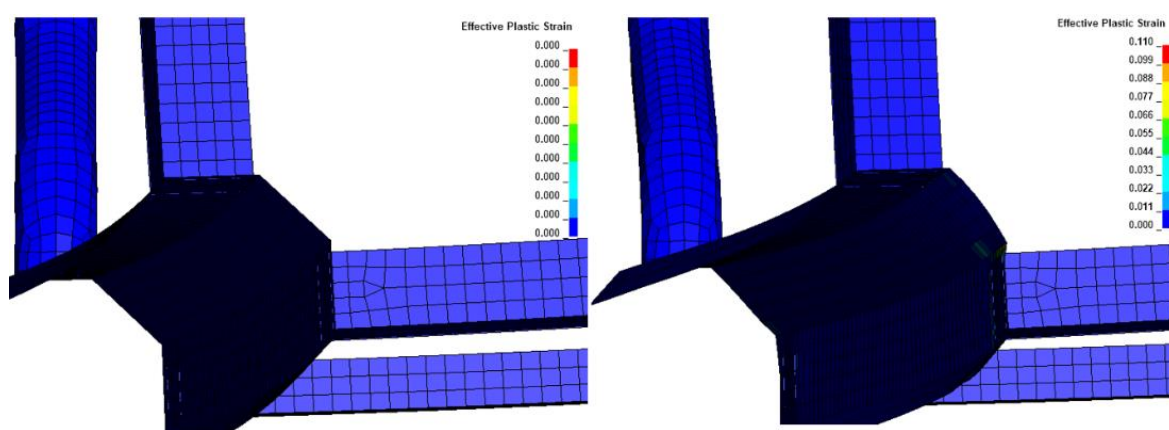


FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

En el siguiente gráfico se muestra el cambio que presenta el perfil al ser sometido al impacto provocando que existan deformaciones plásticas permanentes en los miembros estructurales.

Gráfico 101. Deformación del perfil especial de la estructura de protección.



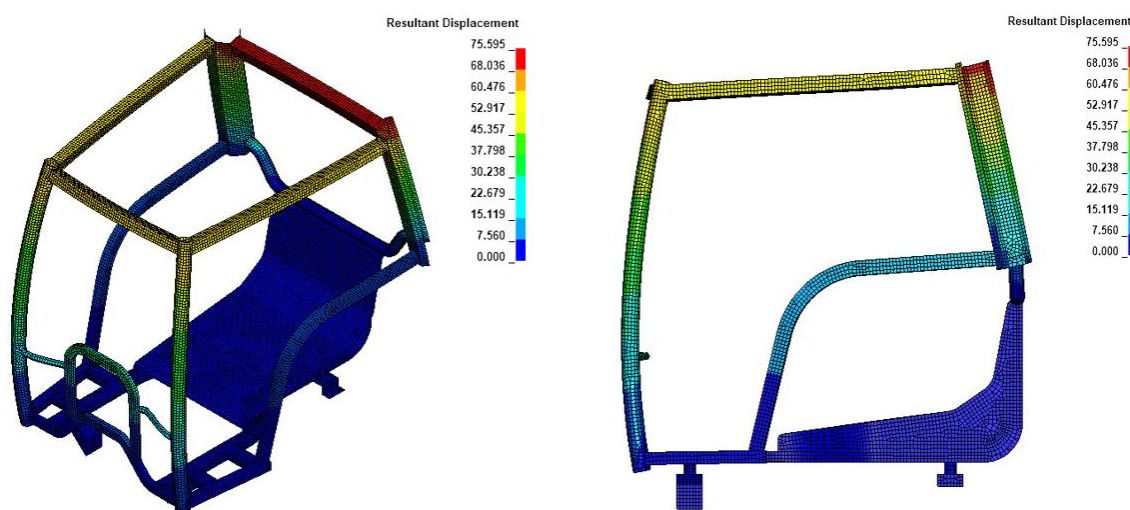
FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

4.6.3. Desplazamientos resultantes de la estructura.

Los desplazamientos resultantes de la estructura de protección, se presentan para este caso en los miembros estructurales superiores los cuales alcanzan un valor de 75,595 mm en su estado máximo de desplazamiento como se muestra a continuación.

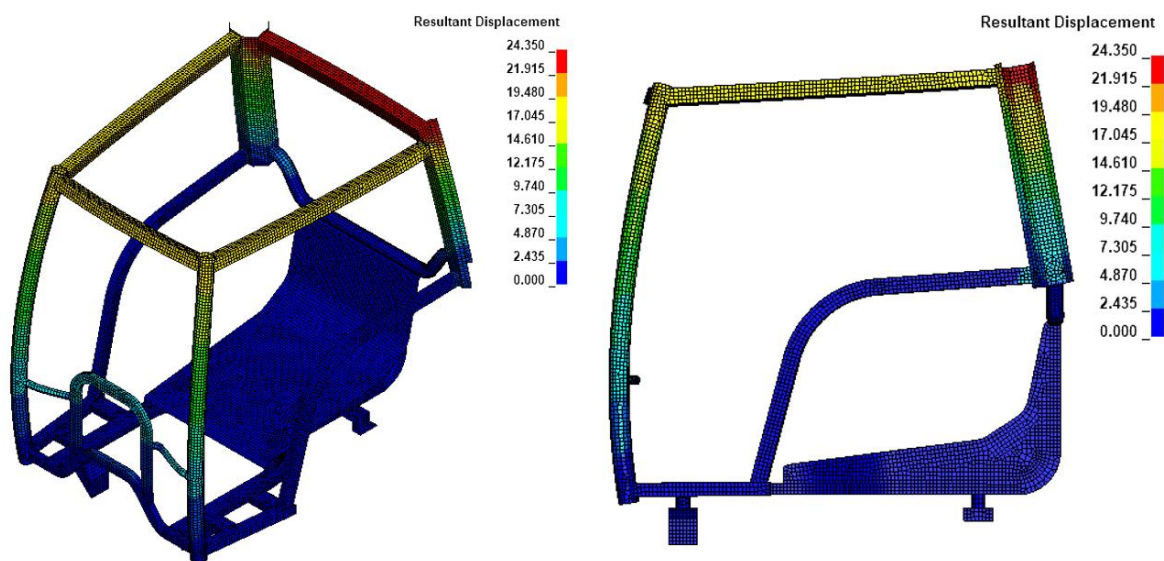
Gráfico 102. Desplazamientos máximos de la estructura para el nuevo material.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 103. Desplazamiento de la estructura después del impacto del bloque pendular.



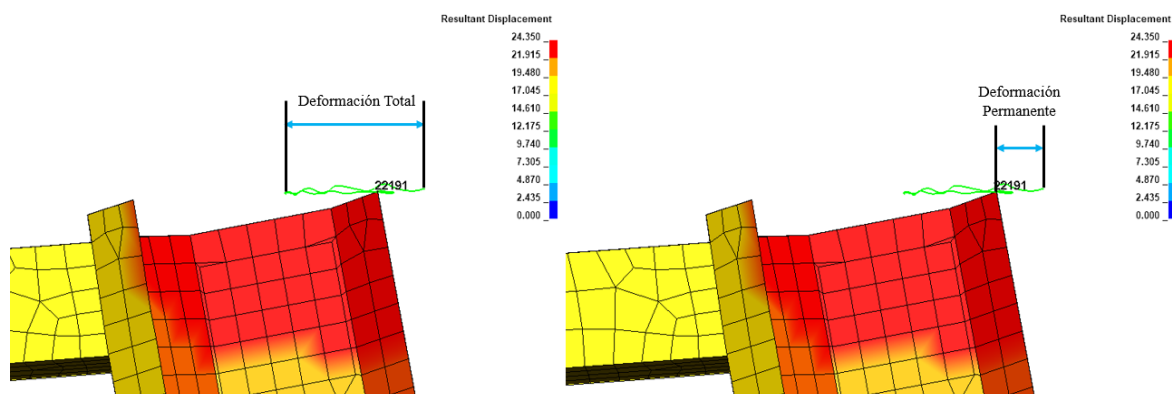
FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

En el segundo caso como se muestra en el gráfico, se presenta un valor de desplazamiento de 24,350 mm después del impacto del bloque pendular presentando deformaciones permanentes en la estructura.

Se realiza el cálculo de la deformación elástica de los elementos estructurales igual que en el primer caso de análisis, para determinar el cambio que existe entre un modelo de material y otro. Mediante la función de rastreo de nodos se determina el trayecto de referencia para facilitar el proceso de cálculo como se muestra a continuación.

