

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ATENUADOR DE IMPACTO PARA
UN VEHÍCULO MONOPLAZA FORMULA STUDENT”**

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero

Mecánico Automotriz

Autores:

José Luis Luna Bacuilima

Marco Vinicio Pucha Tambo

Francisco Javier Valencia Palomeque

Director:

Ing. Marco Esteban Amaya Pinos

Cuenca, Julio 2013

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y DERECHOS DE AUTOR

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana. En virtud de los fundamentos teóricos científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores.

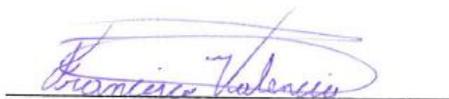
A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigentes.



Marco Vinicio Pucha Tambo



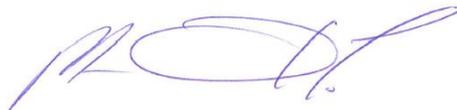
José Luis Luna Bacuilima.



Francisco Javier Valencia Palomeque

CERTIFICADO

Que el presente proyecto de tesis “Diseño y construcción de un atenuador de impacto para un vehículo monoplaça formula Student”, realizado por los estudiantes: José Luis Luna Bacuilima, Marco Vinicio Pucha Tambo y Francisco Javier Valencia Palomeque, fue dirigido por mi persona.



Ing. Marco Esteban Amaya Pinos

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento especial hacia la Universidad Politécnica Salesiana, a todos los docentes de esta institución, quienes compartieron sus conocimientos y nos formaron día tras día.

Agradecer además al director de tesis, el Ing. Marco Amaya, quien dirigió en el transcurso de mi trabajo de investigación.

Por último, quiero agradecer a todas y cada una de las personas que compartieron con nosotros las aulas universitarias, por su apoyo incondicional y su compañía durante esos largos años de estudio.

José Luis Luna Bacuilima

Mi agradecimiento especial hacia la Universidad Politécnica Salesiana, a todos los docentes de esta institución, quienes compartieron sus conocimientos y nos formaron día tras día.

Agradecer además al director de tesis, el Ing. Marco Amaya, quien supervisó en el transcurso de nuestro trabajo de investigación.

Por último, quiero agradecer a todas y cada una de las personas que compartieron con nosotros las aulas universitarias, por su apoyo incondicional y su compañía durante esos largos años de estudio.

Marco Vinicio Pucha Tambo

Un agradecimiento especial hacia la Universidad Politécnica Salesiana, a todos los docentes de esta institución, quienes compartieron sus conocimientos y nos formaron día tras día.

Agradecer además al director de tesis, el Ing. Marco Amaya, quien guio en el transcurso de nuestro trabajo de investigación.

Por último, quiero agradecer a todas y cada una de las personas que compartieron con nosotros las aulas universitarias, por su apoyo incondicional y su compañía durante esos largos años de estudio.

Francisco Javier Valencia Palomeque

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico en primer lugar a Dios, a la Virgencita del Cisne y a San Vicente Ferrer por todas las bendiciones recibidas a lo largo de todo este tiempo transcurrido lejos de mi familia, por darme la fuerza para afrontar los problemas y por haberme permitido alcanzar un logro más en mi vida profesional.

A mis queridos padres Héctor y Luzmila por su apoyo incondicional, amor, consejos, valores y por la formación que me dieron para ser un hombre de bien, a mis hermanos por su compañía en todo momento, que a pesar de estar lejos siempre estaban junto a mi; a una persona que me regalo muchas alegrías y sus palabras de aliento para no decaer en momentos difíciles.

A mis amigos y sus familias que nos supieron dar una palabra de motivación para seguir adelante y alcanzar nuestra meta.

Marco Vinicio Pucha Tambo

Quiero dedicar este trabajo en primera instancia a Dios y a mis padres Armando e Inés, quienes de una manera incondicional supieron forjar en mi valores y virtudes, además de un apoyo fundamental en todos los aspectos que son esenciales y necesarias con los cuales pude trazar objetivos en mi vida y que al culminar con este trabajo me doy cuenta que todo aquel sacrificio realizado por ellos pude superar las adversidades y obstáculos existentes en el transcurso de mi carrera universitaria, de igual manera dedico también a mis queridos hermanos que son fuente de inspiración y total apoyo para la culminación de este trabajo.

Y por último a mis compañeros de tesis y a sus familias y a todos mis amigos que estuvieron a mi lado durante mi etapa de estudio.

José Luis Luna Bacuilima

No hay ser más importante en la vida de una persona que Dios, a Él está dedicada toda mi vida. A mis padres y a mi hermana que con su ejemplo y apoyo incondicional, han permitido alcanzar mis metas.

A mis compañeros de tesis y a sus familias, a todos mis amigos que estuvieron a mi lado durante mi etapa de estudio.

Francisco Javier Valencia Palomeque

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 REQUERIMIENTOS DEL MATERIAL	2
1.3 ANÁLISIS DE MATERIALES	2
1.3.1 ALUMINIO	3
1.3.1.1 PROPIEDADES DEL ALUMINIO.....	4
1.3.1.2 PROPIEDADES FÍSICAS	4
1.3.1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS	6
1.3.2 Balsa	7
1.3.2.1 GENERALIDADES.....	7
1.3.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	7
1.3.2.3 COMPRESIÓN DE LA MADERA DE Balsa.....	8
1.3.2.4 USOS.....	9
1.3.3 POLICARBONATO.....	9
1.3.3.1 CONCEPTO.....	9
1.3.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL POLICARBONATO.....	10
1.3.3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLICARBONATO	11
1.3.4 MATERIALES COMPUESTOS.....	11
1.3.4.1 DEFINICIÓN	11
1.3.4.2 CARACTERÍSTICAS.....	11
1.3.4.3 ESTRUCTURA.....	12
1.3.4.4 CLASIFICACIÓN.....	13
1.3.4.5 APLICACIONES	14
1.3.5 KEVLAR	15

1.3.5.1	DEFINICIÓN	15
1.3.5.2	PROPIEDADES MECÁNICAS	15
1.3.5.3	TIPOS DE KEVLAR	16
1.3.5.4	PROPIEDADES FÍSICAS DEL KEVLAR	16
1.3.5.5	APLICACIONES DEL KEVLAR	17
1.3.6	FIBRA DE VIDRIO	17
1.3.6.1	INTRODUCCIÓN.....	17
1.3.6.2	TIPOS DE FIBRA DE VIDRIO	17
1.3.6.3	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE VIDRIO.....	18
1.3.6.4	PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FIBRA DE VIDRIO	19
1.3.6.5	APLICACIONES DE LA FIBRA DE VIDRIO	19
1.3.7	FIBRA DE CARBONO.....	20
1.3.7.1	INTRODUCCIÓN.....	20
1.3.7.2	TIPOS DE FIBRA DE CARBONO	21
1.3.7.3	CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA DE CARBONO	21
1.3.7.4	PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FIBRA DE CARBONO.....	22
1.3.7.5	APLICACIONES DE LA FIBRA DE CARBONO.....	22
1.3.8	POLIURETANO	23
1.3.8.1	INTRODUCCIÓN.....	23
1.3.8.2	PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLIURETANO	24
1.3.8.3	APLICACIONES DEL POLIURETANO	24
1.3.9	POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	25
1.3.9.1	INTRODUCCIÓN.....	25
1.3.9.2	PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO.	25
1.3.9.3	APLICACIONES DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	26

1.4	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES	26
1.5	TABLA DE PRIORIZACIÓN PARA SELECCIÓN DE MATERIALES .	32
1.6	SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	33
CAPÍTULO II		34
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	34
2.2.	CONCEPTOS GENERALES	34
2.3.	MÉTODOS DE CÁLCULO	35
2.4.	NORMA FORMULA STUDENT 2012 PARA ATENUADOR DE IMPACTO	36
2.4.1.	CARACTERÍSTICAS DEL ATENUADOR.....	36
2.4.2.	CONDICIONES INICIALES	37
2.4.3.	CÁLCULOS PRELIMINARES	38
2.4.3.1.	ENERGÍA CINÉTICA	38
2.4.3.2.	FUERZA MÁXIMA	39
2.4.3.3.	DEFORMACIÓN MÍNIMA DEL ATENUADOR	39
2.4.3.4.	TIEMPO DE DEFORMACIÓN	40
2.4	DISEÑO DE LOS ATENUADORES DE IMPACTO.....	42
2.4.1	DISEÑO DE ALUMINIO (PROPUESTA 1).....	42
2.4.1.1	RESULTADOS	43
2.4.1.1.1.	DEFORMACIÓN	43
2.4.1.1.2.	VELOCIDAD-TIEMPO	43
2.4.1.1.3.	DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.....	44
2.4.1.1.4.	ENERGÍA INTERNA-TIEMPO	44

2.4.2	DISEÑO DE ALUMINIO (PROPUESTA 2).....	45
2.4.2.1	RESULTADOS	45
2.4.2.1.1.	DEFORMACIÓN	45
2.4.2.1.2.	VELOCIDAD-TIEMPO	46
2.4.2.1.3.	DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.....	46
2.4.2.1.4.	ENERGÍA INTERNA-TIEMPO	47
2.4.3	DISEÑO DE ALUMINIO-POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3).....	47
2.4.3.1	RESULTADOS	48
2.4.3.1.1.	DEFORMACIÓN	48
2.4.3.1.2.	VELOCIDAD-TIEMPO	48
2.4.3.1.3.	DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.....	49
2.4.3.1.4.	ENERGÍA INTERNA-TIEMPO	49
2.4.4	DISEÑO DE ALUMINIO (PROPUESTA 4).....	50
2.4.4.1	RESULTADOS	50
2.4.4.1.1	DEFORMACIÓN	50
2.4.4.1.2	VELOCIDAD-TIEMPO	51
2.4.4.1.3	DESPLAZAMIENTO-TIEMPO	51
2.4.4.1.4	ENERGÍA INTERNA-TIEMPO	52
2.4.5	DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 5).....	52
2.4.5.1	RESULTADOS	53
2.4.5.1.1	DEFORMACIÓN	53
2.4.5.1.2	VELOCIDAD-TIEMPO	53
2.4.5.1.3	DESPLAZAMIENTO-TIEMPO	54
2.4.5.1.4	ENERGÍA INTERNA-TIEMPO	54

2.4.6	DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 6)	55
2.4.6.1	RESULTADOS	55
2.4.6.1.1	DEFORMACIÓN	55
2.4.6.1.2	VELOCIDAD-TIEMPO	56
2.4.6.1.3	DESPLAZAMIENTO-TIEMPO	56
2.4.6.1.4	ENERGÍA INTERNA-TIEMPO	57
2.4.6	DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 7)	57
2.4.6.1	RESULTADOS	58
2.4.6.1.1	DEFORMACIÓN	58
2.4.6.1.2	VELOCIDAD-TIEMPO	58
2.4.6.1.3	DESPLAZAMIENTO-TIEMPO	59
2.4.6.1.4	ENERGÍA INTERNA-TIEMPO	59
2.5	TABLA DE PRIORIZACIÓN DE DISEÑOS DE ATENUADORES DE IMPACTO	60
2.5.1	SELECCIÓN DE LOS ATENUADORES DE IMPACTO	61
2.6	PRUEBA DINÁMICA DE IMPACTO	61
2.6.1	BANCO DE PRUEBAS	61
2.6.1.1	PARTES DEL BANCO DE PRUEBAS	62
2.6.1.1.1	TANQUE:	62
2.6.1.1.2	RODAMIENTOS:	63
2.6.1.1.3	ÁNGULOS	63
2.6.1.1.4	TECLE	63
2.6.1.1.5	MAMPARO	64
2.6.1.2	CÁLCULOS DEL BANCO DE PRUEBAS	64
2.6.1.2.1	CÁLCULO DE LA FRICCIÓN EN LOS RODAMIENTOS	66

2.6.1.2.2	CÁLCULO DE LA INERCIA EN RODAMIENTOS	68
2.6.1.2.3	CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN EN RODAMIENTOS ...	69
2.6.1.2.4	CÁLCULO DE LA ALTURA DE CAÍDA.....	71
2.7	CONSTRUCCIÓN DE LOS ATENUADORES SELECCIONADOS.....	72
2.7.1	CONSTRUCCIÓN ATENUADOR DE ALUMINIO-POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3).....	72
2.7.2	CONSTRUCCIÓN DEL ATENUADOR DE Balsa (PROPUESTA 6)	75
2.7.3	CONSTRUCCIÓN DEL ATENUADOR DE Balsa (PROPUESTA 7)	77
CAPITULO III	80
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	80
3.2.	CONCEPTOS GENERALES	80
3.2.1.	TEORÍA DE FALLA.....	81
3.2.1.1.	TEORÍA DE VON MISES.....	81
3.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	82
3.3.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS POR SOFTWARE ...	82
3.3.1.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DISEÑO DE Balsa PROPUESTA 6.....	82
3.3.1.1.1.	ANÁLISIS VON MISES	83
3.3.1.1.2.	ANÁLISIS DESPLAZAMIENTO –TIEMPO.....	84
3.3.1.1.3.	ANÁLISIS ENERGIA-TIEMPO.....	85
3.3.1.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA) 7	86

3.3.1.2.1. ANÁLISIS VON MISES	87
3.3.1.2.2. ANÁLISIS DESPLAZAMIENTO –TIEMPO.....	88
3.3.1.2.3. ANÁLISIS ENERGIA TOTAL –TIEMPO	89
3.3.1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS CON MATERIAL DE ALUMINIO Y POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3).....	90
3.3.1.3.1. ANÁLISIS VON MISES	91
3.3.1.3.2. DESPLAZAMIENTO –TIEMPO.....	92
3.3.1.3.3. ANÁLISIS ENERGIA TOTAL –TIEMPO	94
3.3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DINÁMICOS (PRUEBAS DE IMPACTO)	94
3.3.2.1. MEDICIÓN DEL MATERIAL RESIDUAL.....	95
3.3.2.1.1. ATENUADOR DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 6)	95
3.3.2.1.2. ATENUADOR DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 7)	98
3.3.2.1.3. ATENUADOR DE ALUMINIO Y POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3)	100
3.3.2.2. ANÁLISIS DE DEFORMACION DE LOS MAMPAROS FRONTALES.....	102
3.3.2.2.1. MAMPARO ATENUADOR DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 6)	102
3.3.2.2.2. MAMPARO ATENUADOR DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 7)	103
3.3.2.2.3. MAMPARO ATENUADOR DISEÑO DE ALUMINIO Y POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3).....	105
3.3.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	107

3.3.3.1	COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE ATENUADORES	107
3.3.3.2	COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE MAMPAROS.	108
3.3.4.	SELECCIÓN DEL ATENUADOR	110
CAPITULO IV		112
4.1.	INTRODUCCIÓN	112
4.2.	ANÁLISIS DE COSTOS	113
4.2.1.	COSTOS DIRECTOS	113
4.2.2.	COSTOS INDIRECTOS	114
4.2.3.	ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS	114
4.2.3.1.	COSTO DE LOS MATERIALES	114
4.2.3.2.	COSTO DE UTILIZACIÓN DE MAQUINARIA	115
4.2.3.3.	COSTO DE MONTAJE	116
4.2.3.4.	COSTO DIRECTO TOTAL	117
4.2.4.	ANÁLISIS DE COSTOS INDIRECTOS	117
4.2.4.1.	COSTOS DE MATERIALES INDIRECTOS	117
4.2.4.2.	COSTOS DE IMPREVISTOS	118
4.2.4.3.	COSTO INDIRECTO TOTAL	119
4.2.5.	COSTO TOTAL	119
4.3.	BENEFICIOS A CAUSA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ATENUADOR DE IMPACTOS EN UN VEHÍCULO MONOPLAZA	120
4.3.1	BENEFICIOS TANGIBLES	120
4.3.2	BENEFICIOS INTANGIBLES	120
BIBLIOGRAFÍA		122

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIGURA 1. 1. REQUERIMIENTOS DEL MATERIAL PARA EL ATENUADOR.	2
FIGURA 1. 2. PARÁMETROS DE MATERIALES.....	3
FIGURA 1. 3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL ALUMINIO.	4
FIGURA 1. 4. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO.	6
FIGURA 1. 5. USOS PRINCIPALES DE LA MADERA DE Balsa.	9
FIGURA 1. 6. APLICACIONES DEL POLICARBONATO.	10
FIGURA 1. 7. PROPIEDADES DEL MATERIAL POLICARBONATO.....	10
FIGURA 1. 8. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	12
FIGURA 1. 9. ESTRUCTURA DE UN MATERIAL COMPUESTO.....	12
FIGURA 1. 10. CLASIFICACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO.....	13
FIGURA 1. 11. APLICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	14
FIGURA 1. 12. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL KEVLAR.	15
FIGURA 1. 13. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL KEVLAR.	16
FIGURA 1. 14. APLICACIONES DEL KEVLAR.	17
FIGURA 1. 15. TIPOS DE FIBRA DE VIDRIO.	18
FIGURA 1. 16. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE VIDRIO.....	18
FIGURA 1. 17. APLICACIONES DE LA FIBRA DE VIDRIO.....	20
FIGURA 1. 18. TIPOS DE FIBRAS DE CARBONO.....	21
FIGURA 1. 19. CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA DE CARBONO.	21
FIGURA 1. 20. APLICACIONES DE LA FIBRA DE CARBONO.	22
FIGURA 1. 21. PROPIEDADES DEL POLIURETANO.....	23
FIGURA 1. 22. PROPIEDADES DEL POLIURETANO.....	24

FIGURA 1. 23. APLICACIONES DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	26
FIGURA 1. 24. COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS MATERIALES.....	28
FIGURA 1. 25. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE LOS MATERIALES.	29
FIGURA 1. 26. COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES. ..	30
FIGURA 1. 27. RESULTADOS DE PRIORIZACIÓN DE LOS MATERIALES.	31

CAPÍTULO II

FIGURA 2. 1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.	36
FIGURA 2. 2. CARACTERÍSTICAS DEL ATENUADOR DE IMPACTO.	37
FIGURA 2. 3. DISEÑO DE ATENUADOR.	42
FIGURA 2. 4. DEFORMACIÓN DEL ATENUADOR.	43
FIGURA 2. 5. GRAFICA VELOCIDAD-TIEMPO.	43
FIGURA 2. 6. GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.	44
FIGURA 2. 7. GRAFICA ENERGÍA INTERNA-TIEMPO.	44
FIGURA 2. 8. DISEÑO DEL ATENUADOR DE ALUMINIO.	45
FIGURA 2. 9. DEFORMACIÓN DEL ATENUADOR.	45
FIGURA 2. 10. GRAFICA VELOCIDAD-TIEMPO.	46
FIGURA 2. 11. GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.	46
FIGURA 2. 12. GRAFICA ENERGÍA INTERNA-TIEMPO.	47
FIGURA 2. 13. DISEÑO TIPO PIRÁMIDE SOLIDWORKS.....	47
FIGURA 2. 14. DEFORMACIÓN DEL ATENUADOR.	48
FIGURA 2. 15. GRAFICA VELOCIDAD-TIEMPO.	48
FIGURA 2. 16. GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.	49

FIGURA 2. 17.	GRAFICA ENERGÍA INTERNA-TIEMPO.....	49
FIGURA 2. 18.	DISEÑO CON MATERIAL DE ALUMINIO.....	50
FIGURA 2. 19.	DEFORMACIÓN DEL ATENUADOR.	50
FIGURA 2. 20.	GRAFICA VELOCIDAD-TIEMPO.....	51
FIGURA 2. 21.	GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.....	51
FIGURA 2. 22.	GRAFICA ENERGÍA INTERNA-TIEMPO.....	52
FIGURA 2. 23.	ATENUADOR CON MATERIAL DE Balsa.....	52
FIGURA 2. 24.	DEFORMACIÓN DEL ATENUADOR.	53
FIGURA 2. 25.	GRAFICA VELOCIDAD-TIEMPO.....	53
FIGURA 2. 26.	GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.....	54
FIGURA 2. 27.	GRAFICA ENERGÍA INTERNA-TIEMPO.....	54
FIGURA 2. 28.	DISEÑO ATENUADOR DE Balsa.	55
FIGURA 2. 29.	DEFORMACIÓN DEL ATENUADOR.	55
FIGURA 2. 30.	GRAFICA VELOCIDAD-TIEMPO.....	56
FIGURA 2. 31.	GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.....	56
FIGURA 2. 32.	GRAFICA ENERGÍA INTERNA-TIEMPO.....	57
FIGURA 2. 33.	DISEÑO ATENUADOR DE Balsa.	57
FIGURA 2. 34.	DEFORMACIÓN DEL ATENUADOR.	58
FIGURA 2. 35.	GRAFICA VELOCIDAD-TIEMPO.....	58
FIGURA 2. 36.	GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.....	59
FIGURA 2. 37.	GRAFICA ENERGÍA INTERNA-TIEMPO.....	59
FIGURA 2. 38.	BANCO DE PRUEBAS DE IMPACTO.....	62
FIGURA 2. 39.	TANQUE PARA SIMULAR EL PESO.	62
FIGURA 2. 40.	RODAMIENTO DE BOLAS.	63
FIGURA 2. 41.	MAMPARO FRONTAL.	64