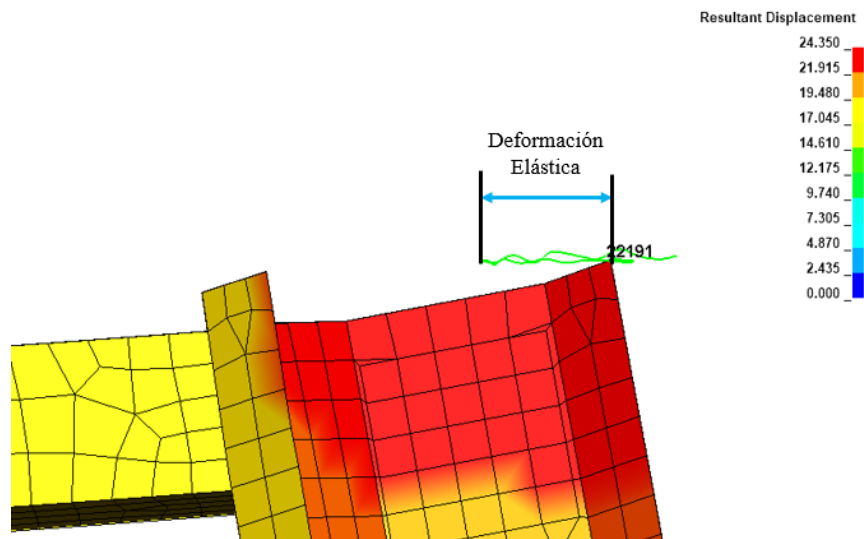
Gráfico 104. Ubicación de la deformación total y permanente.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Gráfico 105. Ubicación de la zona elástica para el nuevo caso de desplazamiento.



FUENTE: LS-PREPOST

ELABORADO POR: AUTOR

Como se determinó anteriormente, en base a la métrica de desplazamientos resultantes se obtuvo una deformación total de 75,595 mm y una deformación permanente de 24,350 mm, la deformación elástica se calcula a través de la siguiente ecuación.

$$D_T = D_p - D_e \quad (16)$$

$$D_e = D_T - D_p$$

$$D_e = 75,595 - 24,350$$

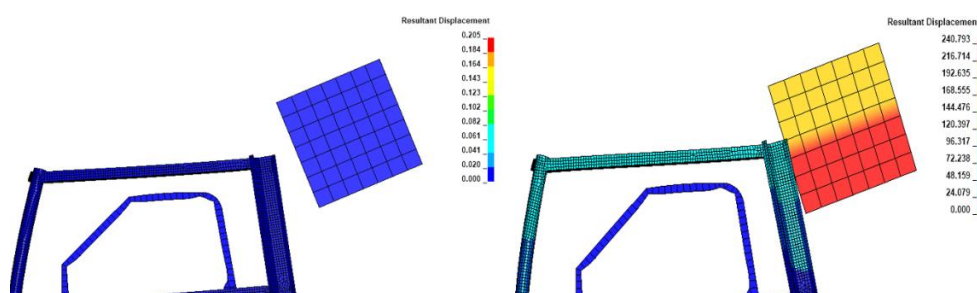
Al reemplazar los valores en la ecuación para determinar la deformación elástica se obtiene el siguiente valor.

$$D_e = 51,245 \text{ mm}$$

4.6.4. Verificación de la zona libre.

Finalmente se verifica el ingreso de los miembros estructurales a la zona de seguridad para este modelo de análisis. Se simplificó el modelo de la zona libre con la finalidad de ahorrar recursos computacionales, este modelo es independiente de la estructura de protección.

Gráfico 106. Verificación de ingreso de elementos en la zona libre.



FUENTE: LS-PREPOST

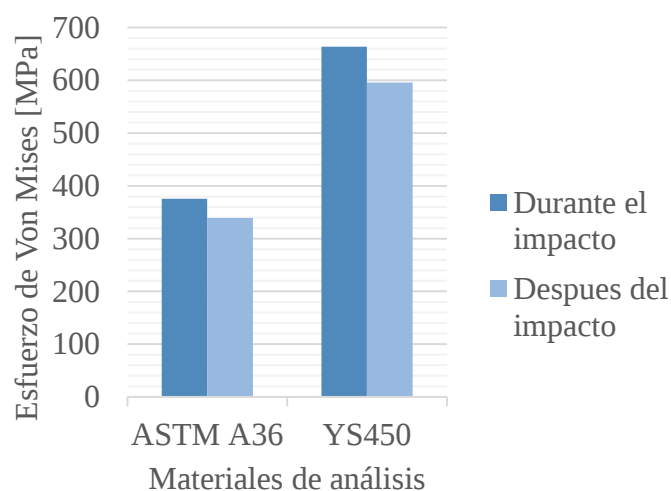
ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en el Gráfico, se verificó el comportamiento de la estructura con el fin de detectar el ingreso de elementos a la zona libre del conductor. Según las condiciones iniciales para el ensayo de impacto, y la altura de ubicación del bloque pendular en ambos casos de análisis no se evidencio penetración alguna por parte de los elementos estructurales a la zona libre del conductor.

4.7. Comparación de resultados.

Al haberse realizado el ensayo de impacto para los dos modelos de análisis, los cuales fueron simulados con propiedades de materiales distintos, pero con las mismas condiciones de carga, restricciones, propiedades de análisis y propiedades de materiales para el ensayo, los resultados que se obtuvieron son los siguientes.

Gráfico 107. Comparación de los Esfuerzos máximos alcanzados.



ELABORADO POR: AUTOR

Como se muestra en el Gráfico anterior, en ambos casos de análisis, estos presentan valores de esfuerzo los cuales superan el límite elástico del material respectivamente. Esta respuesta no indica que el material falle, por lo contrario, provoca que el material se encuentre según la curva de los materiales en la región plástica, presentando deformación de esta misma clase en ciertas zonas las cuales se conocen como concentradores de esfuerzos en la estructura de protección como se muestra en los Gráficos de las secciones anteriores. Para ambos casos, las tensiones alcanzadas se encuentran por debajo del esfuerzo último que el material soporta antes de fallar.

En los resultados de esfuerzos se observa que existe una diferencia notable entre sus valores, se debe considerar que la geometría de la estructura no ha sido modificada y que las densidades de los materiales utilizados son aproximadas.

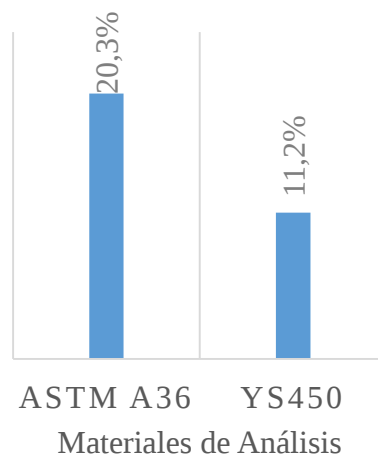
Un detonante de esta particularidad es el módulo de elasticidad del acero YS450, siendo su valor menor en comparación con el valor del módulo de elasticidad del acero ASTM A36, las características que estos materiales presentan al tener un módulo de elasticidad bajo es la de ser más elásticos al ser sometidos a una carga, esto se ve reflejado más adelante en las deformaciones de los miembros estructurales, por esta razón, al mostrar este comportamiento se puede apreciar el incremento en los valores de los esfuerzos para el acero YS450.

Así mismo, al tratarse de un análisis dinámico, en donde las cargas aplicadas dependen del tiempo y otros aspectos como la amortiguación, fuerzas de inercia, velocidades y aceleraciones del sistema, se hace evidente el incremento de los esfuerzos en la estructura de protección con el material YS450, debido a la interpretación del programa se solución para este tipo de casos de estudio, a diferencia de un análisis estático en donde las cargas se aplican de forma constante hasta alcanzar un cierto punto del límite elástico del material, ignorando la inercia y los efectos de amortiguación encontrados al aplicar cargas en pequeños intervalos de tiempo.

Se debe considerar que el objetivo es analizar el comportamiento que la estructura tendría al ser impactada por el bloque pendular, así mismo, se busca obtener un material que pueda absorber mayor energía a la hora del impacto, aunque individualmente los resultados sean distintos para los esfuerzos, las deformaciones cumplen con esta lógica.

Para corroborar que los esfuerzos lleguen a una convergencia, se debe realizar la comparación entre los mismos materiales, pero con un modelo de elementos finitos de una sola parte enfocado en un análisis estático, esto evitaría demoras en el preprocesamiento y tiempo de solución, ayudando a obtener una respuesta específica sobre el comportamiento de los esfuerzos, esta opción puede ser ejecutada en futuras investigaciones, sin embargo, lo antes mencionado se aleja del objeto principal de estudio de este documento.

Gráfico 108. Comparación de la deformación plástica.



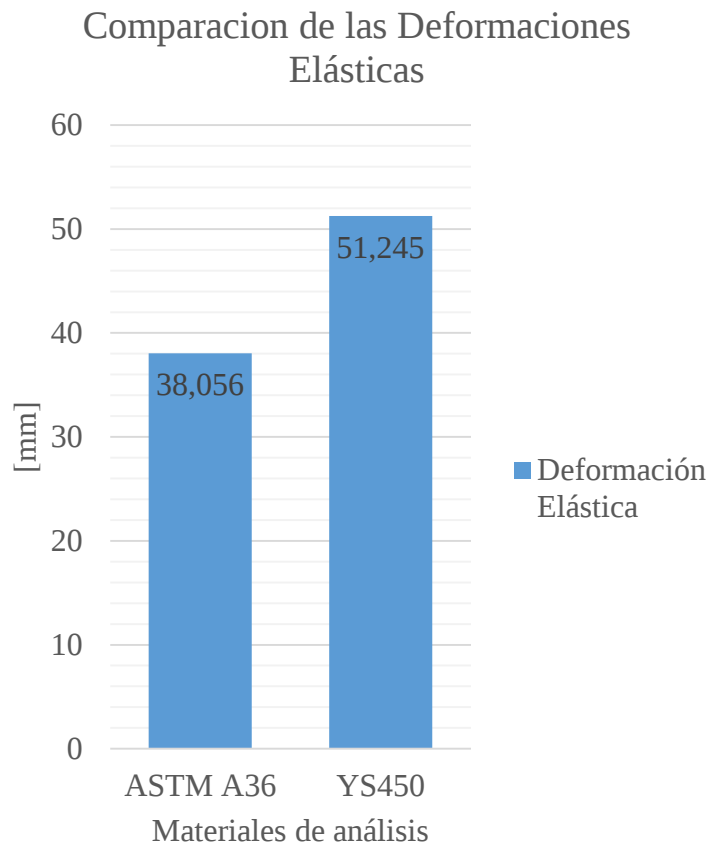
ELABORADO POR: AUTOR

Cabe resaltar que la mayoría de la distribución de esfuerzos se encuentra en las zonas críticas de la geometría de la estructura, evidentemente es allí donde se encuentran los concentradores de esfuerzos, alcanzar grandes valores de tensiones en estos lugares, indica que existen pequeñas zonas en las cuales los esfuerzos sobrepasaron el valor del límite elástico del material presentando deformaciones plásticas permanentes en zonas específicas, mientras que el resto de la geometría de la estructura no presenta afectación por la carga de impacto recibida.

El análisis indica que para el material YS450 el nivel de deformación plástica es menor respecto al modelo con el material ASTM A36. Debido a que el acero YS450 presenta mejores características de absorción de energía, permite que el material tenga mayor deformación elástica cuando es impactado por el bloque pendular reduciendo la cantidad de zonas con deformaciones plásticas a diferencia del acero ASTM A36, el cual al no poseer las mismas características de absorción de energía, este presenta mayores zonas con deformación plástica.

Los valores de deformación plástica son medidas en ciertas zonas las cuales se encuentran presentes concentradores de esfuerzos, mientras que para el resto de la estructura no existirá alteración en su comportamiento mecánico.

Gráfico 109. Comparación de las deformaciones elásticas.



ELABORADO POR: AUTOR

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

- Se simuló el ensayo impacto trasero bajo las condiciones iniciales prescritas obteniendo un esfuerzo máximo de 375.4 MPa sobre el límite elástico de 250 MPa para el ASTM A36 material inicial de ensayo, así mismo, se presentó una deformación plástica del 20.3% respecto a su porcentaje de elongación y una deformación elástica de 38,056 mm para los miembros estructurales superiores, no se presenta alteración en el resto de la estructura.
- Mediante el programa CES Edupack se obtuvo 4 alternativas de aceros los cuales presentan un aumento en sus propiedades mecánicas, además de sus usos típicos en el campo de aplicación en comparación al ASTM A36 material inicial para la discretización de las familias de aceros. Mediante el proceso de análisis jerárquico y en base a las propiedades mecánicas se obtuvo una jerarquía de los materiales seleccionados presentando al acero TRIP YS450 como material apropiado para la simulación gracias a sus características de absorción de energía, propiedades mecánicas y aplicación.
- Se simuló el ensayo de impacto bajo las mismas condiciones de preparación iniciales, agregando a este análisis las nuevas propiedades del acero YS450, el valor de esfuerzo máximo alcanzado fue de 664,128 MPa el cual está por encima del límite elástico del YS450 igual a 450 MPa, se presentó un porcentaje del 11,2 % de deformación plástica respecto a su porcentaje de elongación, y una deformación elástica de 51,245 mm. En ambos casos de análisis, los esfuerzos superaron el valor del límite elástico, provocando que exista deformaciones plásticas, mostrando un incremento en los esfuerzos para la simulación del material YS450, debido al análisis dinámico de impacto, el cual tiene una interpretación diferente en comparación con los análisis estáticos convencionales.
- Considerando que no se logra cumplir con la condición de la altura a la que bloque pendular debe ser soltado, se pudo obtener resultados que muestran cómo se comportaría la estructura de protección al ser sometida a este tipo ensayo. Así mismo, al probar dos materiales distintos se observa una mejoría de las propiedades mecánicas del segundo material utilizado, el cual lo hace más apropiado para su aplicación gracias a sus características de absorción de energía de impacto.

5.2. Recomendaciones.

- Para la obtención del modelo virtual que será utilizado para los análisis respecto a los ensayos planteados, se debe tener acceso a datos relevantes, los cuales proporcionen la información necesaria para la aproximación de estos modelos, y así tener una visión general de los resultados obtenidos.
- Se deben establecer límites antes de realizar los análisis de grandes tensiones y deformaciones, siendo estos procesos manuales complejos los cuales abarcan recursos computacionales y tiempos de cálculo elevados, se debe evitar cualquier proceso que impida obtener respuestas de resultados en tiempos de preprocesamiento apropiados para evitar el fallo o consumo de recursos propios.
- Es necesario revisar las condiciones de aceptación para la verificación de los resultados cuando se realizan análisis computacionales de modelos físicos expuestos a condiciones de carga extrema, esto permite verificar el alcance del análisis realizado debido a las limitaciones que se presentan en la preparación del modelo virtual, así como su aproximación con el modelo real.
- Para garantizar los resultados obtenidos es aconsejable realizar comparaciones con modelos físicos sometidos bajo las mismas condiciones de ensayo, esto permitirá obtener rangos de valores que podrían ser utilizados para estudios de validación de los modelos virtuales. Se debe tener una preparación general sobre las metodologías utilizadas para el procesamiento de la información del modelo virtual y asignación de condiciones de ensayo con el fin de obtener resultados aproximados a la realidad.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. M. H. y. K. B. Bischoff, Análisis y Simulación de procesos, Reverte.
- [2] D. V. Saldaña, «¿QUÉ ES EL FUNCIONALISMO?», Universidad Nacional Mayor de San Marcos Universidad Antonio Ruiz de Montoya, Lima, 2017.
- [3] O. S. CODE, OFFICIAL TESTING OF PROTECTIVE STRUCTURES ON AGRICULTURAL AND FORESTRY TRACTORS, 2020.
- [4] R. D. S. V. D. M. Gonzalo Guillermo Moreno, ANÁLISIS DE RIESGO DE VOLCAMIENTO DE VEHÍCULOS PESADOS, Florianópolis: Department of Mechanical Engineering - Federal University of Santa Catarina, 2018.
- [5] L. D. S. WILLIAM F. RILEY, DINÁMICA, Barcelona: REVERTÉ, S.A., 2005.
- [6] M. A. G. Díaz, GUÍA PRÁCTICA PARA EL CURSO: RESISTENCIA DE MATERIALES 1, Guatemala : Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004.
- [7] E. B. D. Miguel Cervera Ruiz, Mecánica de estructuras Libro 1 Resistencia de materiales, Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña , 2001.
- [8] R. W. Fitzgerald, MECÁNICA DE MATERIALES, D.F.: Alfaomega, 1996.
- [9] B. J. G. James M. Gere, Mecánica de materiales, Séptima Edición ed., D.F.: Cengage Learning Editores, S.A., 2009.
- [10] E. L. MANUEL VÁZQUEZ, EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO AL ANÁLISIS ESTRUCTURAL, Madrid: Noela.
- [11] H. VILLASENOR-OCHOA, «ENGINEERING FUNDAMENTALS REFRESH: STRENGTH VS. STIFFNESS VS. HARDNESS», Fictiv, 15 02 2017. [En línea]. Available: WWW.FICTIV.COM/ARTICLES/ENGINEERING-FUNDAMENTALS-REFRESH-STRENGTH-VS-STIFFNESS-VS-HARDNESS.
- [12] D. J. D. B. Frederick A. Leckie, Strength and Stiffness of Engineering Systems, Springer Science+Business Media, 2009.
- [13] A. R. Serrano, Simulación del comportamiento no-lineal de materiales compuestos, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [14] R. C. Hibbeler, MECÁNICA DE MATERIALES, OCTAVA EDICIÓN ed., México: PEARSON EDUCACIÓN, 2011, p. 880.