FIGURA 2. 42. MEDIDAS DEL RODAMIENTO.	67
FIGURA 2. 43. FICHA TÉCNICA DEL RODAMIENTO 6009Z.	67
FIGURA 2. 44. FUERZAS IMPLICADAS EN EL RODAMIENTO.	68
FIGURA 2. 45. ÁREAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS PISOS.	73
FIGURA 2. 46. ÁREA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MAMPARO.	73
FIGURA 2. 47. ENSAMBLAJE PARA CONSTRUIR LOS PISOS.	74
FIGURA 2. 48. ATENUADOR DE ALUMINIO.	74
FIGURA 2. 49. PLANCHA DE BALSA.	75
FIGURA 2. 50. CORTE DE PLANCHA DE BALSA.	75
FIGURA 2. 51. PLANCHAS DE BALSA ENSAMBLADAS.	76
FIGURA 2. 52. MAMPARO FRONTAL.	76
FIGURA 2. 53. ATENUADOR DE BALSA.	77
FIGURA 2. 54. PLANCHA DE BALSA.	77
FIGURA 2. 55. CORTE DE PLANCHA DE BALSA.	78
FIGURA 2. 56. PLANCHAS DE BALSA ENSAMBLADAS.	78
FIGURA 2. 57. MAMPARO FRONTAL.	79
FIGURA 2. 58. ATENUADOR DE BALSA 2.	79

CAPÍTULO III

FIGURA 3. 1. TEORÍA DE DISTORSIÓN VON MISES.	81
FIGURA 3. 2. ATENUADOR DE IMPACTO (PROPUESTA 6).	82
FIGURA 3. 3. GRAFICA VON MISES.	83
FIGURA 3. 4. DESPLAZAMIENTO (PROPUESTA 6).	84
FIGURA 3. 5. GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO.	85

FIGURA 3. 6. GRAFICA ENERGÍA TOTAL –TIEMPO.....	86
FIGURA 3. 7. ATENUADOR DE Balsa (PROPUESTA 7).....	86
FIGURA 3. 8. GRAFICA VON MISES.....	87
FIGURA 3. 9. DESPLAZAMIENTO (PROPUESTA 7).	88
FIGURA 3. 10. GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO (PROPUESTA 7).	89
FIGURA 3. 11. GRAFICA ENERGÍA TOTAL –TIEMPO (PROPUESTA 7).....	90
FIGURA 3. 12. ATENUADOR DISEÑO CON MATERIAL DE ALUMINIO-POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	90
FIGURA 3. 13. GRAFICA VON MISES.....	91
FIGURA 3. 14. DESPLAZAMIENTO ATENUADOR DE ALUMINIO-POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	93
FIGURA 3. 15. GRAFICA DESPLAZAMIENTO-TIEMPO (ALUMINIO-POLIESTIRENO.....	93
FIGURA 3. 16. GRAFICA ENERGÍA TOTAL –TIEMPO (PROPUESTA 3).....	94
FIGURA 3. 17. ATENUADOR Balsa (PROPUESTA 6) :(A) ATENUADOR FABRICADO, (B). ATENUADOR DEFORMADO	95
FIGURA 3. 18. MEDICIÓN DE MATERIAL.....	96
FIGURA 3. 19. ATENUADOR Balsa (PROPUESTA 7). :(A) ATENUADOR FABRICADO, (B). ATENUADOR DEFORMADO	98
FIGURA 3. 20. MEDICIÓN DE MATERIAL.....	98
FIGURA 3. 21. ATENUADOR ALUMINIO-POLIESTIRENO EXPANDIDO. :(A) ATENUADOR FABRICADO, (B). ATENUADOR DEFORMADO.....	100
FIGURA 3. 22. MEDICIÓN DE ATENUADOR DE ALUMINIO-POLIESTIRENO EXPANDIDO.	100
FIGURA 3. 23. MAMPARO (PROPUESTA 6) :(A) SIMULACIÓN, (B). MAMPARO DEFORMADO.	102

FIGURA 3. 24. MAMPARO (PROPUESTA 6) :(A) VALOR DE MAMPARO SIN DEFORMAR,	
(B). VALOR DE MAMPARO DEFORMADO. UNIDAD DE MEDIDA (METROS).	103
FIGURA 3. 25. MAMPARO (PROPUESTA 7) :(A) SIMULACIÓN, (B). MAMPARO	
DEFORMADO	104
FIGURA 3. 26. MAMPARO (PROPUESTA 7) :(A) VALOR DE MAMPARO SIN DEFORMAR,	
(B). VALOR DE MAMPARO DEFORMADO UNIDAD DE MEDIDA (METROS).	104
FIGURA 3. 27. MAMPARO (PROPUESTA 3) :(A) SIMULACIÓN, (B). MAMPARO	
DEFORMADO	105
FIGURA 3. 28. MAMPARO (PROPUESTA 3) :(A) VALOR DE MAMPARO SIN DEFORMAR,	
(B). VALOR DE MAMPARO DEFORMADO. UNIDAD DE MEDIDA (METROS).....	106
FIGURA 3. 29. ATENUADORES.	111
FIGURA 3. 30. ATENUADOR SELECCIONADO.....	111

CAPÍTULO IV

FIGURA 4. 1. ASPECTOS PARA ANÁLISIS DE COSTO.	113
---	------------

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

TABLA 1- 1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL ALUMINIO.	5
TABLA 1- 2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE BALSA.	7
TABLA 1- 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE BALSA.	8
TABLA 1- 4. COMPRESIÓN DE LA MADERA DE BALSA.	8
TABLA 1- 5. PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLICARBONATO.....	11
TABLA 1- 6. PROPIEDADES FÍSICAS DEL KEVLAR.	16
TABLA 1- 7. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FIBRA DE VIDRIO.....	19
TABLA 1- 8. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FIBRA DE CARBONO.....	22
TABLA 1- 9. PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLIURETANO.....	24
TABLA 1- 10. PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	25
TABLA 1- 11. COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS MATERIALES.	27
TABLA 1- 12. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE LOS MATERIALES.	29
TABLA 1- 13. COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES.....	30
TABLA 1- 14. COMPARACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE LOS MATERIALES.	32

CAPÍTULO II

TABLA 2- 1. MEDIDAS NORMALIZADAS FORMULA SAE 2012.	37
TABLA 2- 2. CONDICIONES INICIALES.	38
TABLA 2- 3. PRIORIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE LOS ATENUADORES.	60

CAPÍTULO III

TABLA 3- 1. ANÁLISIS VON MISES (PROPUESTA 6).	83
TABLA 3- 2. DESPLAZAMIENTO (PROPUESTA 6).	84
TABLA 3- 3. RESULTADOS VON MISES (PROPUESTA 7).	87
TABLA 3- 4. DESPLAZAMIENTO (PROPUESTA 7).	88
TABLA 3- 5. RESULTADOS VON MISES (ALUMINIO).	91
TABLA 3- 6. DESPLAZAMIENTO (ALUMINIO-POLIESTIRENO).	92
TABLA 3- 7. MEDICIÓN MATERIAL (PROPUESTA 5).	96
TABLA 3- 8. MEDICIÓN MATERIAL (DISEÑO DOS).	99
TABLA 3- 9. MEDICIÓN MATERIAL (ALUMINIO).	101
TABLA 3- 10. COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE ATENUADORES	107
TABLA 3- 11. COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE ATENUADORES	108
TABLA 3- 12. RESULTADOS.	110

CAPÍTULO IV

TABLA 4- 1. COSTO DE LOS MATERIALES.	115
TABLA 4- 2. COSTO DE UTILIZACIÓN DE MAQUINARIA.	116
TABLA 4- 3. COSTO DE MAQUINADO.	117
TABLA 4- 4. COSTO DIRECTO TOTAL.	117
TABLA 4- 5. COSTO MATERIALES INDIRECTOS.	118
TABLA 4- 6. COSTOS IMPREVISTOS.	118
TABLA 4- 7. COSTO INDIRECTO TOTAL.	119
TABLA 4- 8. COSTO TOTAL.	119

RESUMEN

El presente proyecto mantiene como propósito el diseño y construcción de un atenuador de impacto para un vehículo monoplace Formula Student, con la finalidad de absorber la energía que se genera al producirse una colisión y de esta manera minimizar los daños del vehículo y conductor.

Para realizar la construcción es necesario conocer el material a utilizar, sus características tanto mecánicas y físicas, para elegir el más adecuado que solventa con los requerimientos dados en la normativa Formula SAE.

Para la elaboración del diseño se hace primordial la utilización de software de simulaciones, los mismos que sirven para obtener resultados del análisis tanto estático como dinámico, y se elegirá tres diseños mediante una tabla de priorización.

Luego del análisis de los diseños propuestos y la selección de los más adecuados se construyen y se realiza las pruebas dinámicas reales, con el fin de comprobar su comportamiento frente a un impacto.

Se procede a analizar los resultados obtenidos tanto en el planteamiento computacional, como también los obtenidos en las pruebas dinámicas de impacto con lo cual se verifica e interpreta el comportamiento de cada uno de ellos. Se elige uno de los tres atenuadores que mejores resultados brinde tanto en absorción de energía, desplazamiento y deformación

Se realiza un estudio del costo real del atenuador, considerando todos los factores que involucran su construcción.

Además se realiza un análisis de los beneficios que presenta este elemento para el monoplace, su utilidad y prestaciones, como también los beneficios propios.

Por último se compara la inversión realizada con la de otras universidades o proveedores para ver la importancia de nuestro proyecto.

CAPÍTULO I

DETERMINACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS DE LOS MATERIALES ADECUADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL ATENUADOR DE IMPACTO

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad se desarrolla la competencia Formula SAE a nivel mundial, en la cual se da la participación de equipos estudiantiles con la finalidad de exponer innovaciones en la parte automotriz, aplicado en un monoplaza prototipo.

Uno de los requerimientos en la competencia es el desarrollo del diseño, construcción y pruebas de un atenuador de impacto para la parte frontal del vehículo, con la finalidad de absorber la energía que se genera al producirse una colisión y de esta manera minimizar los daños del vehículo y conductor.

El atenuador prototipo debe proporcionar una desaceleración media de no más de $20 \frac{m}{s^2}$ durante un impacto y a su vez no debe exceder de los $40 \frac{m}{s^2}$ en cualquier punto de su estructura. Las condiciones necesarias para realizar las pruebas de impacto es que el vehículo debe circular a $7 \frac{m}{s}$ con una masa total de 300 kg.

En el presente capítulo se realiza el análisis del material óptimo a ser utilizado en la construcción del atenuador de impacto basado en las características y propiedades de cada uno de ellos.

1.2 REQUERIMIENTOS DEL MATERIAL

En la **figura 1.1** se muestra los requerimientos necesarios del material para el atenuador de impacto:

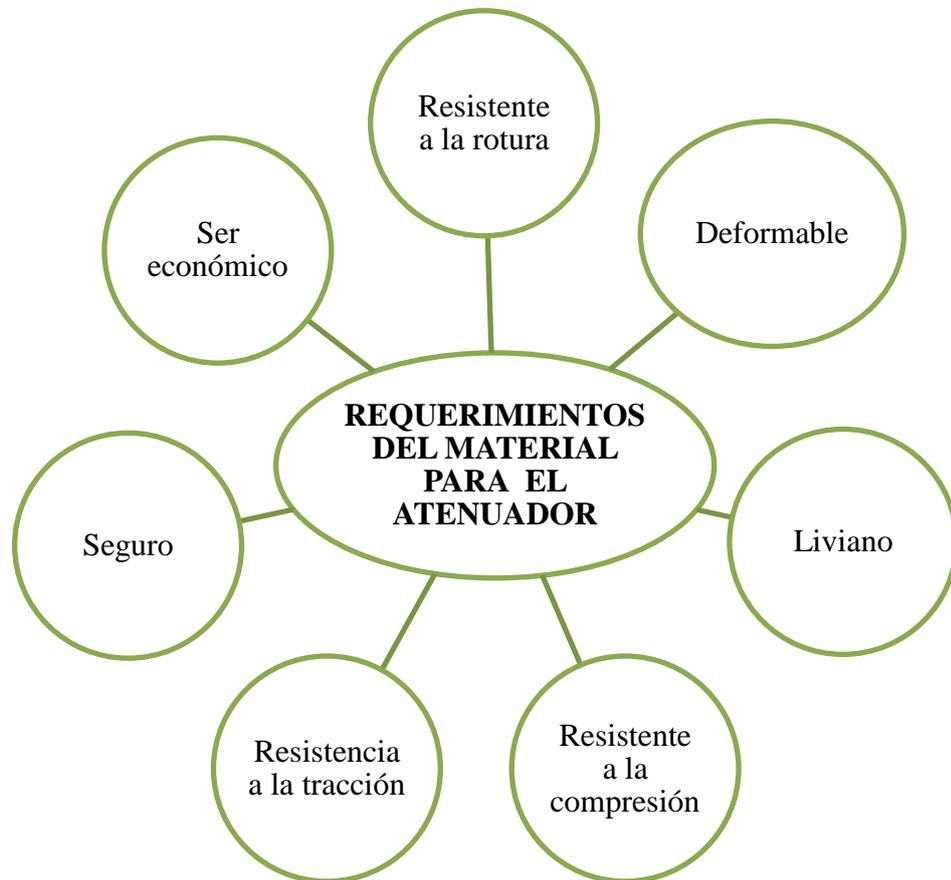


Figura 1. 1. *Requerimientos del material para el atenuador.*

Fuente: *Autores.*

1.3 ANÁLISIS DE MATERIALES

En nuestro medio existen diversos materiales que se pueden utilizar para el desarrollo del atenuador de impacto como el aluminio, la balsa, la fibra de vidrio, el policarbonato, la fibra de carbono, el latón, etc. Los cuales deben ser resistentes en coherencia con los requerimientos y exigencias dadas por la norma de la competición.

Para la elección del material, se realiza en función de algunos parámetros como los descritos en la **figura 1.2**:

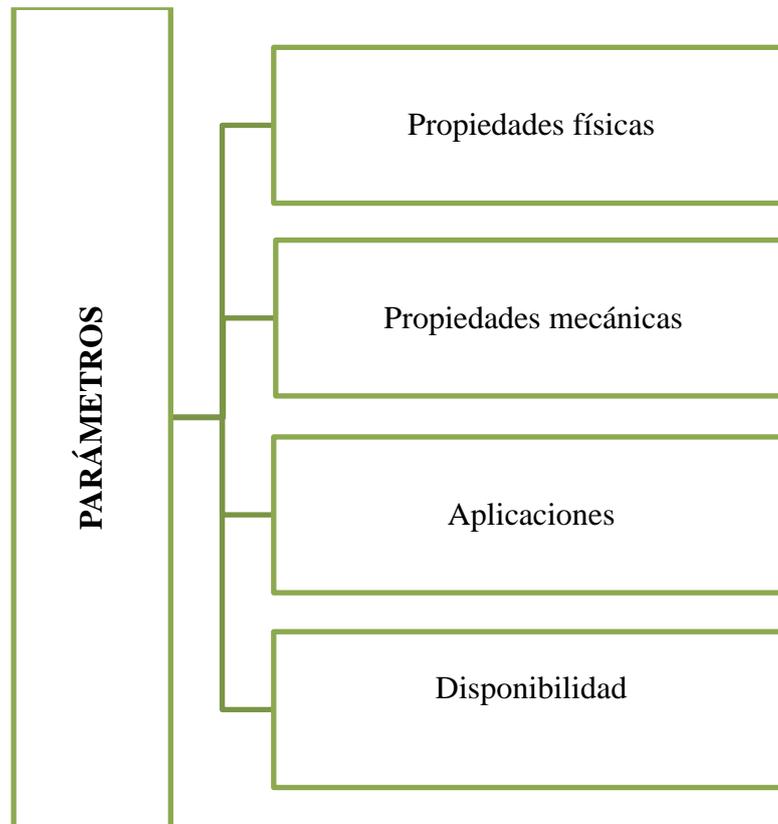


Figura 1. 2.Parámetros de materiales.

Fuente: Autores.

A continuación se presenta algunos de los materiales más apropiados dados sus características y propiedades en forma genérica; para posteriormente realizar consideraciones concretas para su selección.

1.3.1 ALUMINIO

El aluminio es uno de los elementos más extendidos en nuestro planeta, superado en abundancia sólo por el silicio y el oxígeno. El aluminio no se encuentra libre en la naturaleza, pero entra en la composición de casi todas las rocas comunes en forma de oxígeno.¹

¹ Askeland, Donald R. Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 6ta edición. 2011. Pág.540.

1.3.1.1 PROPIEDADES DEL ALUMINIO

1.3.1.2 PROPIEDADES FÍSICAS

De acuerdo a las propiedades físicas que presenta el aluminio se destacan las siguientes en la **figura 1.3**:

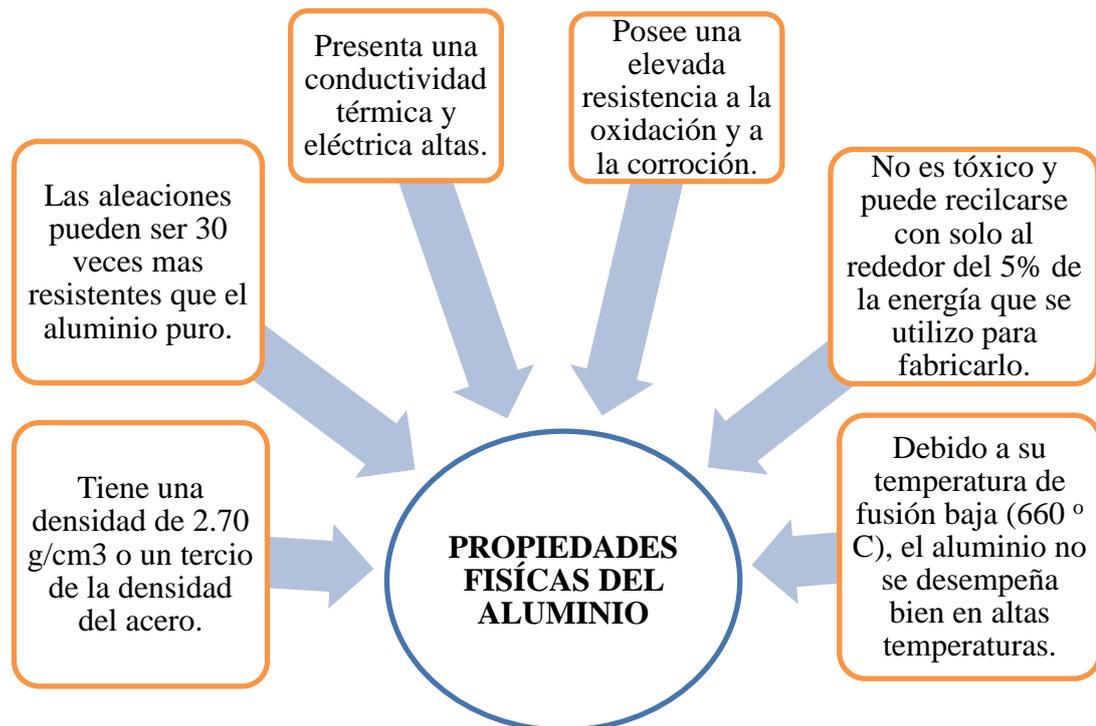


Figura 1. 3. *Propiedades físicas del aluminio.*

Fuente: *Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 6ta edición. 2011.*

En la **tabla 1-1** se detalla los valores de las propiedades físicas del aluminio:

Tabla 1- 1. *Propiedades físicas del aluminio.*

Fuente: *Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 6ta edición. 2011.*

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	VALOR
Módulo de Elasticidad	MPa	69000
Densidad	g/cm ³	2.70
Resistencia a la tracción	MPa	45
Resistencia a la rotura	Kg/mm ²	25
Conductividad térmica	Kcal /h*mc	180

1.3.1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas que posee el aluminio se indican en la **figura 1.4**:



Figura 1. 4. *Propiedades mecánicas del aluminio.*

Fuente: *Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 6ta edición. 2011.*

1.3.2 Balsa

1.3.2.1 Generalidades

La madera balsa es originaria del centro y sur de América. Considerada como madera dura, es entre todas ellas la más blanda y ligera. Dada su alta rigidez, es difícil adaptarla a formas curvas, por lo que se suele emplear en forma de bloques pequeños unidos entre sí por un material de soporte, generalmente un tejido de poco gramaje.¹

1.3.2.2 Propiedades físicas y mecánicas

En la **tabla 1-2** y en la **tabla 1-3** se detalla las propiedades físicas y mecánicas de la madera de balsa:

Tabla 1- 2. *Propiedades físicas de la madera de balsa.*

Fuente: Ashby, Michael F., and David R. Jones. *Materiales para Ingeniería 2: Introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño.* Vol. II. 2009.