- [15] E. R. J. J. T. D. D. F. M. Ferdinand P. Beer, Mechanics of Materials, SEVENTH ed., New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [16] R. D. Delgado, «Empleo de Mallado Adaptativo en Simulaciones de Procesos de Conformado de Chapa por el Método de los Elementos Finitos,» Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2010.
- [17] J. B. Leva, Análisis numérico de impacto no lineal en sistemas multicomponentes, Málaga: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 2014.
- [18] D. S. M. M. E. P. R. J. W. Robert D. Cook, CONCEPTS AND APPLICATIONS OF FINITE ELEMENT ANALYSIS, John Wiley & Sons, Inc, 2001, p. 736 .
- [19] G. V. M. Weber, SolidWorks Simulation 2020 Black Book, Kristen, Ed., 2019.
- [20] R. C. Gordo, «Tractor agrícola: estabilidad frente al vuelco,» Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 2017.
- [21] L. G. Y. Rumipamba, «EVALUACIÓN DE LA FALLA DEL EJE MOTRIZ YZ91406 DE LA TRANSMISIÓN DEL TRACTOR AGRÍCOLA JOHN DEERE MODELO 6603,» Universidad Internacional del Ecuador, Guayaquil, 2019.
- [22] N. T. E. N. I. 2656, CLASIFICACIÓN VEHICULAR, Quito: Servicio Ecuatoriano de Normalización, INEN, 2016, p. 31.
- [23] S. f. A. Engineering, SAE J1194: Roll-Over Protective Structures for Wheeled Agricultural Tractors, WASHINGTON, D.C., 1983.
- [24] C. M. A. O. D. Hailoua Blanco, Virtual ROPS and FOPS Testing on Agricultural Tractors According to OECD Standard Code 4 and 10, 14th International LS-DYNA Users Conference, 2016.
- [25] N. T. S. S. Lama Al-Bassit, «Falling-object protective structure for tractors in service: Prototype design and validation,» Biosystems Engineering, vol. 185, pp. 76-87, 2019.
- [26] J. T. C. Lizarza, Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural, San Sebastián: Tecnun.
- [27] G. L. Narasaiah, Finite Element Analysis, BS Publications, 2008.
- [28] Y. L. Xiaolin Chen, Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench, CRC press, 2015.

- [29] D. L. Logan, A FIRST COURSE IN THE FINITE ELEMENT METHOD, Fifth Edition ed., Cengage Learning, 2012.
- [30] D. Systèmes, «Análisis estático lineal frente a análisis dinámico lineal,» Solidworks Support.
- [31] S. S. Rao, The Finite Element Method in Engineering, FOURTH EDITION ed., ELSEVIER, 2005.
- [32] F. O. P. Francisco J. Fuenmayor, DEFINICIÓN DE MALLA ÓPTIMA EN REFINAMIENTO H-ADAPTATIVO PARA MÚLTIPLES CASOS DE CARGA, 2002.
- [33] P. M. Kurowski, Finite Element Analysis for Design Engineers, Second ed., SAE internacional , 2017.
- [34] D. Systèmes, «Solidworks Web Help,» Ayuda de SOLIDWORKS, 2021.
- [35] J. O. Hallquist, LS-DYNA® THEORY MANUAL, Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [36] M. G. D. H. GONZÁLEZ HÉCTOR ÁLVARO, «LA IMPORTANCIA DEL MÉTODO EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES,» Scientia Et Technica, vol. X, nº 24, pp. 175-180, Mayo 2004.
- [37] H. S. D. C. Michael Ashby, Materials Engineering, Science, Processing and Design, Oxford: Elsevier Ltd., 2007.
- [38] M. L. R. T. Tatjana Atanasova-Pachemska, «ANALYTICAL HIERARCHICAL PROCESS (AHP) METHOD APPLICATION IN THE PROCESS OF SELECTION AND EVALUATION,» INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, vol. II, pp. 373-380, 2014.
- [39] C. S. D. P. D. G. Adel Mendoza, «Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment,» Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 27, nº 3, pp. 348-360, 2019.
- [40] S. A. N. J. J. D. J. d. l. R. Jorge Luís García, «APLICACIÓN DEL PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA EN LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA AGRÍCOLA,» Agronomía Costarricense, vol. 30, nº 1, pp. 107-114, 2006.

- [41] R. T. A. A. S. BRANKO E GORENC, STEEL DESIGNERS' HANDBOOK, Seventh ed., Sydney: UNSW Press, 2005.
- [42] R. L. Brockenbrough, «PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS AND EFFECTS OF STEELMAKING AND FABRICATION,» STRUCTURAL STEEL DESIGNER'S HANDBOOK.
- [43] U. Europea, REGLAMENTO DELEGADO (UE) N o 1322/2014, Diario Oficial de la Unión Europea, 2014.
- [44] V. Inc., «Service Manual Tractors,» [En línea]. Available: www.valtra.com.
- [45] I. D. Group, Catálogo IPAC Productos y Servicios, Guayaquil, 2019.
- [46] N. I. 2415, «TUBOS DE ACERO AL CARBONO SOLDADOS PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES Y USOS GENERALES,» Servicio Ecuatoriano de Normalización, INEN, Quito, 2016.
- [47] N. I. 1623, «PERFILES ABIERTOS DE ACERO CONFORMADOS EN FRÍO NEGROS O GALVANIZADOS PARA USO ESTRUCTURAL. REQUISITOS E INSPECCIÓN,» Servicio Ecuatoriano de Normalización, INEN, Quito , 2015.
- [48] N. I. 115, «TOLERANCIA PARA PLANCHAS Y PLANCHONES DE ACERO AL CARBONO LAMINADAS EN CALIENTE Y/O EN FRÍO.,» Servicio Ecuatoriano de Normalización, INEN, Quito, 2014.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexos 1. Tipos de acero según la ASTM del Manual Diseñador de Acero Estructural.

TABLE 1.1 Specified Minimum Properties for Structural Steel Shapes and Plates*						
ASTM designation	Plate-thickness range, in	ASTM group for structural shapes†	Yield stress, ksi‡	Tensile strength, ksi‡	Elongation, %	
					In 2 in§	In 8 in
A36	8 maximum	1–5	36	58–80	23–21	20
	over 8	1–5	32	58–80	23	20
A573						
Grade 58	1½ maximum	¶	32	58–71	24	21
Grade 65	1½ maximum	¶	35	65–77	23	20
Grade 70	1½ maximum	¶	42	70–90	21	18
High-strength low-alloy steels						
A242	¾ maximum	1 and 2	50	70	21	18
	Over ¾ to 1½ max	3	46	67	21	18
	Over 1½ to 4 max	4 and 5	42	63	21	18
A588	4 maximum	1–5	50	70	21	18
	Over 4 to 5 max	1–5	46	67	21	—
	Over 5 to 8 max	1–5	42	63	21	—
A572						
Grade 42	6 maximum	1–5	42	60	24	20
Grade 50	4 maximum	1–5	50	65	21	18
Grade 60	1¼ maximum	1–3	60	75	18	16
Grade 65	1¼ maximum	1–3	65	80	17	15
A992	¶	1–5	50–65	65	21	18
Heat-treated carbon and HSLA steels						
A633						
Grade A	4 maximum	¶	42	63–83	23	18
Grade C, D	2½ maximum	¶	50	70–90	23	18
	Over 2½ to 4 max	¶	46	65–85	23	18
Grade E	4 maximum	¶	60	80–100	23	18
	Over 4 to 6 max	¶	55	75–95	23	18
A678						
Grade A	1½ maximum	¶	50	70–90	22	—
Grade B	2½ maximum	¶	60	80–100	22	—
Grade C	¾ maximum	¶	75	95–115	19	—
	Over ¾ to 1½ max	¶	70	90–110	19	—
	Over 1½ to 2 max	¶	65	85–105	19	—
Grade D	3 maximum	¶	75	90–110	18	—
A852	4 maximum	¶	70	90–110	19	—
A913	¶	1–5	50	65	21	18
	¶	1–5	60	75	18	16
	¶	1–5	65	80	17	15
	¶	1–5	70	90	16	14

FUENTE: STRUCTURAL STEEL DESIGNER'S HANDBOOK

AUTOR: BROCKENBROUGH, ROGER L.

Anexos 2. Propiedades mecánicas de los tipos de aceros.

TABLE 1.1 Specified Minimum Properties for Structural Steel Shapes and Plates* (Continued)						
ASTM designation	Plate-thickness range, in	ASTM group for structural shapes†	Yield stress, ksi‡	Tensile strength, ksi‡	Elongation, %	
					In 2 in§	In 8 in
Heat-treated constructional alloy steels						
A514	2½ maximum	¶	100	110–130	18	—
	Over 2½ to 6 max	¶	90	100–130	16	—

FUENTE: STRUCTURAL STEEL DESIGNER'S HANDBOOK

AUTOR: BROCKENBROUGH, ROGER L

Anexos 3. Dimensiones para la zona libre.

Cuadro 3.3 Dimensiones de la zona libre		
Dimensiones	mm	Observaciones
A ₁ A ₀	100	mínima
B ₁ B ₀	100	mínima
F ₁ F ₀	250	mínima
F ₂ F ₀	250	mínima
G ₁ G ₀	250	mínima
G ₂ G ₀	250	mínima
H ₁ H ₀	250	mínima
H ₂ H ₀	250	mínima
J ₁ J ₀	250	mínima
J ₂ J ₀	250	mínima
E ₁ E ₀	250	mínima
E ₂ E ₀	250	mínima
D ₀ E ₀	300	mínima
J ₀ E ₀	300	mínima
A ₁ A ₂	500	mínima
B ₁ B ₂	500	mínima
C ₁ C ₂	500	mínima
D ₁ D ₂	500	mínima
I ₁ I ₂	500	mínima
F ₀ G ₀	—	según el tractor
I ₀ G ₀	—	
C ₀ D ₀	—	
E ₀ F ₀	—	

FUENTE: REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 1322/2014

AUTOR: DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, [2014]

Anexos 4. Datos referenciales para los modelos T120-T190 Valtra.

Dimensions (mm)	T 120	T 130	T 140	T 160	T 170	T 180, T190
1. With front tyres/tires	16.9R28	16.9R28	16.9R28	460/85R30	460/85R30	460/85R30
2. With rear tyres/tires	20.8R38	20.8R38	20.8R38	20.8R42	20.8R42	20.8R42
4. Length	5148	5148	5148	5148	5148	5148
7a. Width	2338	2338	2338	2338	2338	2338
5a. Height to the roof	2960	2960	2960	3030	3030	3030
5. Height to the exhaust pipe	2900	2900	2900	2965	2965	2910
3. Wheel base	2748	2748	2748	2748	2748	2748
8. Ground clearance (front axle)	555/515 ¹⁾	555/515 ¹⁾	555/515 ¹⁾	600/560 ¹⁾	600/560 ¹⁾	600/560 ¹⁾
9. Ground clearance (rear axle)	535	535	535	600	600	600

¹⁾ With front axle suspension.
Dimension from the rear axle mid point to the cab roof part is 2093 mm.

Weights kg	T 120	T 130	T 140
With tyres/tires	16.9R28, 20.8R38	16.9R28, 20.8R38	16.9R28, 20.8R38
Total weight (with full fuel tank and without ballast weights)	5530	5530	5650
Front axle weight (%)	2480 (45)	2480 (45)	2600 (46)
Rear axle weight (%)	3050 (55)	3050 (55)	3050 (54)

Weights kg	T 160	T 170	T 180, T190
With tyres/tires	540/65R30, 650/65R42	540/65R30, 650/65R42	650/65R42, 540/65R30
Total weight (with full fuel tank and without ballast weights)	5950	5950	5990
Front axle weight (%)	2700 (45)	2700 (45)	2740 (46)
Rear axle weight (%)	3250 (55)	3250 (55)	3250 (54)

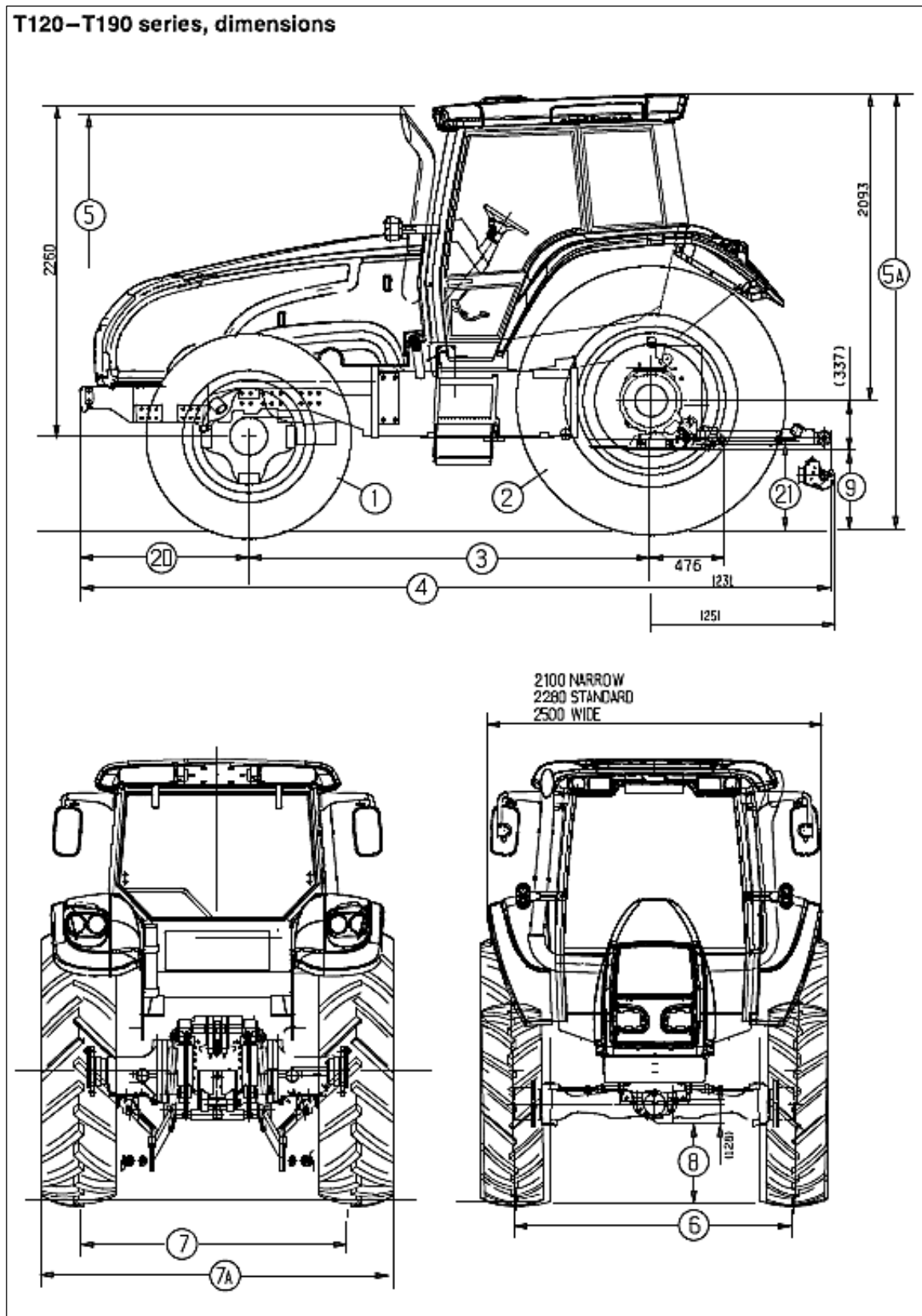
Track widths:

Front	6. Track width
14.9-28/6, 14.9R28, 380/70R28, 380/85R28, 420/70R28, 420/85R28, 440/65R28, 16.9R28, 16.9-28/8, 480/65R28, 480/65R28E1, 480/70R28, 540/65R28, 540/65R28E1	1540, 1635, 1740, <u>1835</u> , 1940, 2035
+ more: see operator's manual	
Rear	7. Track width
8.4R38, 18.4-38/8, 18.4R42, 460/85R38, 480/70R38, 20.8R38, 20.8-38/10, 520/70R38, 520/85R38, 520/85R42 540/65R38, 580/70R38, 480/80R42	1610, 1715, <u>1810</u> , 1910, 2010, 2115
+ more: see operator's manual	

FUENTE: SERVICE MANUAL TRACTORS

AUTOR: INC., VALTRA

Anexos 5. Dimensiones para los modelos T120-T190 Valtra.