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	VALOR
Densidad	gr/cm ³	0.1 – 0.3
Resistencia a la tracción	MPa	23
Resistencia a la compresión	MPa	12
Módulo de elasticidad	MPa	4000

¹ Besednjak, Alejandro. *Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones.* 1ra edición. 2005. Pág.54-55.

Tabla 1- 3. Propiedades mecánicas de la madera de balsa.

Fuente: Castro, Jessenia R. Anatomía de *Ochroma Lagopus* en diferentes edades y periodos seco y lluvioso y el efecto de agentes externos. 2002.

Flexión estática	ELP	150	Kg/cm2
	MOR	243	Kg/cm2
	MOE	35000	Kg/cm2
Compresión paralela	ELP	63	Kg/cm2
	MOR	98	Kg/cm2
	MOE	-----	-----
Compresión perpendicular	ELP	8	Kg/cm2
Dureza	Lados	52	Kg
	Extremos	87	Kg
Cizallamiento		25	Kg/cm2

1.3.2.3 COMPRESIÓN DE LA MADERA DE BALSA

En la **tabla 1-4** se presenta una comparación entre la madera de balsa y otras maderas:

Tabla 1- 4. Compresión de la madera de balsa.

Fuente: Ashby, Michael F., and David R. Jones. *Materiales para Ingeniería 2: Introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño.* Vol. II. 2009.

Madera	Densidad ¹ (Mg m ⁻³)	Módulo de Young ^{1,2} (GPa)		Resistencia ^{1,3} (MPa) al grano		Tenacidad a la fractura ¹ (MPa m ^{1/2})	
		al grano	⊥ al grano	Tracción	Compresión	al grano	⊥ al grano
Balsa	0,1-0,3	4	0,2	23	12	0,05	1,2
Caoba	0,53	13,5	0,8	90	46	0,25	6,3
Abeto Douglas	0,55	16,4	1,1	70	42	0,34	6,2
Pino escocés	0,55	16,3	0,8	89	47	0,35	6,1
Abedúl	0,62	16,3	0,9	-	-	0,56	-
Fresno	0,67	15,8	1,1	116	53	0,61	9,0
Roble	0,69	16,6	1,0	97	52	0,51	4,0
Haya	0,75	16,7	1,5	-	-	0,95	8,9

1.3.2.4 USOS

En la **figura 1.5** se detalla los usos principales de la madera de balsa:



Figura 1. 5. Usos principales de la madera de balsa.

Fuente: Castro, Jessenia R. Anatomía de *Ochroma Lagopus* (Balsa) en diferentes edades y periodos seco y lluvioso y el efecto de agentes externos. 2002.

1.3.3 POLICARBONATO

1.3.3.1 CONCEPTO

El policarbonato (PC) es notable por sus excelentes propiedades mecánicas que incluyen alta tenacidad y buena resistencia a la termo fluencia. Es uno de los mejores termoplásticos por su resistencia al calor; puede usarse a temperaturas cercanas a los 125°C; además es transparente y resistente al fuego.¹

¹ Groover, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. 4ta edición. 2010. Pág.169.

En la **figura 1.6** se detalla las diferentes aplicaciones del policarbonato:

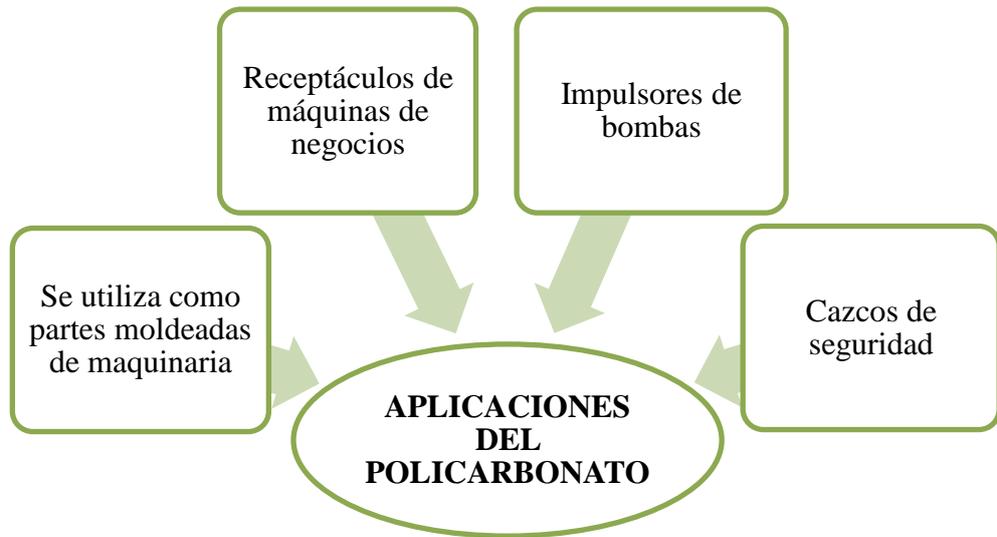


Figura 1. 6. Aplicaciones del policarbonato.

Fuente: Groover, Mikell P. *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. 4ta edición. 2010.*

1.3.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL POLICARBONATO

En la **figura 1.7** se detalla las propiedades mecánicas del policarbonato:



Figura 1. 7. Propiedades del material policarbonato.

Fuente: Groover, Mikell P. *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. 4ta edición. 2010.*

1.3.3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLICARBONATO

Tabla 1- 5. *Propiedades físicas del policarbonato.*

Fuente: *Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 6ta edición. 2011.*

PROPIEDADES MECÁNICAS A 23 °C	UNIDAD	VALORES
Densidad	gr/cm ³	1.2
Módulo de elasticidad	MPa	2760
Alargamiento	%	130
Resistencia a la tensión	MPa	76
Temperatura de fusión	°C	230

1.3.4 MATERIALES COMPUESTOS

1.3.4.1 DEFINICIÓN

Se define como material compuesto todo sistema o combinación de materiales constituidos a partir de la unión (no química, insolubles entre si) de dos o mas componentes, que da lugar a uno nuevo con propiedades características específicas, no siendo estas nuevas propiedades ninguna de las anteriores.¹

1.3.4.2 CARACTERÍSTICAS

En la **figura 1.8** se detalla las características principales de estos materiales:

¹ Groover, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. 4ta edición. 2010. Pág.187.

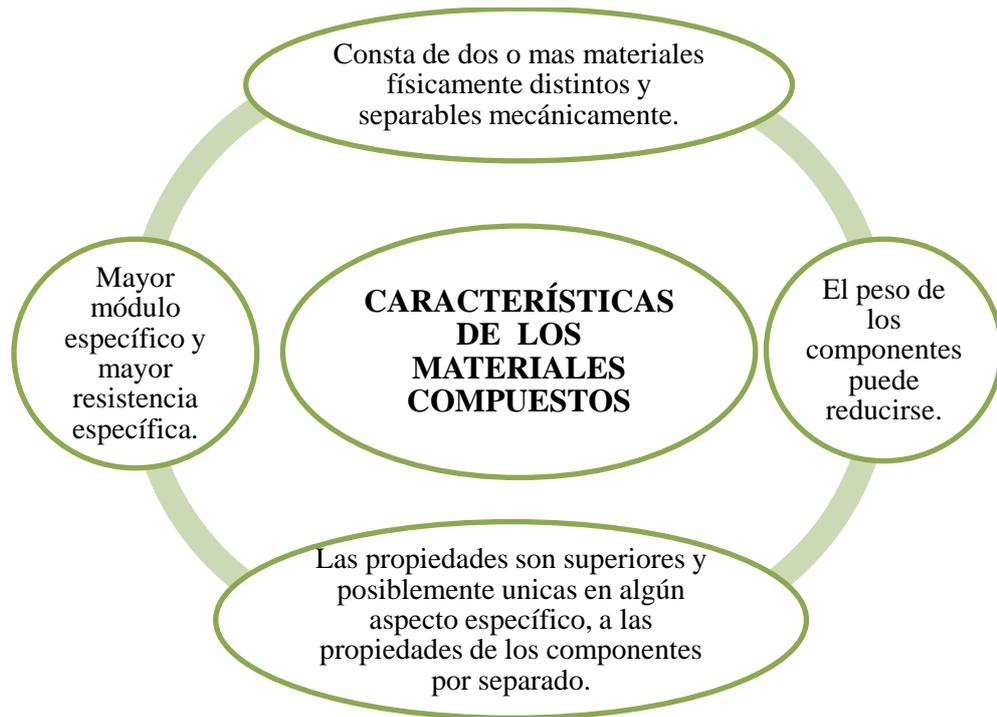


Figura 1. 8. Características de los materiales compuestos.

Fuente: Hull, Derek. *Materiales Compuestos. 1ra edición. 2003.*

1.3.4.3 ESTRUCTURA

En la **figura 1.9** se muestra la estructura de un material compuesto:

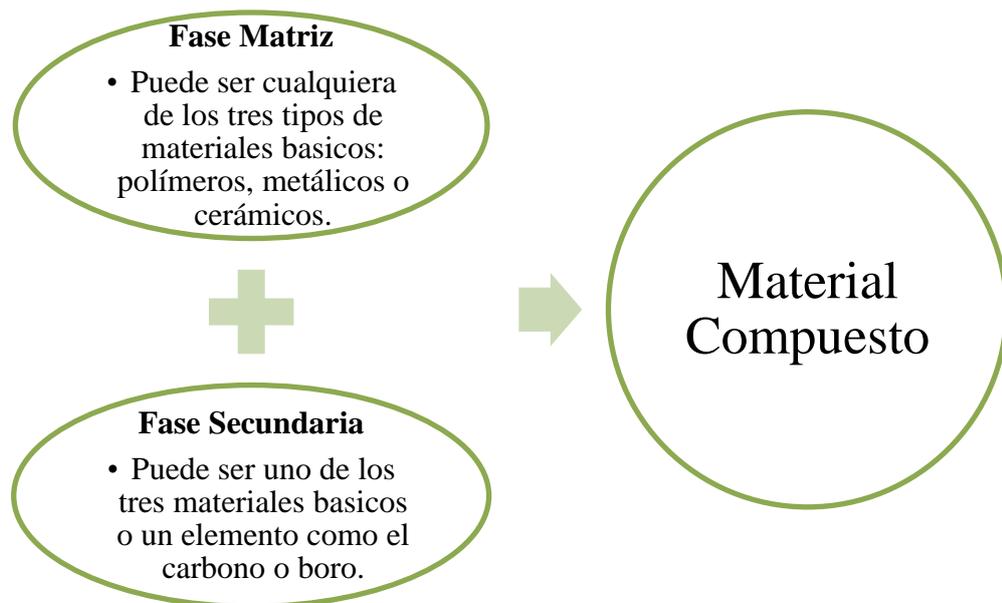


Figura 1. 9. Estructura de un material compuesto

Fuente: Hull, Derek. *Materiales Compuestos. 1ra edición. 2003.*

1.3.4.4 CLASIFICACIÓN

En la **figura 1.10** se detalla los grupos principales de materiales compuestos:

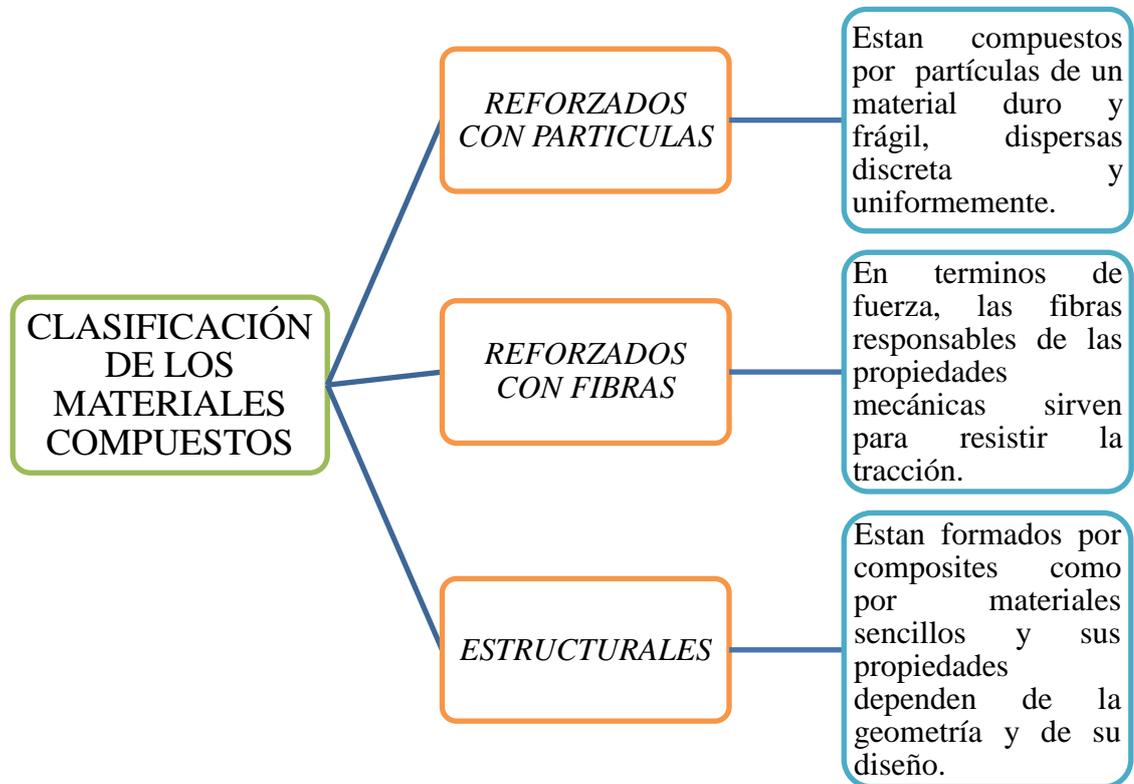


Figura 1. 10. Clasificación de material compuesto.

Fuente: Vélez, Ligia M. *Materiales Industriales: Teoría y Aplicaciones*. 1ra edición. 2008.

1.3.4.5 APLICACIONES

En la **figura 1.11** se muestra las diferentes aplicaciones de estos materiales:

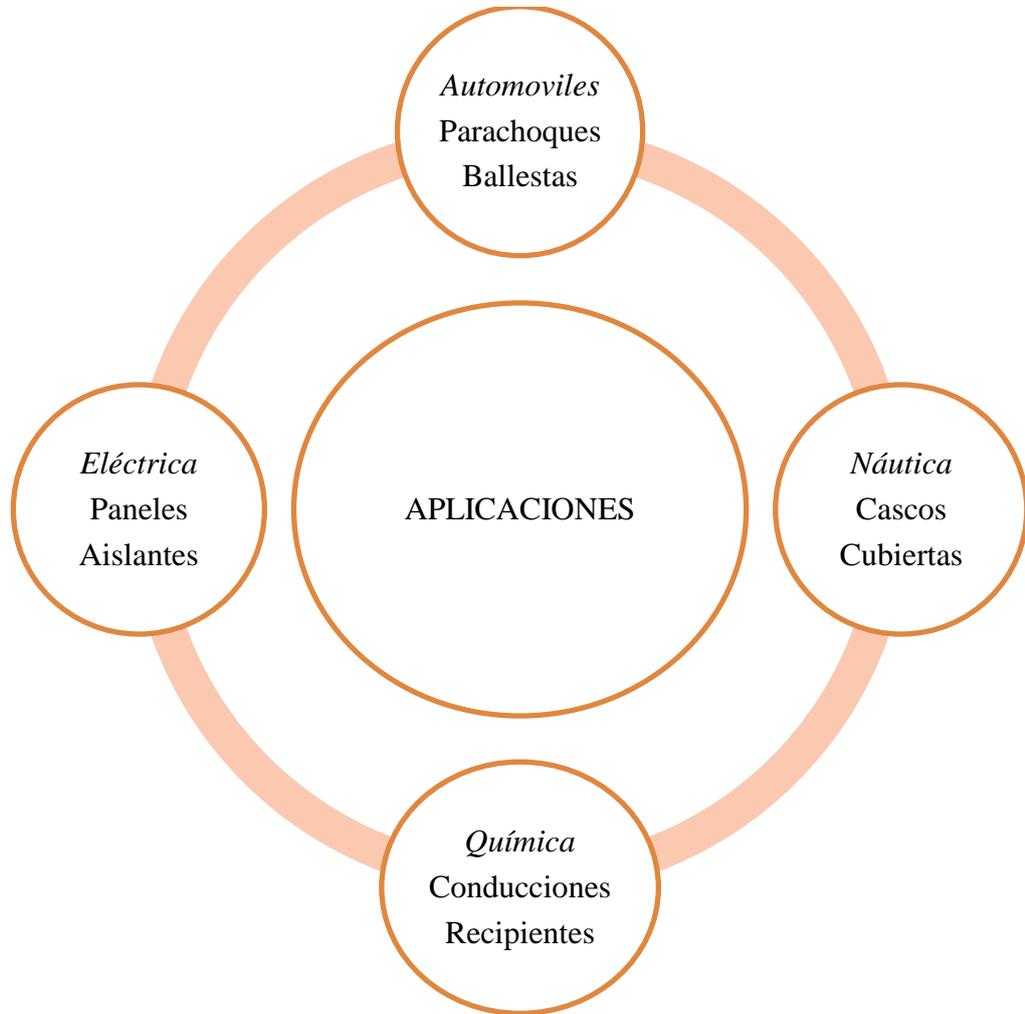


Figura 1. 11. *Aplicación de los Materiales Compuestos.*

Fuente: Hull, Derek. *Materiales Compuestos. 1ra edición. 2003.*

1.3.5 KEVLAR

1.3.5.1 DEFINICIÓN

Es una poliamida aromática llamada poliparafenileno tereftalamida con una estructura química perfectamente regular cuyos anillos aromáticos dan como resultado las moléculas del polímero con las propiedades de una cadena razonablemente rígida.¹

1.3.5.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

En la **figura 1.12** se muestran las principales propiedades mecánicas que posee el Kevlar:

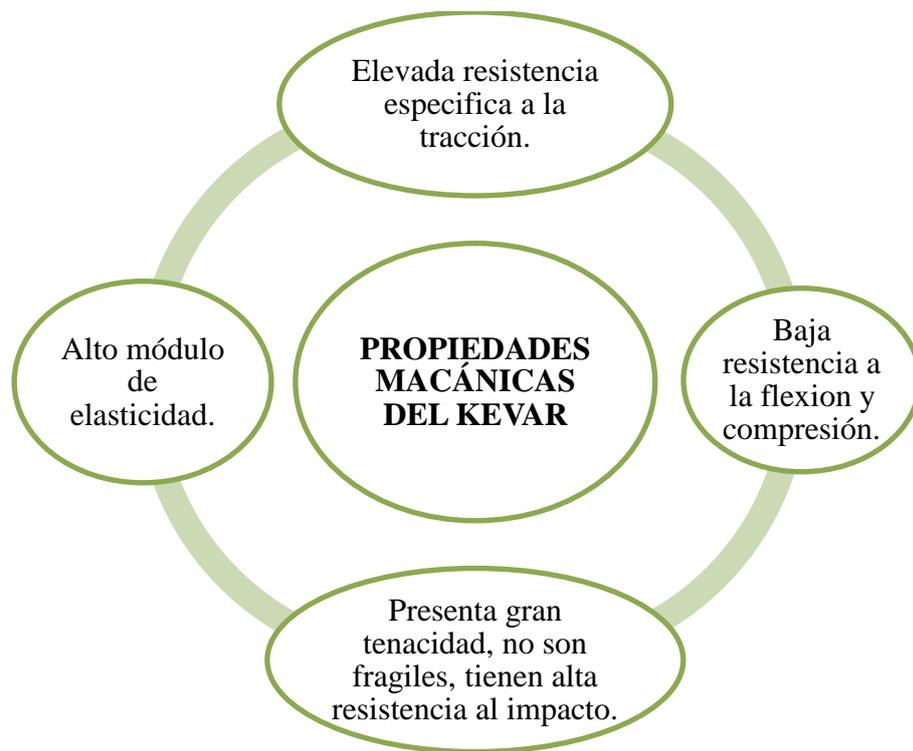


Figura 1. 12. *Propiedades mecánicas del kevlar.*

Fuente: Miravete, Antonio. *Materiales Compuestos. Vol. I. 2007.*

¹ Miravete, Antonio. *Materiales Compuestos. Vol. I. 2007. Pag. 15.*

1.3.5.3 TIPOS DE KEVLAR

En la **figura 1.13** se muestran los dos tipos de kevlar que se puede encontrar:

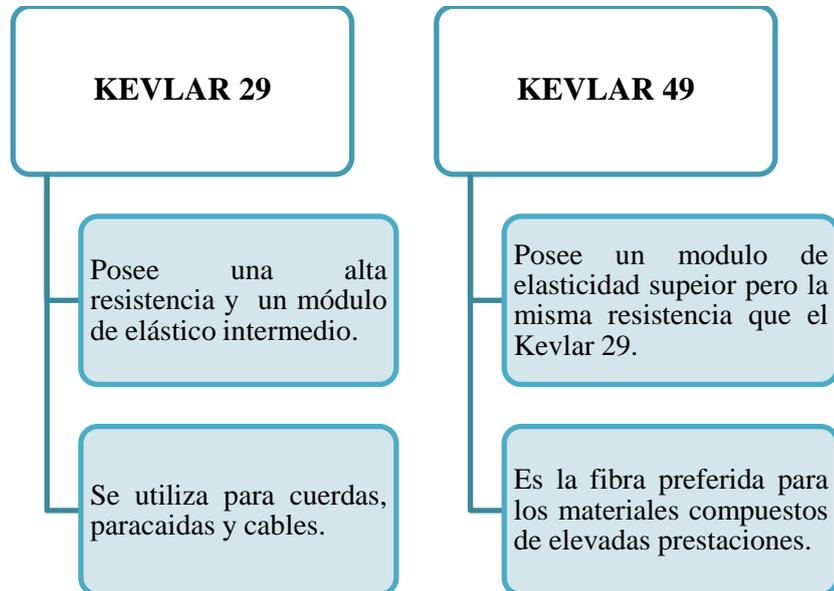


Figura 1. 13. *Propiedades mecánicas del kevlar.*

Fuente: *Miravete, Antonio. Materiales Compuestos. Vol. I. 2007.*

1.3.5.4 PROPIEDADES FÍSICAS DEL KEVLAR

En la **tabla 1-6** se muestran las propiedades físicas que presenta el Kevlar:

Tabla 1- 6. *Propiedades físicas del kevlar.*

Fuente: *Miravete, Antonio. Materiales Compuestos. Vol. I. 2007.*

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	KEVLAR 29	KEVLAR 49
Densidad	gr/cm ³	1.44	1.45
Resistencia a la tracción	GPa	1.92	2.94 – 3.6
Módulo de elasticidad	GPa	60	128
Módulo específico	-----	41	88
Diámetro de hilo	µm	12	12

1.3.5.5 APLICACIONES DEL KEVLAR

En la **figura 1.14** se muestran las distintas aplicaciones:

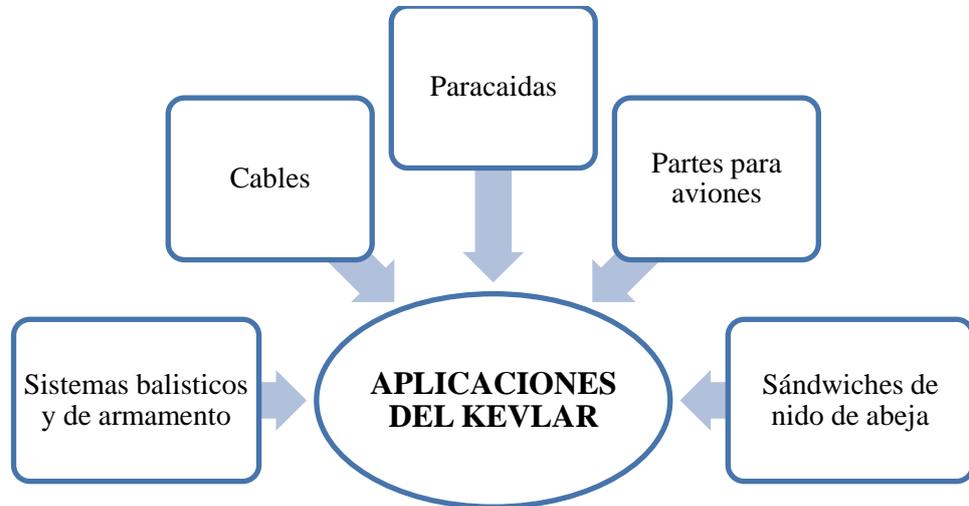


Figura 1. 14. *Aplicaciones del kevlar.*

Fuente: *Miravete, Antonio. Materiales Compuestos. Vol. I. 2007.*

1.3.6 FIBRA DE VIDRIO

1.3.6.1 INTRODUCCIÓN

Las fibras de vidrio están constituidas fundamentalmente por sílice, que se combina con diferentes óxidos (Alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), que en función de sus respectivos porcentajes permiten modificar las características de la fibra resultante.¹

1.3.6.2 TIPOS DE FIBRA DE VIDRIO

Existen varios tipos de fibras de vidrio que podemos encontrar en el medio que van acuerdo a las propiedades que presentan cada una de ellas las mismas que se presentan en la **figura 1.15** a continuación:

¹ Besednjak, Alejandro. *Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones*. 1ra edición. 2005. Pág.40.

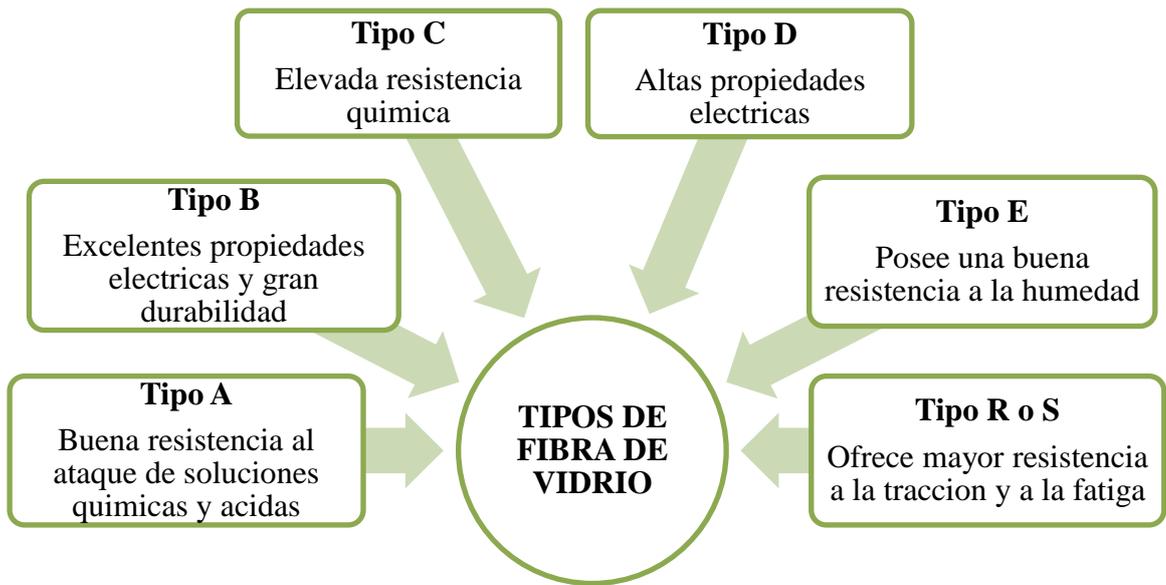


Figura 1. 15. Tipos de fibra de vidrio.

Fuente: Besednjak, Alejandro. *Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones. 1ra edición. 2005.*

1.3.6.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE VIDRIO

En la **figura 1.16** se muestran las principales propiedades mecánicas de la fibra de vidrio:

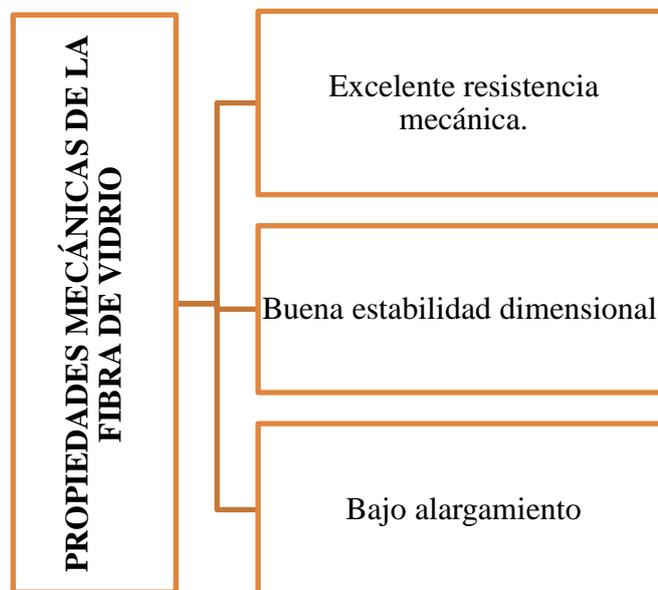


Figura 1. 16. Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio.

Fuente: Besednjak, Alejandro. *Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones. 1ra edición. 2005.*

1.3.6.4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FIBRA DE VIDRIO

En la siguiente tabla se especifican las principales propiedades físicas que presenta la fibra de vidrio:

Tabla 1- 7. *Propiedades Físicas de la fibra de vidrio.*

Fuente: *Besednjak, Alejandro. Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones. 1ra edición. 2005.*

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	TIPO E	TIPO R/S	TIPO C
Densidad	gr / cm ³	2.6	2.5 – 2.53	2.45
Módulo de elasticidad	GPa	72 – 73	85 – 87	71
Resistencia a la tracción	GPa	3.4 – 3.5	3.4 – 4.6	3.1
Alargamiento a la rotura	%	3.3 – 4.8	4.2 – 5.4	3.5
Diámetro del filamento	μm	8 – 20	10	20

1.3.6.5 APLICACIONES DE LA FIBRA DE VIDRIO

La fibra de vidrio debido a sus características que presenta se la utiliza en varios campos industriales tales como mostraremos a continuación en la **figura 1.17**:

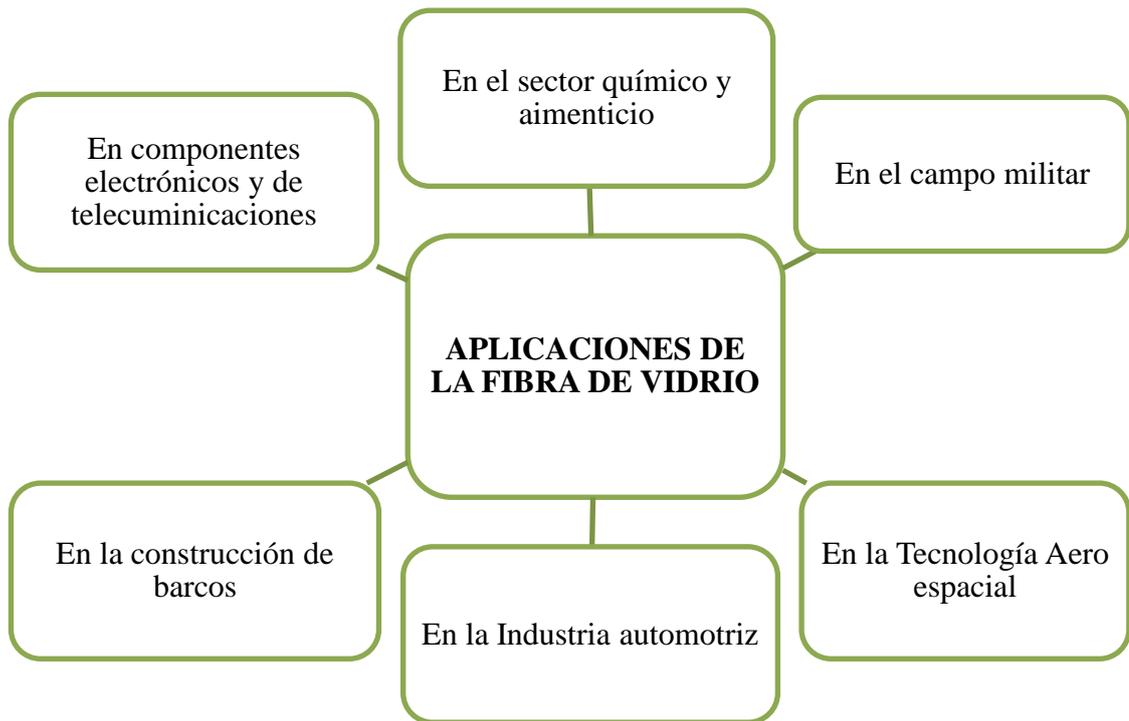


Figura 1. 17. *Aplicaciones de la fibra de vidrio.*

Fuente: *Besednjak, Alejandro. Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones. 1ra edición. 2005.*

1.3.7 FIBRA DE CARBONO

1.3.7.1 INTRODUCCIÓN

Las fibras de carbono son sólidos carbonosos con forma de filamentos, o una trenza de estos, y con un contenido mínimo de carbono del 92% en peso. Las fibras de carbono se obtienen por carbonización (1200 – 1400 ° C) de fibras orgánicas naturales o sintéticas.¹

¹ Menéndez, Ángel. El carbón en la Vida Cotidiana: De la pintura rupestre al ascensor espacial. 1ra edición. 2012. Pág. 93.

1.3.7.2 TIPOS DE FIBRA DE CARBONO

Existen varios tipos de fibra de carbono que se distinguen entre ellas por la temperatura de tratamiento que se les proporciona, en la **figura 1.18** se exponen los tipos existentes:

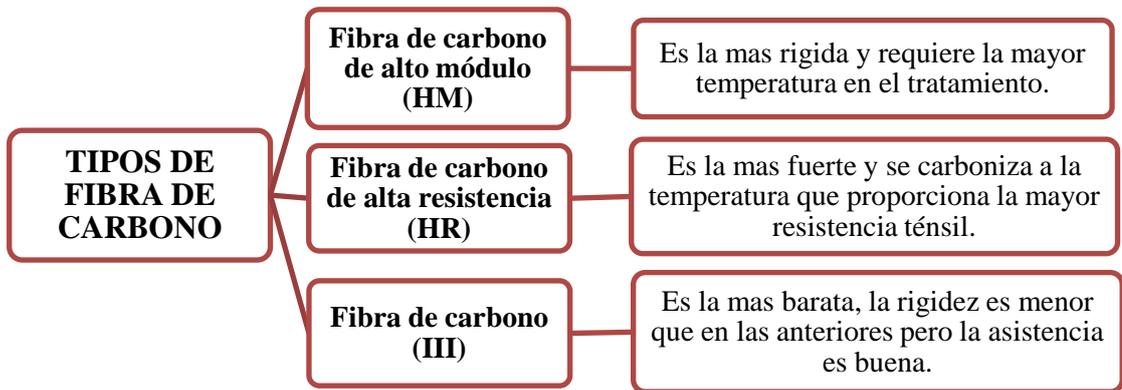


Figura 1. 18. Tipos de fibras de carbono.

Fuente: Miravete, Antonio. *Materiales Compuestos. Vol. I. 2007.*

1.3.7.3 CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA DE CARBONO

En la **figura 1.19** se detalla las principales características que presenta la fibra de carbono:

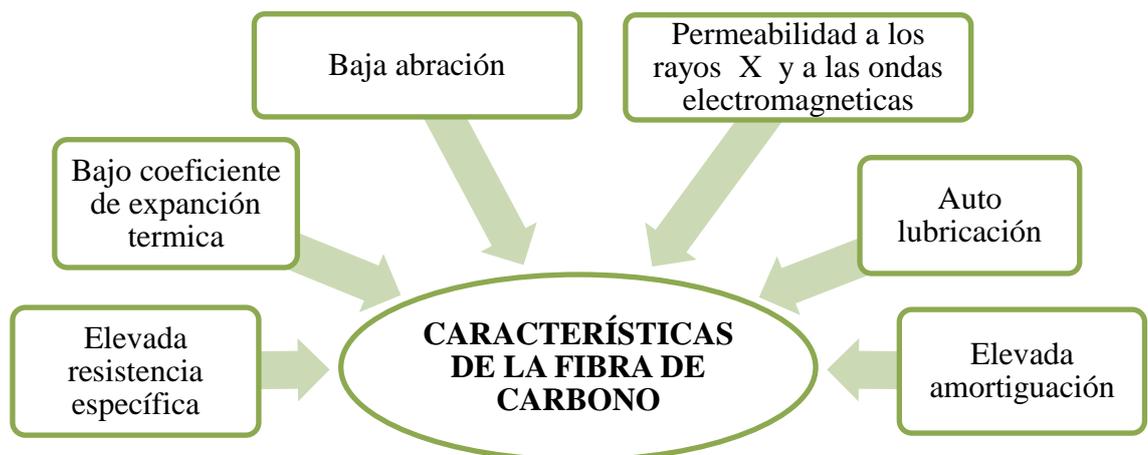


Figura 1. 19. Características de la fibra de carbono.

Fuente: Miravete, Antonio. *Materiales Compuestos. Vol. I. 2007.*

1.3.7.4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FIBRA DE CARBONO

En la **tabla 1-8** se detalla las principales características físicas de la fibra de carbono:

Tabla 1- 8. *Propiedades físicas de la fibra de carbono.*

Fuente: *Miravete, Antonio. Materiales Compuestos. Vol. I. 2007.*

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	ALTA RESISTENCIA HR	ALTO MODULO HM	III
Diámetro	µm	8	7	7-8
Densidad	g/cm ³	1.74 – 1.76	1.81 – 1.87	1.82
Módulo de elasticidad	GPa	230	390	290
Resistencia a la tracción	GPa	2.6 – 5	2.1 – 2.7	3.1
Alargamiento a la rotura	%	2	0.7	1.1

1.3.7.5 APLICACIONES DE LA FIBRA DE CARBONO

En la **figura 1.20** se muestran los diferentes campos de aplicación de la fibra de carbono:

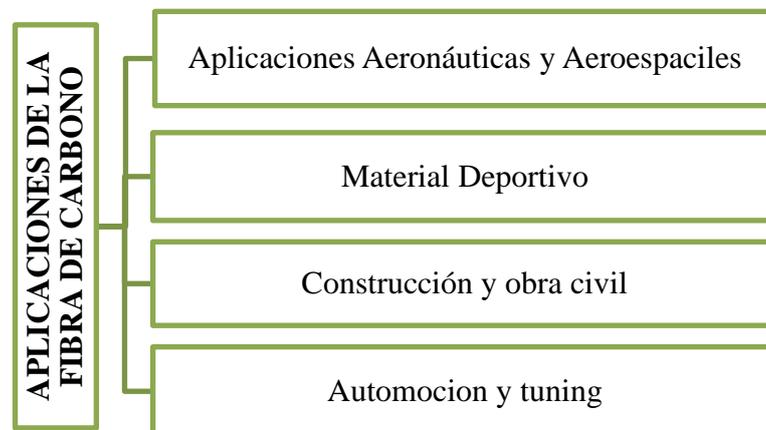


Figura 1. 20. *Aplicaciones de la fibra de carbono.*

Fuente: *Menéndez, Ángel. El carbón en la Vida Cotidiana: De la pintura rupestre al ascensor espacial. Ira edición.2012.*

1.3.8 POLIURETANO

1.3.8.1 INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de los poliuretanos en gran medida dependen de su estructura segmentada separada en dominios “flexibles” y “rígidos” y de la incompatibilidad termodinámica entre estos. En los poliuretanos convencionales el segmento flexible generalmente es un poliéster o poliéter.¹

1.3.7.1 CARACTERÍSTICAS DEL POLIURETANO

En la **figura 1.21** se dan a conocer las principales características que el poliuretano posee:

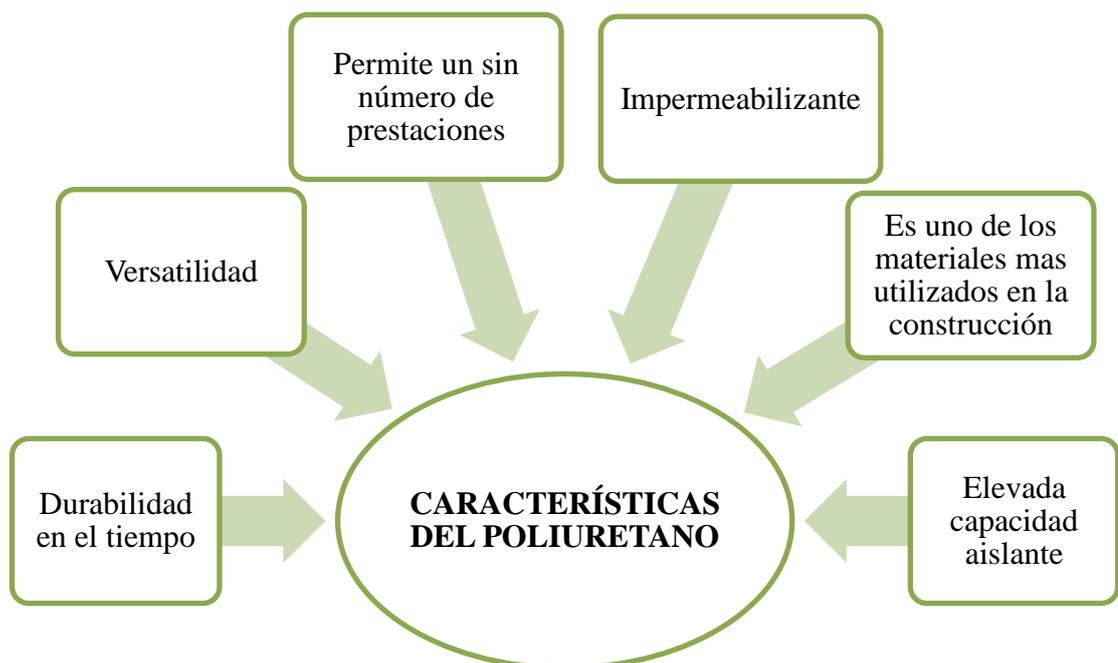


Figura 1. 21. *Propiedades del poliuretano.*

Fuente: Castells, Xavier E., and Santiago B. Alsina. *Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad.* 1ra edición. 2012.