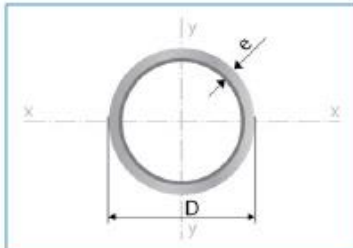


FUENTE: SERVICE MANUAL TRACTORS

AUTOR: INC., VALTRA

Anexos 6. Tubería estructural redonda.

Tubería Estructural Redonda



Largo Normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro o Galvanizado
Calidad de Acero:
JIS G 3132, ASTM A 36 y ASTM
A572 Gr 50
Norma de Fabricación:
ASTM A 500/ NTE INEN 2415
Espesores:
Desde 1,40 a 6,00 mm
Observaciones:
Otras dimensiones y largos,
previa consulta

Aplicaciones

- Automotriz y de autopartes: carrocería, guardachoques, tubos de escape, remolques y rodados.
- Agroganadera: maquinaria e implementos agrícolas, avícolas y ganaderos.
- Señalización y vialidad: alumbrado, soportes para señalética.
- Aparatos de gimnasia y fitness.
- Construcción: rejas, portones, columnas, andamios.
- Estructuras: portantes, galpones, invernaderos y naves industriales.

Beneficios

- Duradero: Al construir con acero, asegura que su producto tenga una vida útil, superior a los materiales de construcción convencionales.
- Económico: Se optimiza el uso del material produciéndose ahorro en obras, por facilidad y rapidez de uso y armado ahorra en tiempo y personal.
- Ecológico: Con el uso de acero, se minimiza la utilización de madera y su desecho, por lo que contribuye al medio ambiente.

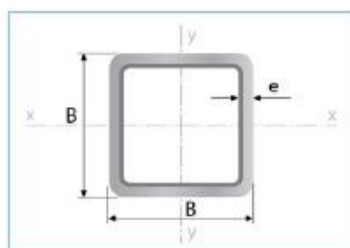
Designaciones		Área	Peso	Propiedades Estáticas		
Diámetro Exterior	Espesor			Flexión		
				Momento de inercia	Modulo de resistencia	Radio de giro
D	e	A	P	I	W	i
pulg.	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
3/4	19,10	1,40	0,78	0,30	0,32	0,63
		1,50	0,83	0,32	0,34	0,62
		1,80	0,98	0,37	0,39	0,61
		2,00	1,07	0,39	0,41	0,61
7/8	22,20	1,40	0,92	0,72	0,50	0,74
		1,50	0,98	0,77	0,53	0,73
		1,80	1,16	0,91	0,61	0,72
		2,00	1,27	1,00	0,66	0,72
1	25,40	1,40	1,06	0,83	0,76	0,85
		1,50	1,13	0,88	0,81	0,85
		1,80	1,33	1,05	0,93	0,84
		2,00	1,47	1,15	1,01	0,83
1 1/4	31,80	1,40	1,33	1,05	1,54	1,07
		1,50	1,43	1,12	1,63	1,07
		1,80	1,69	1,33	1,91	1,06
		2,00	1,87	1,47	2,08	1,05
1 1/2	38,10	1,40	1,61	1,27	2,72	1,30
		1,50	1,72	1,35	2,89	1,30
		1,80	2,05	1,61	3,39	1,28
		2,00	2,27	1,78	3,71	1,28
1 3/4	44,50	1,40	1,89	1,49	4,39	1,52
		1,50	2,02	1,59	4,67	1,52
		1,80	2,41	1,89	5,49	1,51
		2,00	2,67	2,09	6,02	1,50
1 7/8	47,60	1,40	2,03	1,60	5,44	1,64
		1,50	2,17	1,71	5,79	1,63
		1,80	2,59	2,03	6,81	1,62
		2,00	2,87	2,25	7,47	1,61
2	50,80	1,40	2,17	1,71	6,63	1,75
		1,50	2,32	1,82	7,06	1,74
		1,80	2,77	2,18	8,33	1,73
		2,00	3,07	2,41	9,14	1,73
2 3/8	60,30	3,00	4,51	3,54	12,92	1,69
		4,00	5,88	4,62	16,22	1,66
		1,50	2,77	2,18	12,00	2,08
		1,80	3,31	2,60	14,18	2,07
2 1/2	63,50	2,00	3,66	2,88	15,60	2,06
		3,00	5,40	4,24	22,25	2,03
		4,00	7,08	5,56	28,21	2,00
		1,50	2,92	2,29	14,05	2,19
3	76,20	1,80	3,49	2,74	16,62	2,18
		2,00	3,86	3,03	18,29	2,18
		3,00	5,70	4,48	26,15	2,14
		4,00	7,48	5,87	33,24	2,11
4	101,60	1,50	3,52	2,76	24,56	2,64
		1,80	4,21	3,30	29,13	2,63
		2,00	4,66	3,66	32,11	2,62
		3,00	6,90	5,42	46,29	2,59
5	127,00	4,00	9,07	7,12	59,30	2,56
		5,00	11,18	8,78	71,22	2,52
		2,00	6,26	4,91	77,63	3,52
		3,00	9,29	7,29	113,04	3,49
6	152,40	4,00	12,26	9,63	146,28	3,45
		5,00	15,17	11,91	177,47	3,42
		6,00	18,02	14,15	206,68	3,39
		2,00	7,85	6,17	153,44	4,42
6 5/8	168,30	3,00	11,69	9,17	224,75	4,39
		4,00	15,46	12,13	292,61	4,35
		5,00	19,16	15,04	357,14	4,32
		6,00	22,81	17,90	418,44	4,28
6	152,40	3,00	14,08	11,05	393,01	5,28
		4,00	18,65	14,64	513,73	5,25
		5,00	23,15	18,18	629,54	5,21
		6,00	27,60	21,66	740,57	5,18
6 5/8	168,30	3,00	15,58	12,23	532,28	5,85
		4,00	20,65	16,21	697,09	5,81
		5,00	25,65	20,14	855,85	5,78
		6,00	30,59	24,02	1008,69	5,74

FUENTE: CATÁLOGO IPAC PRODUCTOS Y SERVICIOS

AUTOR: GROUP, IPAC DUFERCO, [2019]

Anexos 7. Tubería estructural cuadrada.

Tubería Estructural Cuadrada



Largo Normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro o Galvanizado
Calidad de Acero:
JIS G 3132, ASTM A 36 y ASTM
A572 Gr 50
Norma de Fabricación:
ASTM A 500/ NTE INEN 2415
Espesores:
Desde 1,40 a 6,00 mm
Observaciones:
Otras dimensiones y largos,
previa consulta

Aplicaciones

- Automotriz y de autopartes:
carrocería y remolques.
- Agroganadera: maquinaria e
implementos industriales,
agrícolas, avícolas y ganaderos.
- Señalización y vialidad: soportes.
- Aparatos de gimnasia y fitness.
- Construcción: columnas.
- Estructuras: galpones y naves
industriales, edificios, soporte de
techos.

INEN



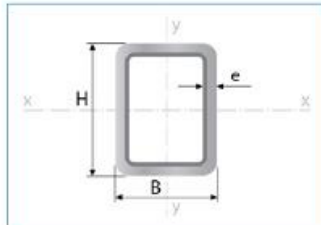
Designaciones	Área	Peso	Propiedades Estáticas		
			Eje x-x = y-y		
			Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro
B	e	A	I	W	i
mm	mm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm
20	1,40	0,99	0,78	0,56	0,75
	1,50	1,05	0,83	0,58	0,75
	1,80	1,23	0,96	0,66	0,73
	2,00	1,34	1,05	0,70	0,72
25	1,40	1,27	1,00	1,18	0,93
	1,50	1,35	1,06	1,22	0,95
	1,80	1,59	1,25	1,39	0,94
	2,00	1,74	1,36	1,49	0,93
30	1,40	1,55	1,22	2,08	1,16
	1,50	1,65	1,30	2,20	1,15
	1,80	1,95	1,53	2,53	1,14
	2,00	2,14	1,66	2,73	1,13
38	1,40	2,00	1,57	4,41	1,48
	1,50	2,13	1,67	4,67	1,48
	1,80	2,52	1,98	5,42	1,47
	2,00	2,78	2,18	5,89	1,46
40	1,40	2,11	1,66	5,18	1,57
	1,50	2,25	1,77	5,49	1,56
	1,80	2,67	2,09	6,39	1,55
	2,00	2,94	2,31	6,95	1,54
	2,50	3,59	2,82	8,23	1,51
	3,00	4,21	3,30	9,36	1,49
	4,00	5,35	4,20	11,18	1,45
50	1,40	2,67	2,10	10,42	1,97
	1,50	2,85	2,24	11,07	1,97
	1,80	3,39	2,66	12,95	1,96
	2,00	3,74	2,93	14,15	1,95
	2,50	4,59	3,60	16,96	1,92
	3,00	5,41	4,25	19,50	1,90
	4,00	6,95	5,45	23,84	1,85
60	1,50	3,45	2,71	19,52	2,38
	1,80	4,11	3,22	22,95	2,36
	2,00	4,54	3,56	25,15	2,35
	2,50	5,59	4,39	30,36	2,33
	3,00	6,61	5,19	35,17	2,31
	4,00	8,55	6,71	43,65	2,26
70	1,50	4,05	3,18	31,46	2,79
	1,80	4,83	3,79	37,09	2,77
	2,00	5,34	4,19	40,73	2,76
	2,50	6,59	5,17	49,43	2,74
	3,00	7,81	6,13	57,56	2,72
	4,00	10,15	7,97	72,22	2,67
75	1,50	4,35	3,42	38,92	2,99
	1,80	5,19	4,07	45,95	2,98
	2,00	5,74	4,50	50,50	2,97
	2,50	7,09	5,56	61,40	2,94
	3,00	8,41	6,60	71,65	2,92
	4,00	10,95	8,59	90,29	2,87
90	1,80	6,27	4,92	80,71	3,59
	2,00	6,94	5,45	88,87	3,58
	2,50	8,59	6,74	108,57	3,56
	3,00	10,21	8,01	127,32	3,53
	4,00	13,35	10,48	162,02	3,48
100	1,80	6,99	5,48	111,62	4,00
	2,00	7,74	6,07	123,01	3,99
	2,50	9,59	7,53	150,65	3,96
	3,00	11,41	8,96	177,08	3,94
	4,00	14,95	11,73	226,46	3,89
	5,00	18,36	14,41	271,36	3,84
	6,00	21,63	16,98	312,00	3,80
120	2,50	11,59	9,10	264,81	4,78
	3,00	13,81	10,84	312,38	4,76
	4,00	18,15	14,25	402,38	4,71
	4,50	20,27	15,91	444,87	4,68
	5,00	22,36	17,55	485,73	4,66
	6,00	28,43	20,75	562,68	4,61
125	3,00	14,41	11,31	354,53	4,96
	4,00	18,95	14,87	457,33	4,91
	5,00	23,36	18,33	552,87	4,87
	6,00	27,63	21,69	641,41	4,82
135	3,00	15,61	12,25	449,88	5,37
	4,00	20,55	16,13	581,80	5,32
	5,00	25,36	19,90	705,16	5,27
	6,00	30,03	23,58	820,25	5,23
150	3,00	17,41	13,67	622,76	5,98
	4,00	22,95	18,01	807,92	5,93
	5,00	28,36	22,26	982,37	5,89
	6,00	33,63	26,40	1146,43	5,84

FUENTE: CATÁLOGO IPAC PRODUCTOS Y SERVICIOS

AUTOR: GROUP, IPAC DUFERCO, [2019]

Anexos 8. Tubería estructural rectangular.

Tubería Estructural Rectangular



Largo Normal:
6 metros
Recubrimiento:
Negro o Galvanizado
Calidad de Acero:
JIS G 3132, ASTM A 36 y ASTM
A572 Gr 50
Norma de Fabricación:
ASTM A 500/ NTE INEN 2415
Espesores:
Desde 1,40 a 6,00 mm
Observaciones:
Otras dimensiones y largos,
previa consulta

Aplicaciones

- Automotriz y de autopartes: carrocería y remolques.
- Agroganadera: maquinaria e implementos agrícolas, avícolas y ganaderos.
- Señalización y vialidad: soportes.
- Aparatos de gimnasia y fitness.
- Construcción: columnas.
- Estructuras: galpones y naves industriales, edificios, soporte de techos.

INEN



Catálogo IPAC

Designaciones			Área	Peso	Propiedades Estáticas					
					Eje x-x			Eje y-y		
					Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro	Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro
B	H	e	A	P	I	W	i	I	W	i
mm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm
20	30	1,50	1,35	1,06	1,59	1,06	1,06	0,84	0,84	0,79
		2,00	1,74	1,36	1,94	1,30	1,06	1,02	1,02	0,77
20	40	1,40	1,55	1,22	3,09	1,55	1,41	1,04	1,04	0,82
		1,50	1,65	1,30	3,27	1,63	1,41	1,10	1,10	0,82
		1,80	1,95	1,53	3,78	1,98	1,59	1,26	1,26	0,80
		2,00	2,14	1,68	4,06	2,03	1,38	1,35	1,35	0,79
25	50	1,40	1,97	1,55	6,28	2,51	1,79	2,13	1,71	1,04
		1,50	2,10	1,65	6,66	2,66	1,78	2,26	1,80	1,04
		1,80	2,49	1,95	7,72	3,09	1,76	2,60	2,08	1,02
		2,00	2,74	2,15	8,39	3,36	1,75	2,82	2,25	1,01
		2,50	3,34	2,62	9,90	3,96	1,72	3,29	2,64	0,99
		3,00	3,91	3,07	11,20	4,48	1,69	3,70	2,98	0,97
30	50	1,40	2,11	1,65	7,11	2,84	1,83	3,23	2,15	1,24
		1,50	2,23	1,77	7,54	3,02	1,83	3,42	2,28	1,23
		1,80	2,57	2,09	8,77	3,51	1,81	3,96	2,64	1,22
		2,00	2,84	2,31	9,54	3,82	1,80	4,30	2,87	1,21
		2,50	3,59	2,82	11,31	4,53	1,78	5,07	3,38	1,19
		3,00	4,21	3,30	12,86	5,15	1,75	5,73	3,82	1,17
40	60	1,40	2,57	2,10	13,54	4,51	2,25	7,27	3,93	1,65
		1,50	2,69	2,24	14,39	4,82	2,25	7,72	4,16	1,64
		1,80	3,39	2,68	16,85	5,62	2,23	9,01	4,51	1,63
		2,00	3,74	2,93	18,42	6,14	2,22	9,84	4,92	1,62
		2,50	4,59	3,60	22,09	7,36	2,19	11,75	5,88	1,60
		3,00	5,41	4,25	25,41	8,47	2,17	13,47	6,74	1,58
50	70	1,40	3,07	2,40	18,33	4,97	2,47	4,37	2,92	2,25
		1,50	3,20	2,54	19,38	5,31	2,47	4,64	3,09	2,28
		1,80	3,90	2,98	22,35	5,81	2,45	5,39	3,60	2,26
		2,00	4,25	3,23	24,41	6,36	2,44	5,87	3,91	2,25
		2,50	5,09	3,90	28,63	7,51	2,41	6,96	4,64	2,23
		3,00	5,91	4,56	32,61	8,74	2,38	7,93	5,29	2,21
40	80	1,50	3,45	2,71	28,99	7,25	2,90	9,84	4,97	1,70
		1,80	4,11	3,22	34,09	8,52	2,88	11,64	5,82	1,68
		2,00	4,54	3,56	37,36	9,34	2,87	12,73	6,36	1,67
		2,50	5,39	4,19	45,12	11,26	2,84	15,27	7,64	1,65
		3,00	6,21	4,82	52,28	13,07	2,81	17,59	8,79	1,63
		4,00	8,55	6,71	64,90	16,22	2,76	21,59	10,79	1,59
50	90	1,50	4,05	3,18	44,68	9,93	3,32	18,13	7,25	2,12
		1,80	4,83	3,79	52,70	11,71	3,30	21,32	8,53	2,10
		2,00	5,34	4,19	57,89	12,96	3,29	23,37	9,35	2,09
		2,50	6,59	5,17	70,23	15,52	3,27	28,25	11,30	2,07
		3,00	7,81	6,13	81,88	18,20	3,24	32,77	13,11	2,05
		4,00	10,15	7,97	102,81	22,85	3,18	40,81	16,32	2,01
50	100	1,50	4,35	3,42	57,77	11,55	3,64	19,89	7,96	2,14
		1,80	5,19	4,07	68,22	13,64	3,63	23,41	9,37	2,12
		2,00	5,74	4,50	74,99	15,00	3,62	25,68	10,27	2,12
		2,50	7,09	5,56	91,22	18,24	3,59	31,07	12,43	2,09
		3,00	8,41	6,60	106,49	21,30	3,56	36,09	14,44	2,07
		4,00	10,95	8,99	134,24	26,85	3,50	45,05	18,02	2,03
50	150	1,80	6,59	5,48	189,33	25,11	5,19	33,87	13,55	2,40
		2,00	7,74	6,37	207,54	27,67	5,18	37,21	14,88	2,39
		2,50	9,59	7,53	254,09	33,86	5,15	45,19	18,08	2,17
		3,00	11,41	8,96	288,58	39,81	5,12	52,68	21,07	2,15
		4,00	14,95	11,73	381,49	50,87	5,05	68,27	26,51	2,11
		5,00	18,36	14,41	455,54	60,97	4,99	78,12	31,25	2,06
60	120	1,80	8,27	6,32	119,80	19,97	11,25	13,75	2,75	2,17
		2,00	9,24	6,95	131,93	21,99	4,36	45,34	15,11	2,56
		2,50	10,95	8,74	161,25	26,87	4,33	55,17	18,39	2,53
		3,00	12,21	9,91	189,15	31,53	4,30	64,44	21,48	2,51
		4,00	15,35	12,48	240,84	40,14	4,25	81,35	27,12	2,47
		5,00	18,36	15,17	287,23	47,87	4,19	96,25	32,08	2,43
70	200	3,00	15,51	12,25	749,71	74,97	6,93	145,15	41,47	3,05
		4,00	20,55	16,13	969,28	96,03	6,87	185,62	53,03	3,01
		5,00	25,36	19,80	1,174,26	117,43	6,81	222,47	63,56	2,96
		6,00	30,03	23,58	1,365,00	136,50	6,74	255,91	73,12	2,92
75	38	1,40	2,28	1,78	4,88	4,15	1,61	22,49	8,00	2,72
		1,50	2,24	1,75	4,83	4,10	1,61	22,03	7,93	2,72
		1,80	2,65	2,09	5,79	4,91	1,59	26,10	9,49	2,70
		1,85	2,66	2,10	5,80	4,92	1,59	26,18	9,50	2,70
		2,00	3,04	2,39	6,74	5,63	1,58	30,77	11,01	2,69
		2,50	3,74	2,93	8,39	6,96	1,56	37,68	13,69	2,66
		3,00	4,41	3,41	10,00	8,14	1,54	44,26	16,43	2,63
		4,00	5,99	4,62	13,96	11,25	1,50	60,96	22,42	2,57
75	125	1,80	6,59	5,48	189,33	25,11	4,68	70,06	18,88	3,17
		2,00	7,74	6,37	207,54	27,67	4,67	77,15	20,57	3,16
		2,50	9,59	7,53	254,09	33,86	4,64	94,26	25,14	3,14
		3,00	11,41	8,96	288,58	39,81	4,61	110,55	29,48	3,11
		4,00	14,95	11,73	381,49	49,74	4,56	140,75	37,53	3,07
		5,00	18,36	14,41	455,54	59,64	4,51	167,93	44,78	3,02
75	175	3,00	14,41	11,31	556,71	63,62	6,22	149,46	39,86	3,22
		4,00	18,95	14,87	718,30	82,08	6,16	191,22	50,99	3,18
		5,00	23,36	18,33	868,40	99,25	6,10	229,29	61,14	3,13
		6,00	27,63	21,69	1,007,36	115,13	6,04	263,88	70,37	3,09
100	38	1,40	3,74	2,93	10,22	5,38	1,65	46,04	16,21	3,61
		1,50	3,99	3,13	10,87	5,72	1,65	49,04	17,81	3,50
		1,80	4,75	3,70	12,74	6,70	1,64	57,81	21,56	3,49
		1,85	4,88	3,83	13,04	6,86	1,63	59,23	22,85	3,48
		2,00	5,26	4,13	13,93	7,33	1,63	63,46	24,69	3,47
		2,50	6,49	5,09	16,74	8,81	1,61	76,96	29,39	3,44
		3,00	7,69	6,04	19,31	10,16	1,58	89,55	33,91	3,41
		4,00	9,90	7,84	25,78	12,51	1,54	112,11	42,42	3,35
100	150	3,00	14,41	11,31	480,67	61,42	5,85	247,67	49,53	4,15
		4,00	18,95	14,87	594,71	79,29	5,80	318,67	63,73	4,10
		5,00	23,36	18,33	719,46	95,93	5,55	384,27	76,85	4,06
		6,00	27,63	21,69	835,21	111,36	5,50	444,72	88,94	4,01
100	200	3,00	14,41	11,31	480,67	61,42	7,23	318,26	83,85	4,28
		4,00	22,05	18,01	1,199,81	119,08	7,23	410,88	102,18	4,23
		5,00	28,36	22,26	1,459,51	145,95	7,17	497,19	124,44	4,19
		6,00	33,63	26,40	1,703,83	170,38	7,12	577,44	145,49	4,14