¹Giménez, Enrique, Luis Cabedo, and José Lagarón. *Nuevos Retos en Materiales Poliméricos.* 1ra edición. 2008. Pág. 53.

1.3.8.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLIURETANO

En la **tabla 1-9** se exponen las principales propiedades físicas que el poliuretano presenta:

Tabla 1- 9. *Propiedades físicas del Poliuretano.*

Fuente: Groover, Mikell P. *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. 4ta edición. 2010.*

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	VALOR
Densidad	g/cm ³	0.03
Módulo de elasticidad	MPa	10
Resistencia a la tensión	MPa	60
Elongación	%	700

1.3.8.3 APLICACIONES DEL POLIURETANO

En la **figura 1.22** se dan a conocer las distintas aplicaciones del poliuretano:

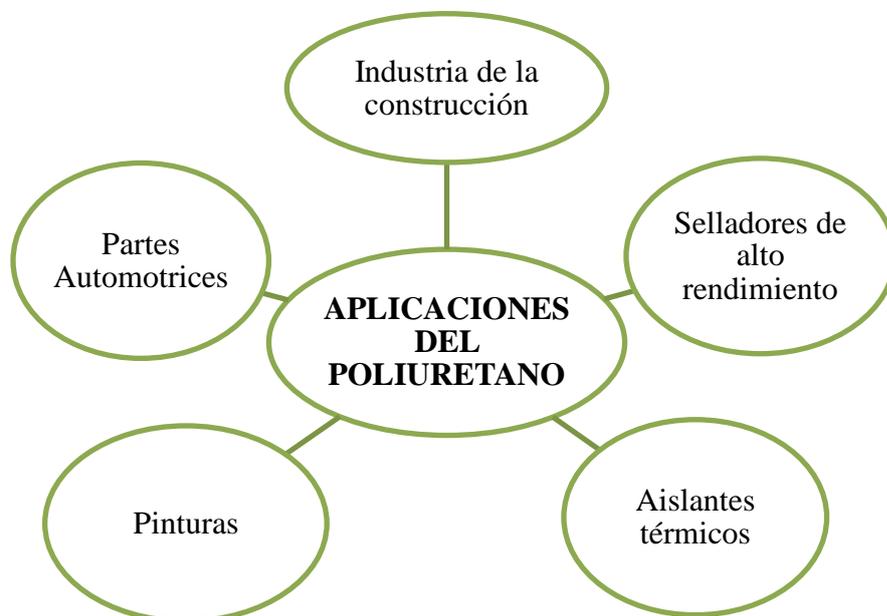


Figura 1. 22. *Propiedades del poliuretano.*

Fuente: Vélez, Ligia M. *Materiales Industriales: Teoría y Aplicaciones. 1ra edición. 2008.*

1.3.9 POLIESTIRENO EXPANDIDO

1.3.9.1 INTRODUCCIÓN

El estireno puede transformarse, mediante polimerización, en bolitas blancas de poliestireno. Estas bolitas pueden expandirse a continuación para formar una espuma conocida como poliestireno expandido.¹

1.3.9.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO

En la **tabla 1-10** se presenta los valores de las propiedades físicas del poliestireno expandido:

Tabla 1- 10. *Propiedades físicas del poliestireno expandido.*

Fuente: *Shawyer, Michael, and Avilio F. Medina. El uso de hielo en pequeñas embarcaciones de pesca. 1ra edición. 2005.*

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	VALOR
Densidad	g/cm ³	0.064
Resistencia a la tracción	MPa	0,62
Resistencia a la compresión	MPa	0.517
Resistencia al cortante	MPa	0,344
Modulo de Elasticidad	MPa	10.8

¹ Shawyer, Michael, and Avilio F. Medina. El uso de hielo en pequeñas embarcaciones de pesca. 1ra edición. 2005. Pág. 66.

1.3.9.3 APLICACIONES DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO

En la **figura 1.23** se dan a conocer las distintas aplicaciones del poliestireno expandido:

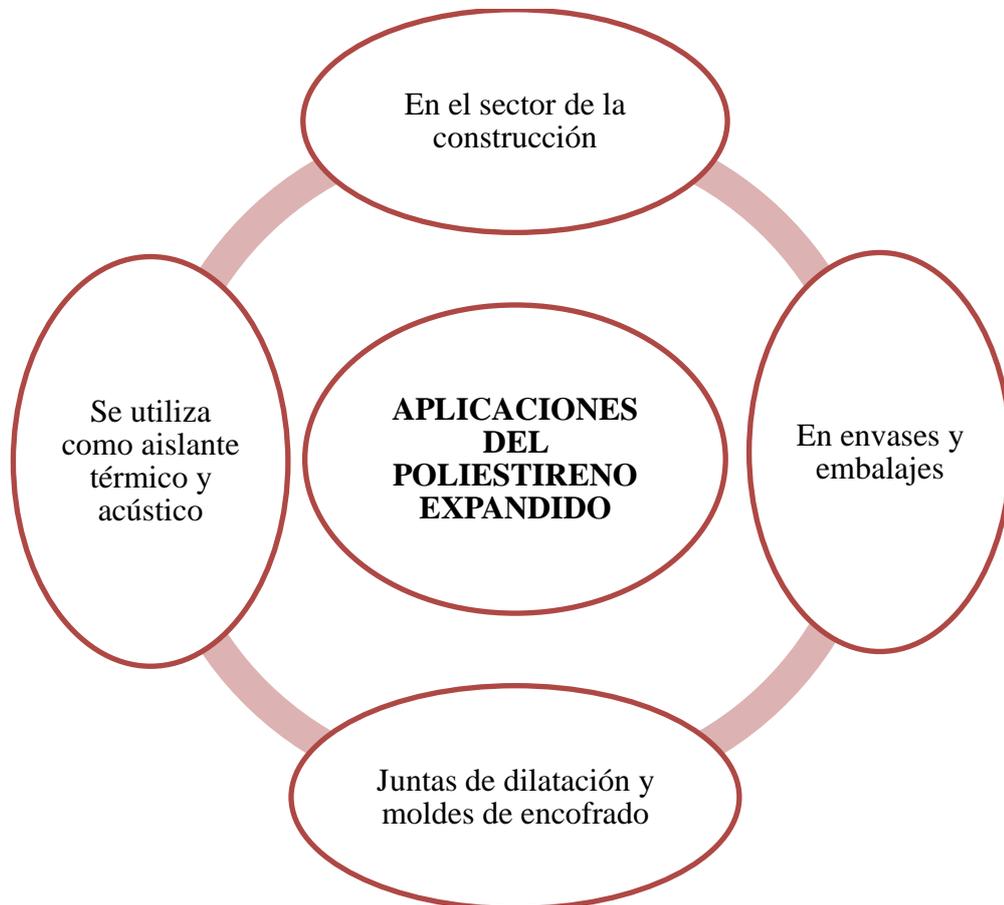


Figura 1. 23. *Aplicaciones del Poliestireno Expandido.*

Fuente: *Castells, Xavier E., and Santiago B. Alsina. Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad. 1ra edición. 2012.*

1.4 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES

A continuación se detalla algunas propiedades relevantes de los materiales que son de importancia para la seleccionar el material más adecuado para la construcción del atenuador.

Tabla 1- 11. Comparación de la densidad de los materiales.

Fuente: Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 6ta edición. 2011.

COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS MATERIALES	
MATERIALES	VALOR (gr/cm³)
Aluminio	2,7
Balsa	0,17
Policarbonato	1,2
Fibra de vidrio	2,5
Fibra de carbono	1,76
Poliuretano	0,03
Kevlar	1,44
Poliestireno expandido	0,064

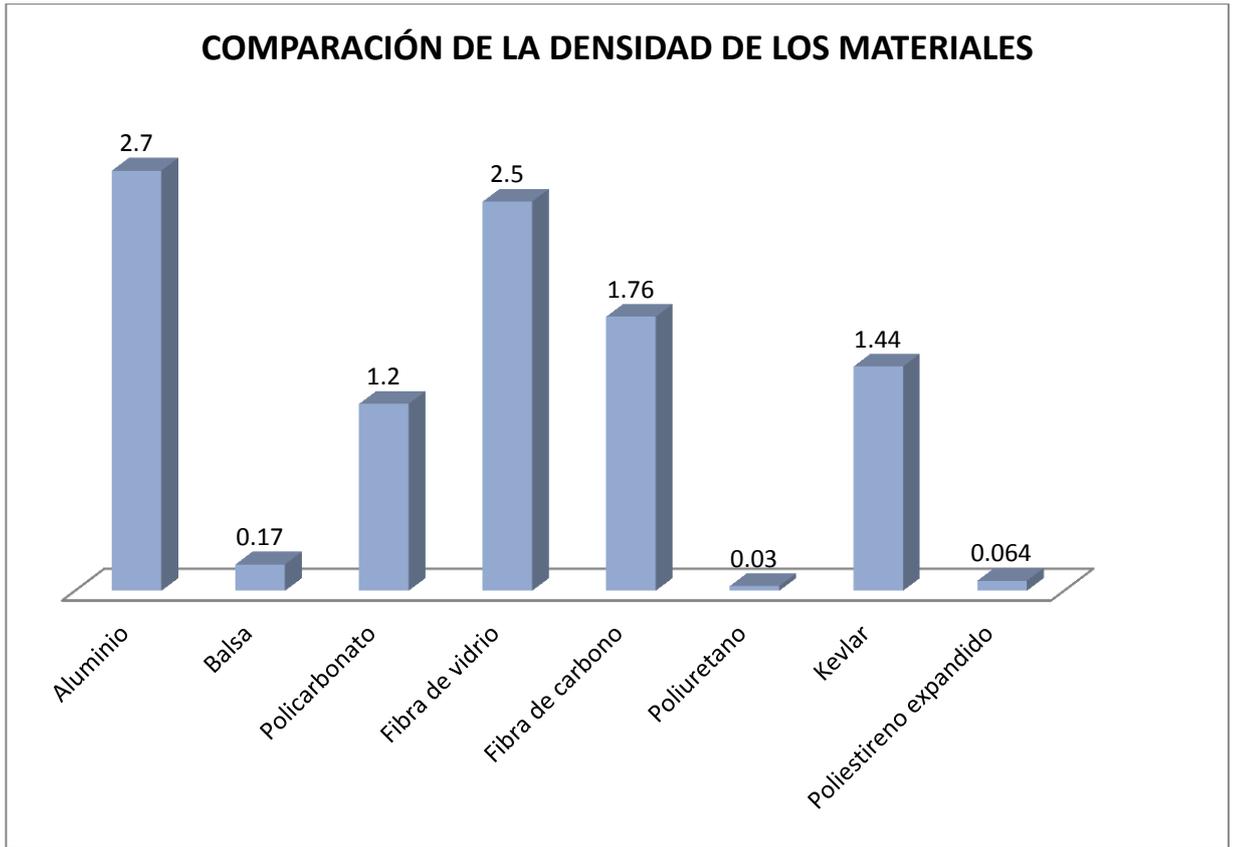


Figura 1. 24. Comparación de la densidad de los materiales.

Fuente: Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 6ta edición. 2011.

Tabla 1- 12. Comparación de la resistencia a la tracción de los materiales.

Fuente: Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 6ta edición. 2011.

MATERIALES	VALOR (MPa)
Aluminio	45
Balsa	2,54
Policarbonato	76
Fibra de Vidrio	3500
Fibra de Carbono	2700
Poliuretano	60
Kevlar	1920
Poliestireno Expandido	0,62

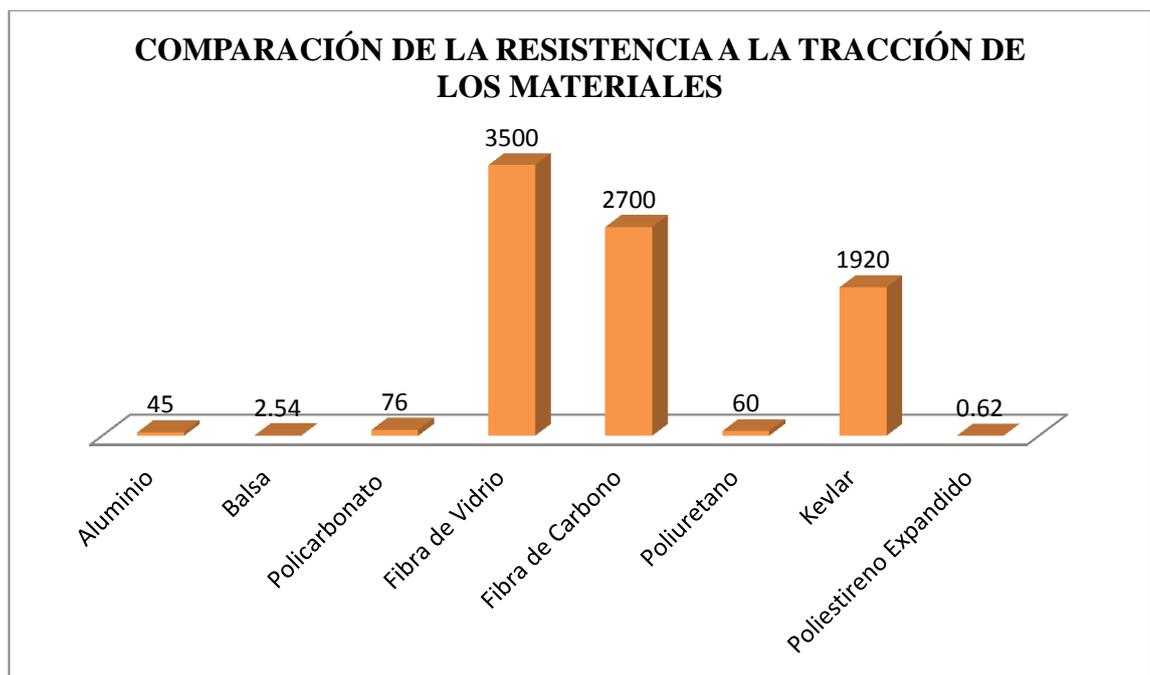


Figura 1. 25. Comparación de la resistencia a la tracción de los materiales.

Fuente: Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 6ta edición. 2011.

Tabla 1- 13. Comparación del módulo de elasticidad de los materiales.

Fuente: Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 6ta edición. 2011.

COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES	
MATERIALES	VALOR (MPa)
Aluminio	69000
Balsa	3432,45
Policarbonato	2760
Fibra de Vidrio	85000
Fibra de Carbono	390000
Poliuretano	10
Kevlar	60000
Poliestireno Expandido	10,8

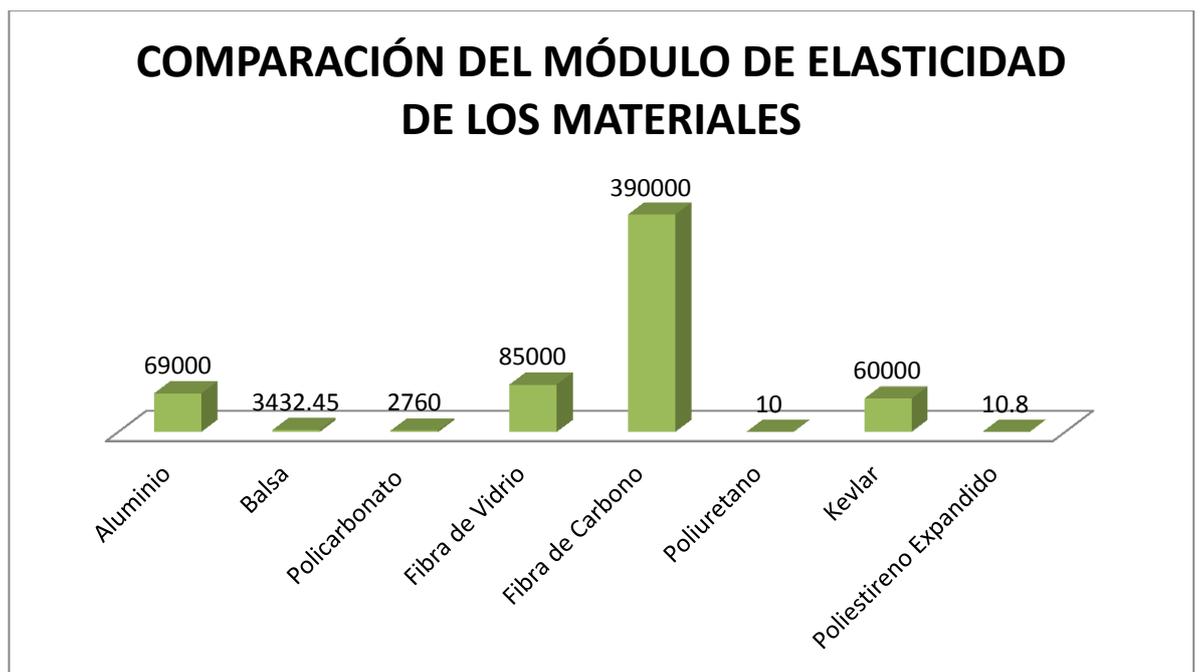


Figura 1. 26. Comparación del módulo de elasticidad de los materiales.

Fuente: Askeland, Donald R., Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 6ta edición. 2011.

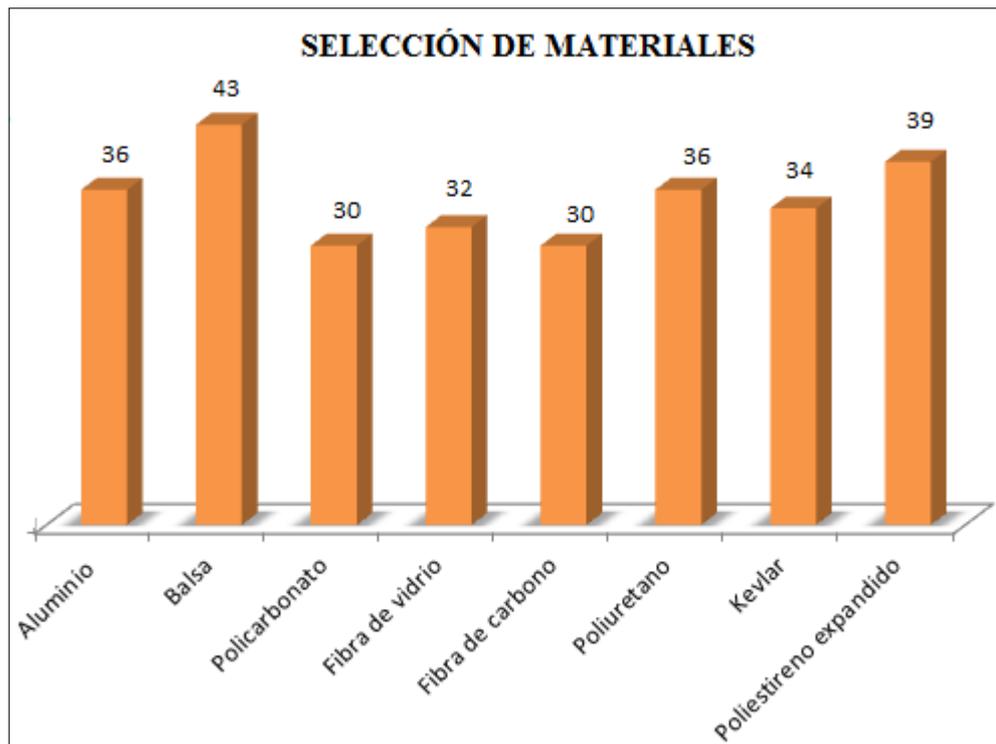


Figura 1. 27. Resultados de priorización de los materiales.