FUENTE: CATÁLOGO IPAC PRODUCTOS Y SERVICIOS

AUTOR: GROUP, IPAC DUFERCO, [2019]

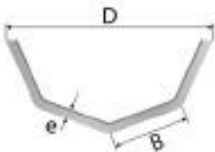
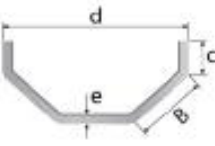
Anexos 9. Perfiles especiales.

Perfiles Especiales

- Medios octógonos
- Octógonos



Medios octógonos

Espesor e	Diámetro Circunscrito (D)		Diámetro Inscrito (d)		Desarrollo de Plancha
	Min.	Max.	Min.	Max.	
mm	mm	mm	mm	mm	mm
2	150	800	139	739	1220
3	150	800	139	739	1220
4	150	900	139	832	1500
5	200	1100	185	1017	1500
6	200	1100	185	1017	1800
8	300	1200	277	1109	1800
10	400	1300	370	1201	2440
12	500	1400	462	1294	2440
15	600	1600	555	1479	2500
16	700	1600	647	1479	2500
18	800	1600	739	1479	2500
19	800	1600	739	1479	2500
20	900	1600	832	1479	2500
22	1000	1600	924	1479	2500
25	1300	1600	1201	1479	2500

Recubrimiento:
Negro
Calidad de Acero:
ASTM A 36 / ASTM A 572 Gr 50
Observaciones:
Para el ala (c) tomar como regla la fórmula $c=b/2$.
Ángulos con alas desiguales, previa consulta.
En caso de requerir perfiles en largos especiales, consultar.

➤ Aplicaciones

- Torre de telecomunicaciones.
- Vallas publicitarias.
- Columnas.





FUENTE: CATÁLOGO IPAC PRODUCTOS Y SERVICIOS

AUTOR: GROUP, IPAC DUFERCO, [2019]

Anexos 10. Plancha Antideslizante

Plancha antideslizante

Recubrimiento:
Negro
Espesores:
Desde 2,00 a 6,00 mm
Calidad de Acero:
ASTM A 36 / ASTM A 786
Observaciones:
Dimensiones y largos especiales, previa consulta

Espesor	Ancho	Largo	Peso Aprox.
mm	mm	mm	kg
2,00	2440	1230	53,66
2,50	2440	1230	68,56
3,00	2440	1230	75,55
5,00	2440	1230	120,50
6,00	2440	1230	147,81



- Aplicaciones
- Piso de escaleras.
 - Carrocerías.
 - Losa de puentes.

FUENTE: CATÁLOGO IPAC PRODUCTOS Y SERVICIOS

AUTOR: GROUP, IPAC DUFERCO, [2019]

Anexos 11. Plancha laminada en caliente

Plancha laminada en caliente			
Recubrimiento: Negro Norma de Fabricación: NTE INEN 115, ASTM A 6 Calidad de Acero: ASTM A 570 Gr 36 / ASTM A 36 / ASTM A 283 Gr C / ASTM A 588 Gr A / ASTM A 131 Gr A / ASTM A 516 Gr 70 Observaciones: Dimensiones y largos especiales, previa consulta			
Ancho	Largo	Espesor	Peso Aprox.
mm	mm	mm	kg
1220	2440	1,50	35,05
1220	2440	2,00	46,74
1220	2440	3,00	70,10
1220	2440	4,00	93,47
1220	2440	5,00	116,84
1220	2440	6,00	140,21
1220	2440	8,00	186,94
1220	2440	9,00	210,31
1220	2440	10,00	233,68
1220	2440	12,00	280,41
>Aplicaciones - Conformación de estructuras en general con elementos de alma llena (flejes). - Fabricación de tanques. - Estructuras de puentes. - Estructuras de barcos. - Camisas de pilotes. - Encofrados. - Placas. - Contención de tierra. - Plataformas. - Calderos. - Tubería de grandes diámetros.			

FUENTE: CATÁLOGO IPAC PRODUCTOS Y SERVICIOS

AUTOR: GROUP, IPAC DUFERCO, [2019]