Fuente: Autores.

1.5 TABLA DE PRIORIZACIÓN PARA SELECCIÓN DE MATERIALES

En la **tabla1-14** se detalla un análisis de priorización de los materiales expuestos anteriormente con los requerimientos necesarios para el diseño y construcción del atenuador de impacto, para luego finalmente seleccionar el más adecuado. La valoración está definida de la siguiente manera:

5: Excelente; 4: Muy Bueno; 3: Bueno; 2: Regular; 1: Malo

Tabla 1- 14. Priorización de los materiales.

Fuente: Autores

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	ALUMINIO					BALSA					POLICARBONATO					FIBRA DE VIDRIO					POLIESTIRENO EXPANDIDO					FIBRA DE CARBONO					POLIURETANO					KEVLAR									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
DUREZA			x							x			x					x					x					x					x							x					x
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN			x							x			x				x								x	x									x					x					
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				x						x		x						x							x	x									x					x					
DENSIDAD					x					x			x					x							x			x							x					x					
PESO	x									x					x					x					x					x					x					x					
ELASTICIDAD				x				x				x						x			x									x	x							x							
DISPONIBILIDAD					x					x					x			x							x					x			x					x							
FIABILIDAD			x							x					x					x					x					x					x					x					
MAQUINABLE				x						x					x					x					x					x					x			x							
COSTO				x						x	x							x							x	x						x					x								
SUMATORIA TOTAL	36					43					30					32					39					30					36					34									

1.6 SELECCIÓN DEL MATERIAL

Al concluir el análisis de los materiales propuestos en el desarrollo del capítulo y tomando en cuenta los requerimientos que debe poseer el atenuador de impacto se observa que la balsa obtiene un puntaje de 43 puntos, el aluminio 36 y el poliestireno expandido un puntaje de 39 por lo que son los materiales más adecuados por presentar las mejores características mecánicas y físicas. Hay que mencionar que al combinar estos dos tipos de materiales y en un arreglo estructural estos pasan a mejorar sus características mecánicas y el rendimiento del atenuador.

Además hay que tomar en cuenta que estos tres materiales son favorecidos por su disponibilidad de adquisición en el medio y su bajo costo; por ende para el desarrollo del diseño y construcción del atenuador se utiliza estos materiales con sus diferentes estructuras o combinaciones.

Finalmente seleccionado el material a utilizar se procede con el diseño del atenuador teniendo en cuenta los valores obtenidos por cada uno de ellos dentro la priorización realizada anteriormente.

CAPÍTULO II

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ATENUADOR DE IMPACTO PARA EL MONOPLAZA

2.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se realizará el diseño y construcción del atenuador de impacto para un monoplaza tipo formula, el mismo que debe cumplir con los requisitos planteados por el ente organizador de tal manera se alcancen los mejores resultados, por tal motivo es primordial lograr una relación optima entre peso, fiabilidad, seguridad y economía buscando así obtener la mayor eficacia del atenuador.

Para la elaboración del diseño se hace primordial la utilización de software SOLIDWORK y ABAQUS (versión estudiantil), los mismos que sirven para obtener resultados del análisis tanto estático como dinámico.

Luego del análisis de los diseños propuestos y la selección de los más adecuados se construyen y se realiza las pruebas dinámicas reales, con el fin de comprobar su comportamiento frente a un impacto.

2.2. CONCEPTOS GENERALES

A continuación se detalla algunos conceptos generales que se requieren para el análisis y simulación del atenuador de impacto. Así tenemos:

- **Densidad:**¹ Masa por unidad de volumen de un material, que suele expresarse en gr/cm^3 o en lb/pulg^3 .

¹ Donald R. Askeland y Pradeep P. Ciencia e Ingeniería de los Materiales.4ta edición.2004 Pág. 25.

- **Impacto:** Es el choque entre dos cuerpos que ocurre en un intervalo muy pequeño y durante el cual los dos cuerpos ejercen fuerzas relativamente grandes entre sí.¹
- **Fuerza Normal:** Esta fuerza actúa perpendicularmente al área. Esta se desarrolla siempre que las fuerzas externas tienden a empujar o a jalar sobre los dos segmentos del cuerpo.²
- **Fuerza Cortante:** La fuerza cortante reside en el plano del área y se desarrolla cuando las cargas externas tienden a ocasionar que los dos segmentos del cuerpo resbalen uno sobre el otro.
- **Momento Torsionante:** Este efecto se desarrolla cuando las cargas externas tienden a torcer un segmento del cuerpo con respecto al otro.
- **Momento Flexionante:** El momento flexionante es causado por las cargas externas que tienden a flexionar el cuerpo respecto a un eje que se encuentra dentro del plano del área.³
- **Gravedad:** La tierra ejerce una atracción sobre todos los cuerpos próximos a su superficie, atracción que recibe el nombre de gravedad.
- **Aceleración:** La aceleración de un móvil se define como el cambio de velocidad del mismo por unidad de tiempo.
- **Velocidad:** La velocidad de un cuerpo es igual a la distancia recorrida en la unidad de tiempo.⁴

2.3. MÉTODOS DE CÁLCULO

Para realizar el análisis de los diferentes atenuadores de impacto, es importante interpretar el método de cálculo de elementos finitos, ya que el software abaqus versión estudiantil, está basado en dicho método para obtener toda la información necesaria del comportamiento de los atenuadores.

En la figura 2.1 se da a conocer en que consiste el método de elementos finitos:

¹ Beer Johnston Cornwell. Mecánica Vectorial para ingenieros: Dinámica. 9na Edición.2006 Pág. 825.

² Beer Johnston Cornwell. Mecánica Vectorial para ingenieros: Dinámica. 9na Edición.2006 Pág. 825.

³ Hibbeler Russel C. Mecánica de Materiales. 6ta edición.2006. Pág. 8.

⁴ Autor: Alonso Rojo- Física, mecánica y termodinámica págs. 39, 56, 34.

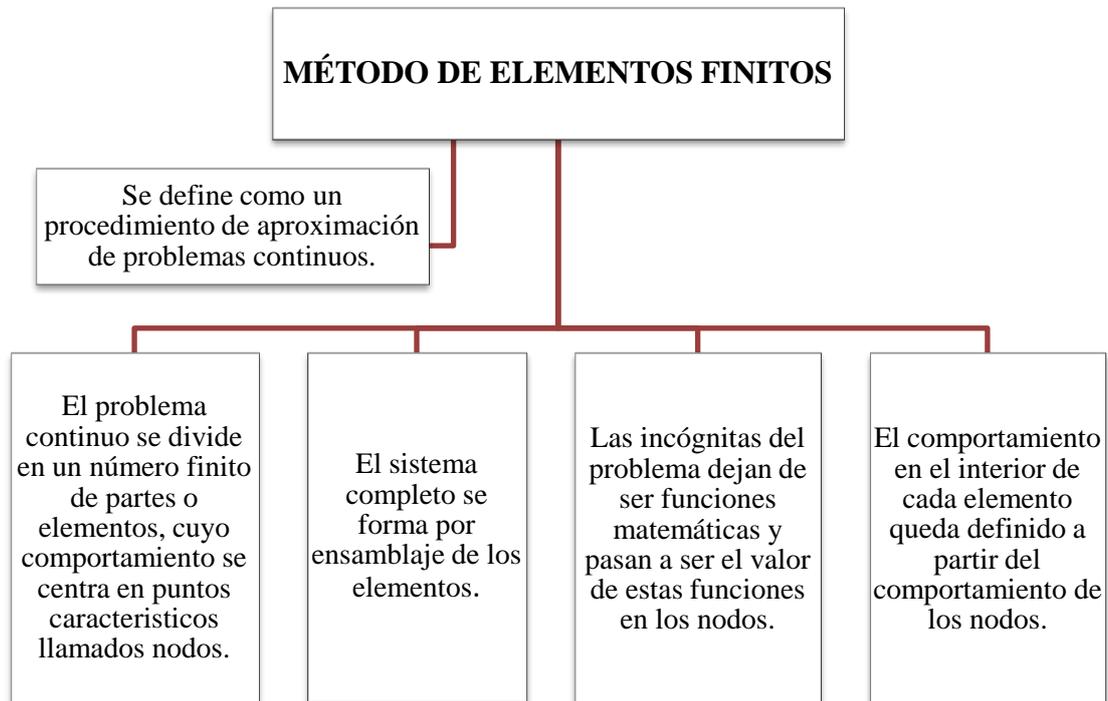


Figura 2. 1. Método de elementos finitos.

Fuente: Miguel Cerrolaza. *El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencia aplicadas: teoría y programa.* 2007.

2.4. NORMA FORMULA STUDENT 2012 PARA ATENUADOR DE IMPACTO

2.4.1. CARACTERÍSTICAS DEL ATENUADOR

Según la normativa dada por la competencia Formula Student 2012, el atenuador de impacto debe tener las siguientes características indicadas en la **figura 2.2:**

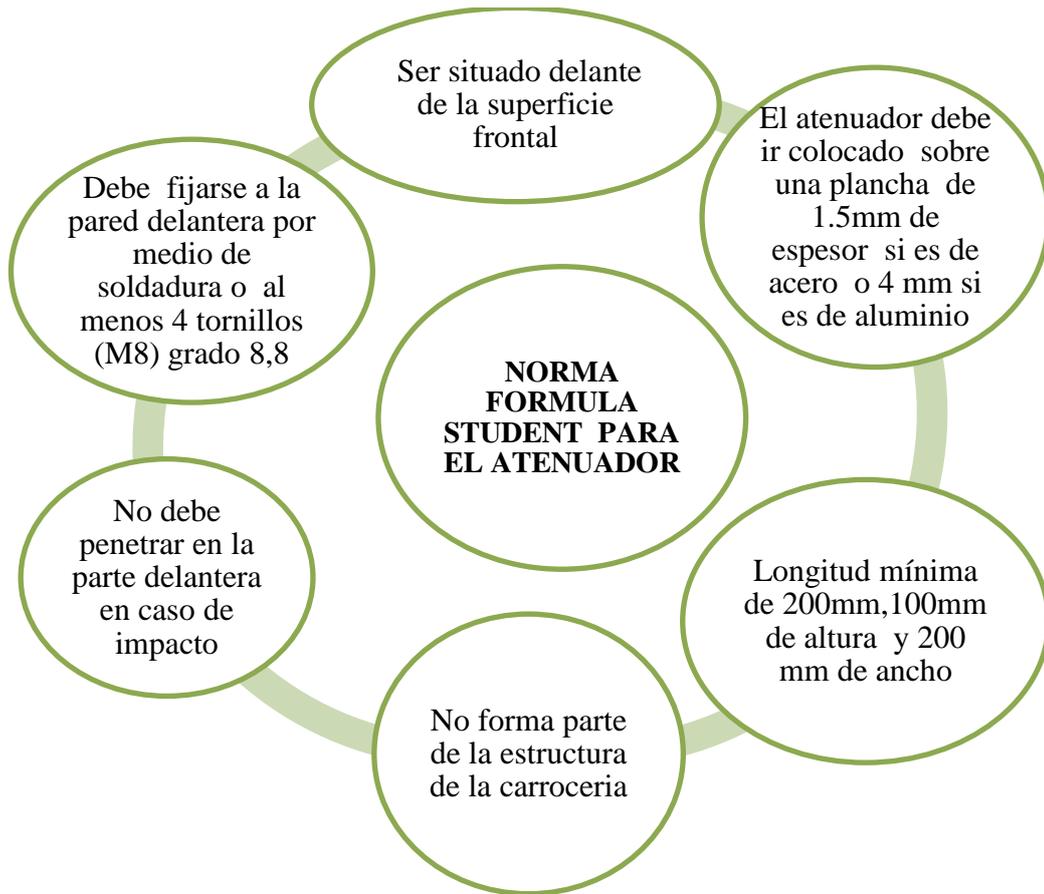


Figura 2. 2. Características del atenuador de impacto.

Fuente: Reglamento Formula SAE 2012.

2.4.2. CONDICIONES INICIALES

En la **Tabla 2-1** se muestran las medidas normalizadas del atenuador de impacto:

Tabla 2- 1. Medidas normalizadas Formula Sae 2012.

Fuente: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries-/rules/2013fsaerules.pdf>.

MEDIDAS NORMALIZADAS FORMULA SAE 2012	
Longitud	200 mm
Altura	100 mm
Ancho	200 mm

En la **Tabla 2-2** se detalla los valores iniciales del atenuador dadas en la norma.

Tabla 2- 2. Condiciones iniciales.

Fuente: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/-2012fsaerules.pdf>.

CONDICIONES INICIALES	
Desaceleración media (Normativa)	20g
Masa del vehículo (Kg)	300
Velocidad inicial antes del impacto (m/s)	7
Velocidad final (m/s)	0
Gravedad (m/s²)	9.81

2.4.3. CÁLCULOS PRELIMINARES

A continuación se detalla los cálculos iniciales que debe cumplir el atenuador de impactos:

2.4.3.1. ENERGÍA CINÉTICA

La energía de absorción se calcula mediante la fórmula:

$$E_{abs} = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (2.1)^1$$

En donde:

E_{abs} = Energía cinética de absorción (J).

m = Masa total del vehículo (kg).

v = Velocidad inicial antes del impacto ($\frac{m}{s}$).

Por tanto:

$$m = 300 \text{ kg.}$$

$$v = 7 \frac{m}{s}.$$

¹ Wilson Buffa.Fisica.5ta edición.2003.pag150.

Remplazando en la **fórmula 2.1** se tiene:

$$E_{abs} = \frac{1}{2} * 300Kg * \left(7 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$E_{abs} = 7350 J$$

2.4.3.2. FUERZA MÁXIMA

La fuerza máxima se calcula mediante la fórmula:

$$F = m * a \quad (2.2)^1$$

En donde:

F = Fuerza máxima de absorción en el impacto (N).

m = masa total del vehículo (Kg).

a =aceleración media dada por la norma $\left(\frac{m}{s^2}\right)$.

Por tanto, para los cálculos de la fuerza máxima del atenuador se tiene:

$$m = 300 \text{ Kg.}$$

$$a = 20 \left(\frac{m}{s^2}\right).$$

Remplazando en la **fórmula 2.2** se tiene:

$$F = 300 \text{ Kg} * \left(20*9.81\right)\frac{m}{s^2}$$

$$F = 58860 \text{ N}$$

2.4.3.3. DEFORMACIÓN MÍNIMA DEL ATENUADOR

Para determinar la deformación mínima del atenuador se utiliza la siguiente formula:

$$V_o^2 = V_f^2 - 2 * a * d \quad (2.3)^2$$

¹ Wilson Buffa.Fisca.5ta edición.2003.pag150.

² Roberto Stimler, Física I.2010Pag.21.

En donde

V_o = velocidad inicial de partida del vehículo (m/s).

V_f = velocidad inicial de impacto (m/s).

a = aceleración media.

d = distancia (cm).

Despejando de la fórmula (2.3) la distancia (d), se obtiene el valor mínima en donde empieza la deformación del material, así tenemos:

$$V_o = 0 \frac{m}{s}.$$

$$V_f = 7 \frac{m}{s}.$$

$$a = 9.81 \frac{m}{s^2}.$$

Remplazando los valores se obtiene:

$$d = \frac{V_f^2 - V_o^2}{2 * a}$$

$$d = \frac{\left(7 \frac{m}{s}\right)^2 - \left(0 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 20 * 9.81 \frac{m}{s^2}}$$

$$d = 12.48 \text{ cm}$$

2.4.3.4. TIEMPO DE DEFORMACIÓN

Para encontrar el tiempo de deformación se utiliza las fórmulas para movimiento rectilíneo uniforme variado y son:

$$d = V_o * t + \frac{1}{2} * a * t^2 \quad (2.4)^1$$

En donde:

V_o = velocidad inicial de partida del vehículo (m/s).

¹ Jerry S. Faughn, Física para Bachillerato General, Sexta Edición, Pag. 73.

V_f = velocidad inicial de impacto (m/s).

a = aceleración media.

d = distancia (cm).

t = tiempo (s).

$$V_f = V_o + a * t \quad (2.5)^1$$

En donde

V_o = velocidad inicial de partida del vehículo (m/s).

V_f = velocidad inicial de impacto (m/s).

a = aceleración media.

t = tiempo (s).

La tercera fórmula de movimiento rectilíneo uniforme variado se detalla en la deformación mínima del atenuador (2.4).

Al encontrarse el vehículo en reposo, la velocidad inicial es nula y por ende las formulas movimiento rectilíneo uniforme variado se simplifican quedando así:

$$V_f = a * t \quad (2.6)$$

$$d = \frac{1}{2} * a * t^2 \quad (2.7)$$

Relacionando estas dos ecuaciones y despejando el tiempo se obtiene:

$$t = \frac{2*d}{V_f} \quad (2.8)$$

Por tanto:

$$d = 0.1248 \text{ m.}$$

$$V_f = 7 \frac{m}{s}.$$

¹ S. Burbano de Ercilla, Problemas de Física, 27ª Edición.2004, Pag. 63.

Remplazando en la ecuación **2.8** los valores iniciales se obtiene el tiempo de deformación del atenuador:

$$t = \frac{2 * 0.1248 \text{ m}}{7 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$t = 0.0356 \text{ s}$$

En conclusión, estos son los valores que debe cumplir el atenuador de impacto con las dimensiones mínimas que la normativa exige.

2.4 DISEÑO DE LOS ATENUADORES DE IMPACTO

2.4.1 DISEÑO DE ALUMINIO (PROPUESTA 1)

En la **figura 2.3** se muestra el diseño preliminar en el cual se presenta el atenuador y el mamparo frontal. El espesor del material del atenuador es de 3mm, y la misma es una caja hueca. Ver **anexo 1**.

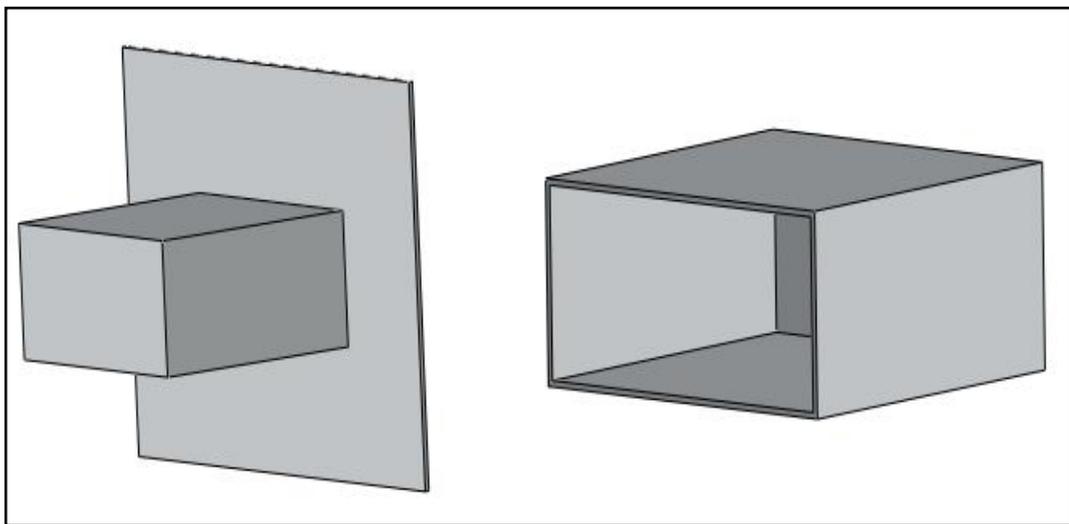


Figura 2. 3. *Diseño de Atenuador.*

Fuente: *Autores.*

2.4.1.1 RESULTADOS

A continuación se muestra la simulación realizada en el software abaqus estudiantil, en la cual se obtiene los siguientes resultados:

2.4.1.1.1. DEFORMACIÓN

En la **figura 2.4** se muestra el atenuador (propuesta1) con material de aluminio, dando sus valores máximos y mínimos de deformación.

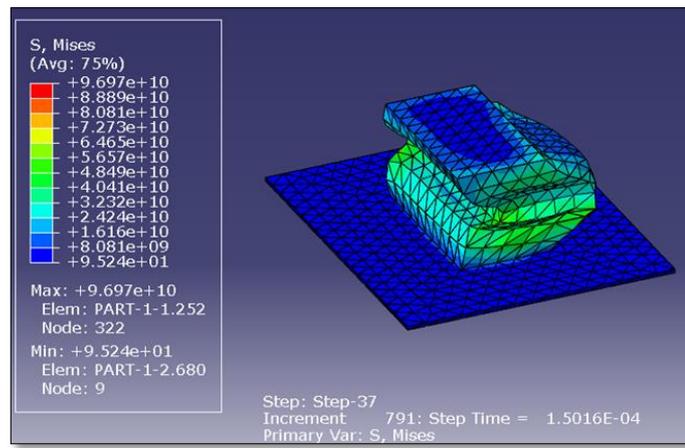


Figura 2. 4. Deformación del atenuador.

Fuente: Autores.

2.4.1.1.2. VELOCIDAD-TIEMPO

En la **Figura 2.5** se muestra la pérdida de velocidad en función del tiempo de impacto.

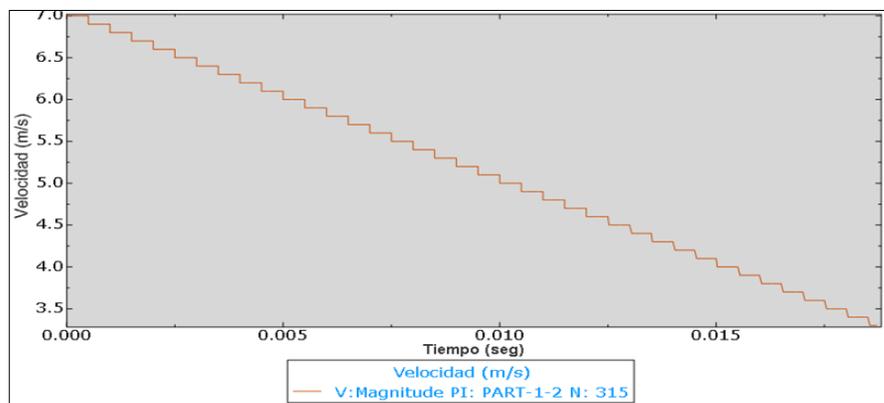


Figura 2. 5. Grafica Velocidad-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.1.1.3. DESPLAZAMIENTO-TIEMPO

En la **figura 2.6** se muestra el desplazamiento que se produce en el material de aluminio en función del tiempo calculado.

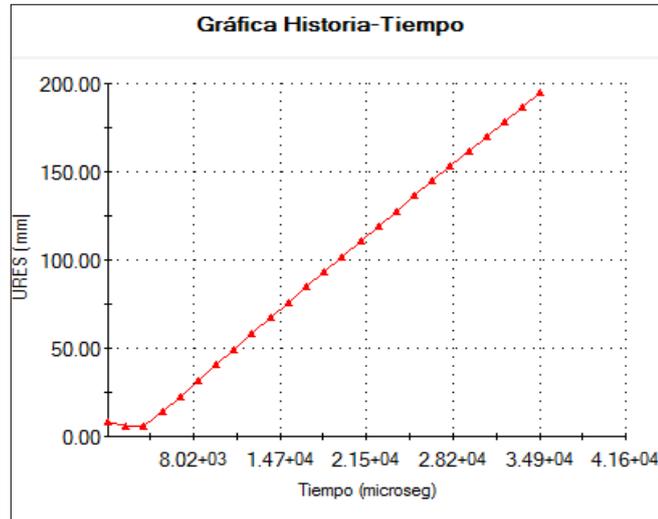


Figura 2. 6. Grafica Desplazamiento-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.1.1.4. ENERGÍA INTERNA-TIEMPO

En la **figura 2.7** se muestra la energía interna de absorción que se produce al momento del impacto.

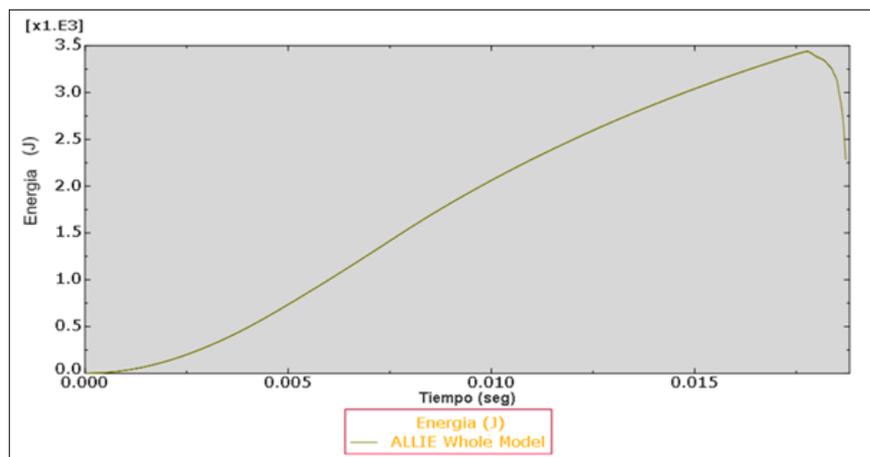


Figura 2. 7. Grafica Energía interna-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.2 DISEÑO DE ALUMINIO (PROPUESTA 2)

En la **figura 2.8** se muestra el diseño del atenuador de aluminio para su análisis dinámico. Ver **anexo 2**.

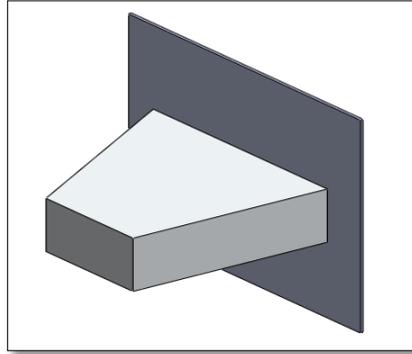


Figura 2. 8. Diseño del atenuador de aluminio.

Fuente: Autores.

2.4.2.1 RESULTADOS

A continuación se muestra la simulación realizada en el software Abaqus estudiantil, en la cual se obtiene los siguientes resultados:

2.4.2.1.1. DEFORMACIÓN

En la **figura 2.9** se muestra la deformación producida del atenuador en el tiempo calculado según norma y el nuevo diseño planteado.

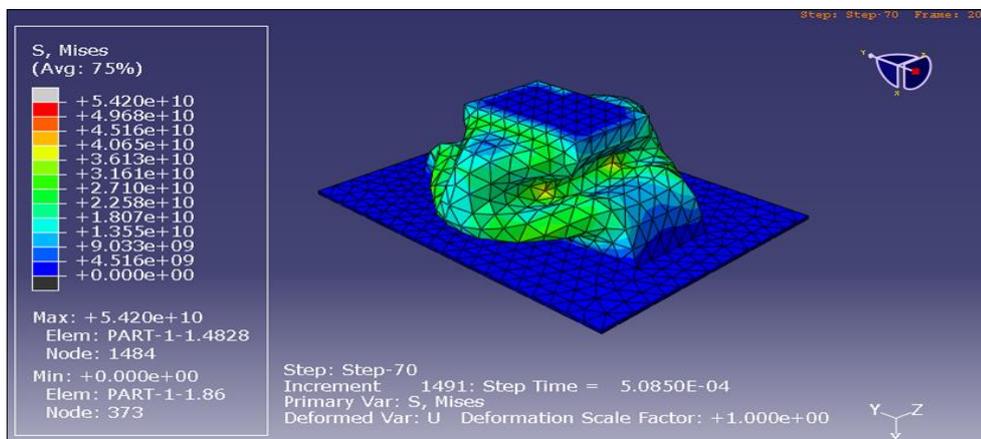


Figura 2. 9. Deformación del atenuador.

Fuente: Autores.

2.4.2.1.2. VELOCIDAD-TIEMPO

En la **figura 2.10** se muestra el comportamiento de la velocidad en función del tiempo.

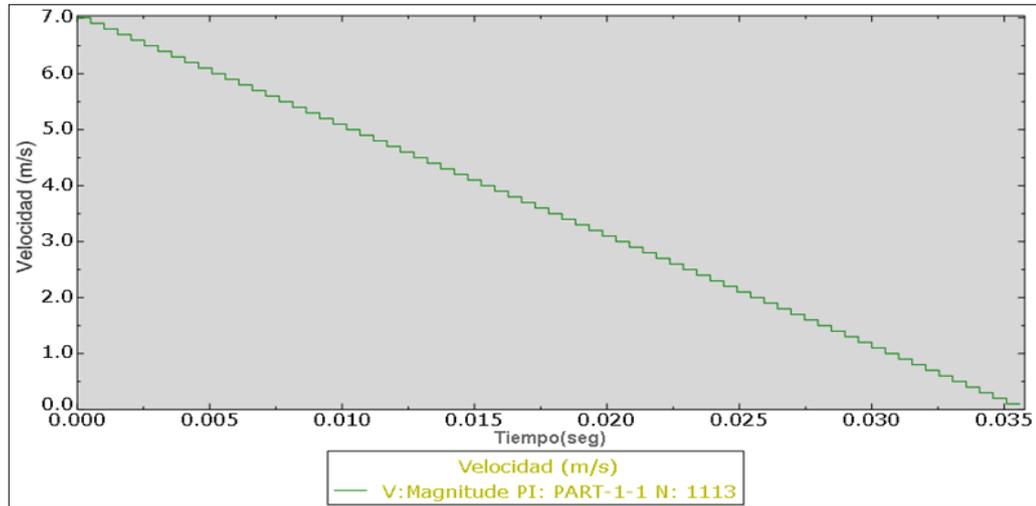


Figura 2. 10. Grafica Velocidad-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.2.1.3. DESPLAZAMIENTO-TIEMPO

En la **figura 2.11** se muestra el desplazamiento total del atenuador en su análisis dinámico.

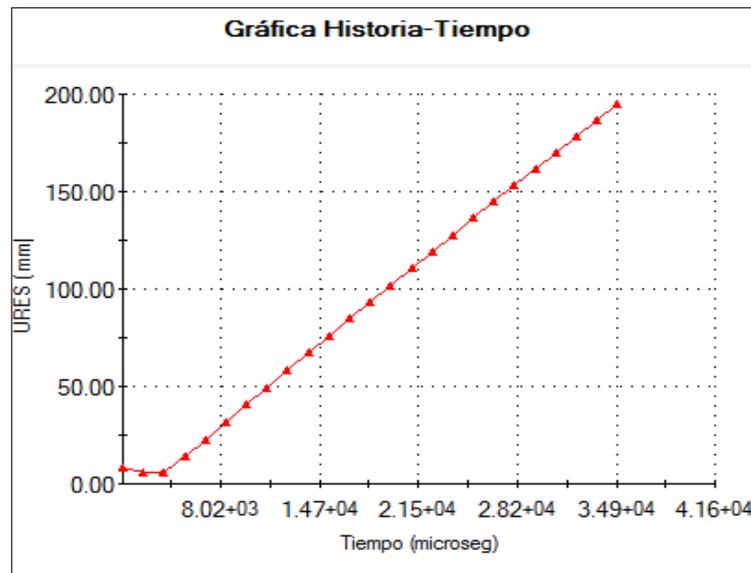


Figura 2. 11. Grafica Desplazamiento-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.2.1.4. ENERGÍA INTERNA-TIEMPO

En la **figura 2.12** se muestra la energía total de absorción en el momento de la colisión.

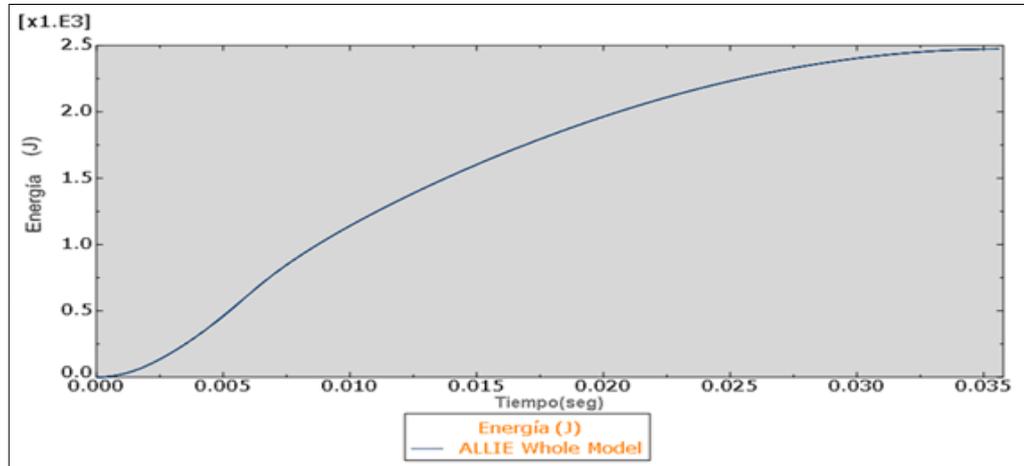


Figura 2. 12. Grafica Energía interna-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.3 DISEÑO DE ALUMINIO-POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3)

En la **figura 2.13**, se detalla el diseño tipo pirámide con material de aluminio y poliestireno expandido realizado en el software solidworks versión estudiantil. Ver **anexo 3**.

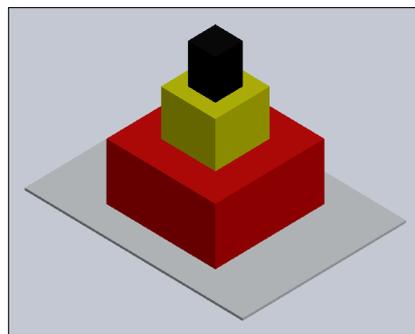


Figura 2. 13. Diseño tipo pirámide solidworks.

Fuente: Autores.

2.4.3.1 RESULTADOS

A continuación se muestra la simulación realizada en software abaqus estudiantil, en la cual se obtiene los siguientes resultados:

2.4.3.1.1. DEFORMACIÓN

En la **figura 2.14** se muestra la deformación producida del atenuador en el tiempo calculado según norma y el nuevo diseño planteado.

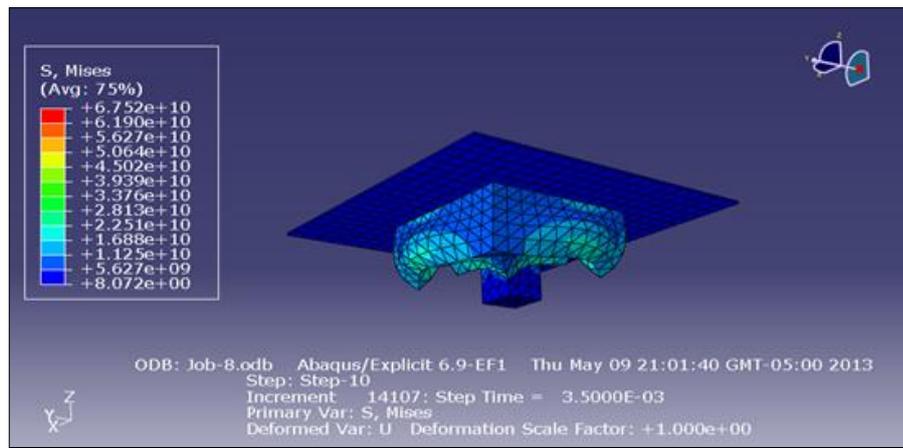


Figura 2. 14. Deformación del atenuador.

Fuente: Autores.

2.4.3.1.2. VELOCIDAD-TIEMPO

En la **figura 2.15** se muestra el comportamiento de la velocidad en función del tiempo.

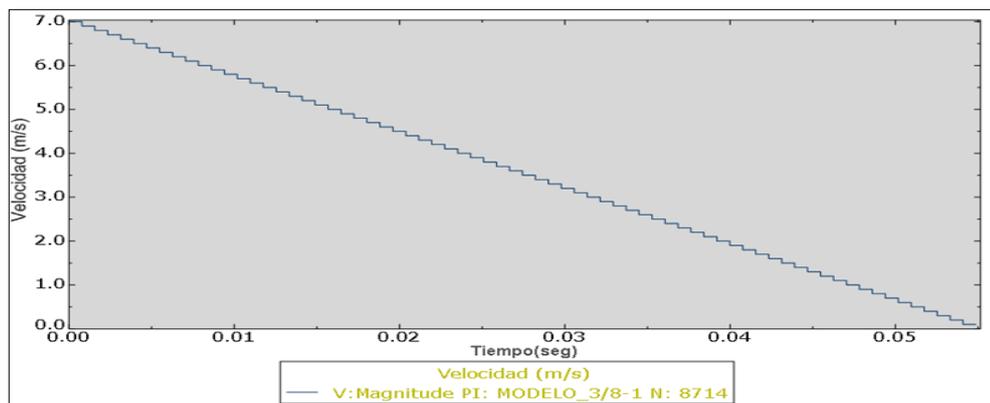


Figura 2. 15. Grafica Velocidad-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.3.1.3. DESPLAZAMIENTO-TIEMPO

En la **figura 2.16** se muestra el desplazamiento total del atenuador en su análisis dinámico.

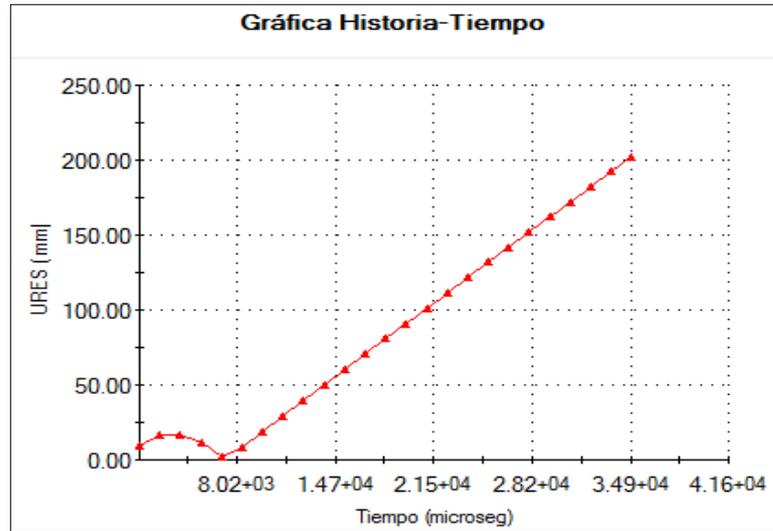


Figura 2. 16. Grafica Desplazamiento-tiempo.

Fuente: Autores

2.4.3.1.4. ENERGÍA INTERNA-TIEMPO

En la **figura 2.17** se muestra la energía total de absorción en el momento de la colisión.

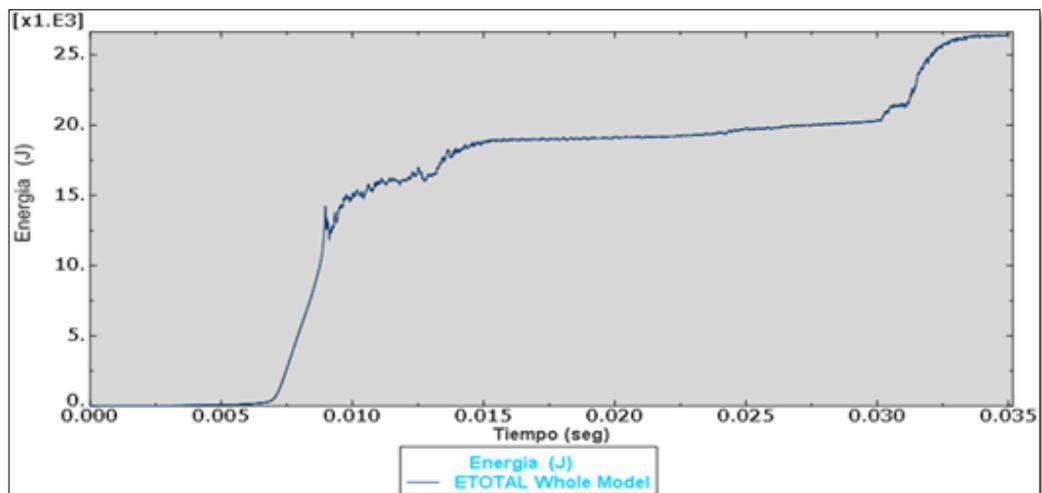


Figura 2. 17. Grafica Energía interna-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.4 DISEÑO DE ALUMINIO (PROPUESTA 4)

Con este tipo de diseño, lo que se busca es que no provoque el colapso del material para garantizar así la seguridad del piloto y a la vez generar una desaceleración continua para minimizar las lesiones.

En la **figura 2.18** se muestra el diseño del atenuador con su estructura hexagonal. Ver **anexo 4**.

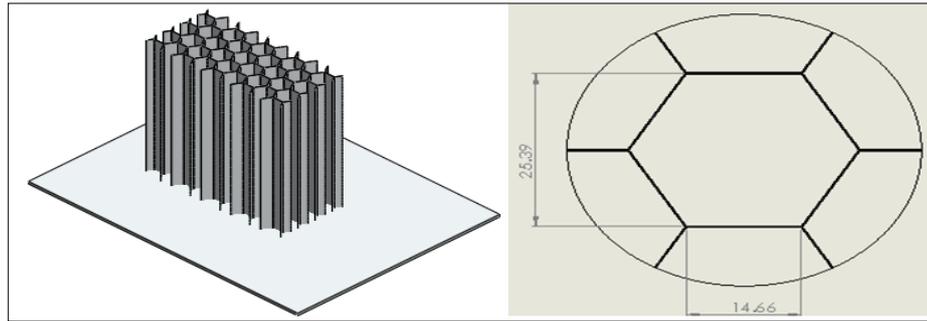


Figura 2.18. Diseño con material de aluminio.

Fuente Autores.

2.4.4.1 RESULTADOS

A continuación se muestra la simulación realizada en el software Abaqus estudiantil, en la cual se obtiene los siguientes resultados:

2.4.4.1.1 DEFORMACIÓN

En la **figura 2.19** se muestra el atenuador (propuesta 4) con material de aluminio, dando sus valores máximos y mínimos de deformación.

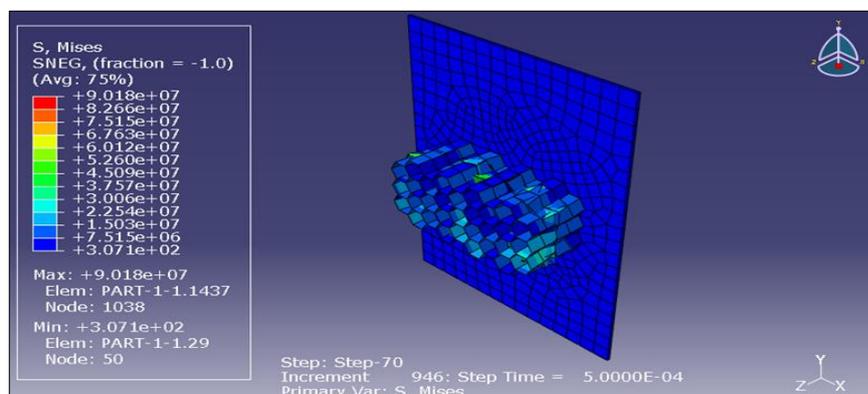


Figura 2.19. Deformación del atenuador.

Fuente: Autores.

2.4.4.1.2 VELOCIDAD-TIEMPO

En la **Figura 2.20** se muestra la pérdida de velocidad en función del tiempo de impacto.

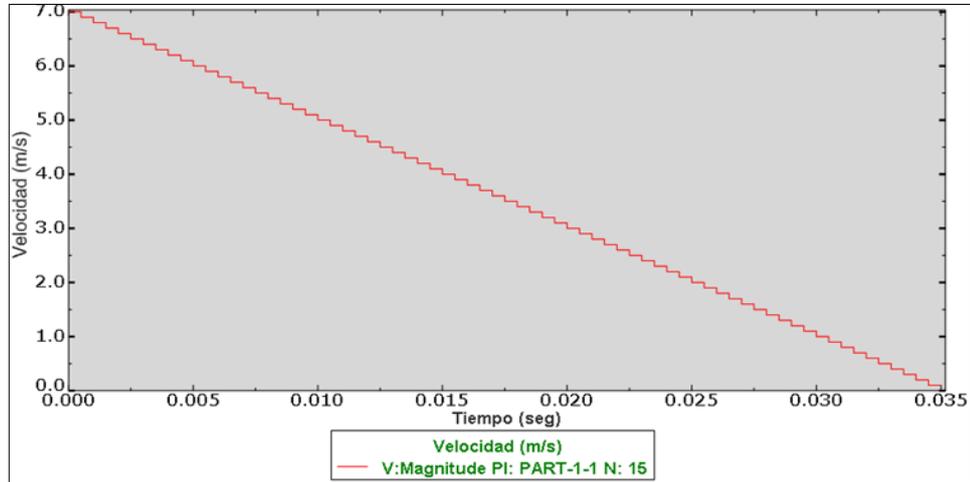


Figura 2. 20. Grafica Velocidad-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.4.1.3 DESPLAZAMIENTO-TIEMPO

En la **figura 2.21** se observa el desplazamiento que se produce en el material de aluminio en función del tiempo calculado en la norma.

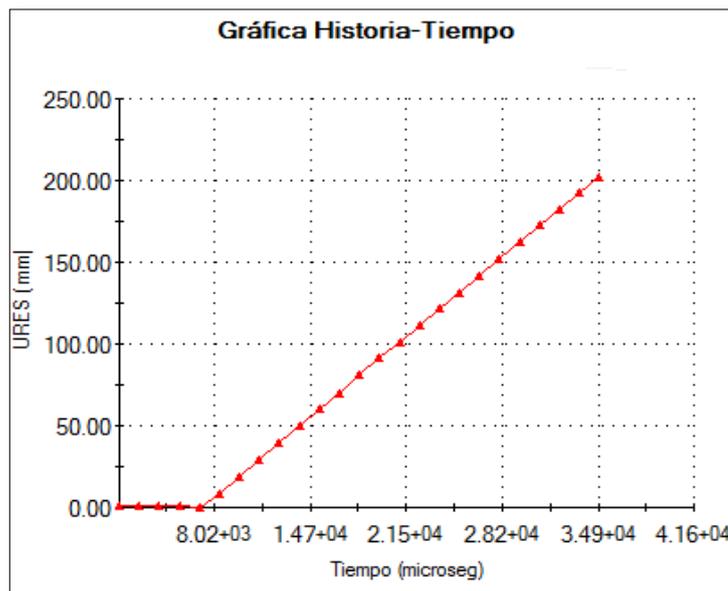


Figura 2. 21. Grafica Desplazamiento-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.4.1.4 ENERGÍA INTERNA-TIEMPO

En la **figura 2.22** se muestra la energía interna que se produce al momento del impacto.

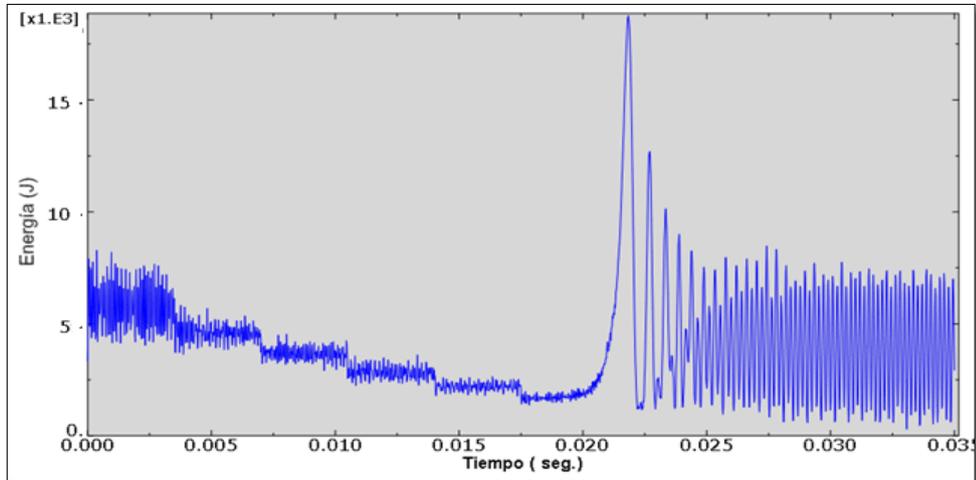


Figura 2. 22. Grafica Energía interna-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.5 DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 5)

Para el diseño de este atenuador de impactos se emplea el material de balsa compacta, las dimensiones se encuentran en el **anexo 5**.

En la **figura 2.23** Se muestra el atenuador como un sólido compacto que se utiliza para el análisis estático.

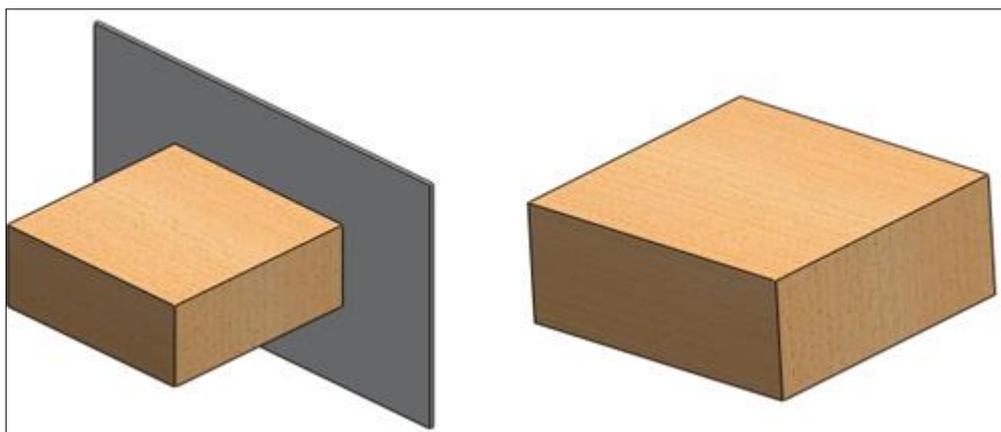


Figura 2. 23. Atenuador con material de Balsa.

Fuente: Autores.

2.4.5.1 RESULTADOS

A continuación se muestra la simulación realizada en el software abaqus estudiantil, en la cual se obtiene los siguientes resultados:

2.4.5.1.1 DEFORMACIÓN

En la **figura 2.24** se muestra el atenuador (propuesta 4) con material de balsa, dando sus valores máximos y mínimos de deformación.

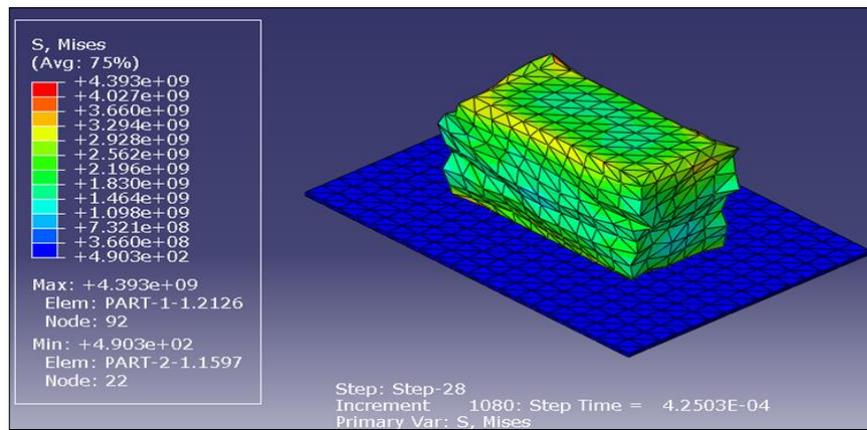


Figura 2. 24. Deformación del atenuador.

Fuente: Autores.

2.4.5.1.2 VELOCIDAD-TIEMPO

En la **Figura 2.25** se muestra la pérdida de velocidad en función del tiempo de impacto.

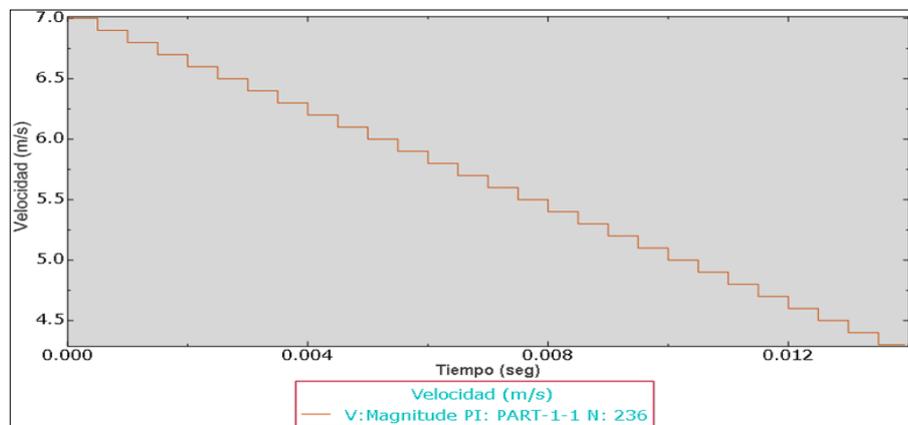


Figura 2. 25. Grafica Velocidad-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.5.1.3 DESPLAZAMIENTO-TIEMPO

En la **figura 2.26** se muestra el desplazamiento que se produce en el atenuador de balsa en función del tiempo calculado en la norma.

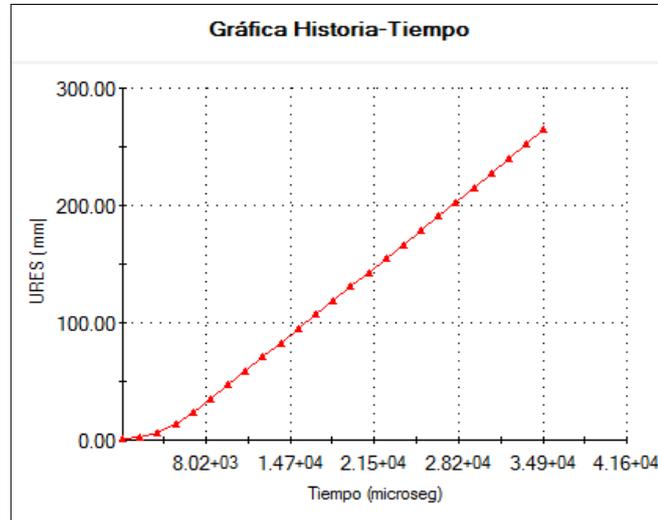


Figura 2. 26. Grafica Desplazamiento-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.5.1.4 ENERGÍA INTERNA-TIEMPO

En la **figura 2.27** se muestra la energía interna que se produce al momento del impacto.

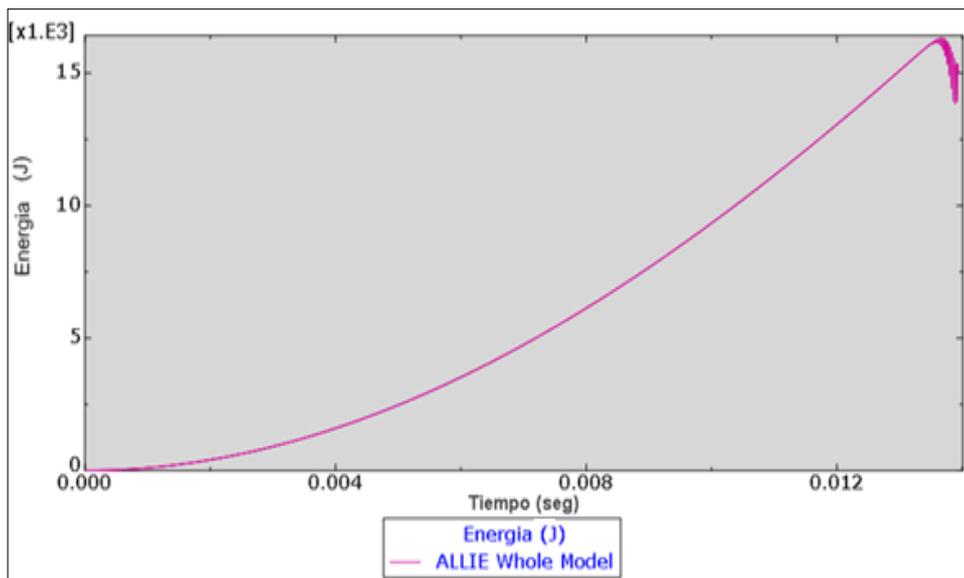


Figura 2. 27. Grafica Energía interna-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.6 DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 6)

Para este diseño del atenuador de impactos se aplica el material balsa, las dimensiones de dicho diseño se indican en el **anexo 6**.

En la **figura 2.28** Se muestra el atenuador como un sólido compacto que se utiliza para el análisis estático.

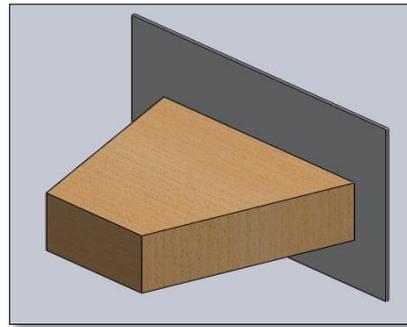


Figura 2. 28. Diseño atenuador de balsa.

Fuente Autores.

2.4.6.1 RESULTADOS

A continuación se muestra la simulación realizada en el software abaqus estudiantil, en la cual se obtiene los siguientes resultados:

2.4.6.1.1 DEFORMACIÓN

En la **figura 2.29** se muestra el comportamiento de deformación del atenuador (propuesta 5), en la cual están representados sus valores máximos y mínimos.

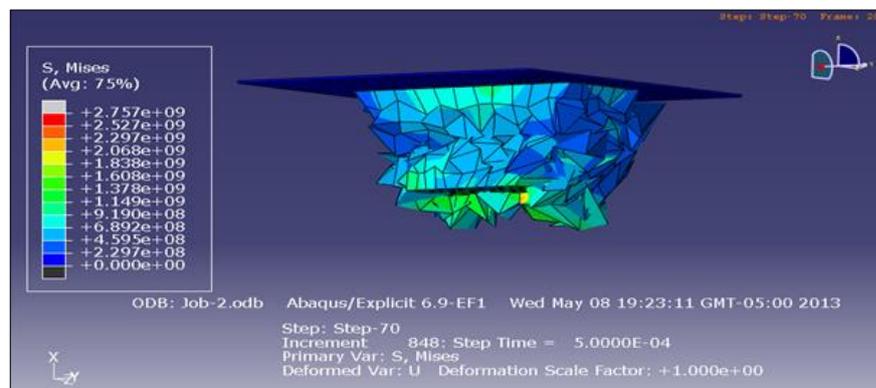


Figura 2. 29. Deformación del atenuador.

Fuente: Autores.

2.4.6.1.2 VELOCIDAD-TIEMPO

En la **figura 2.30** se muestra la pérdida de velocidad en función del tiempo de impacto.

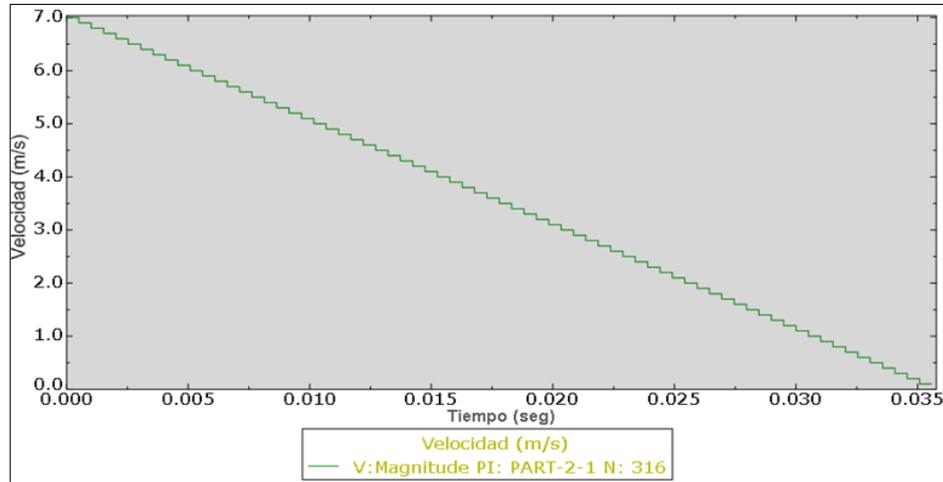


Figura 2. 30. Grafica Velocidad-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.6.1.3 DESPLAZAMIENTO-TIEMPO

En la **figura 2.31** se muestra el desplazamiento que se produce en el material de balsa en función del tiempo calculado en la norma.

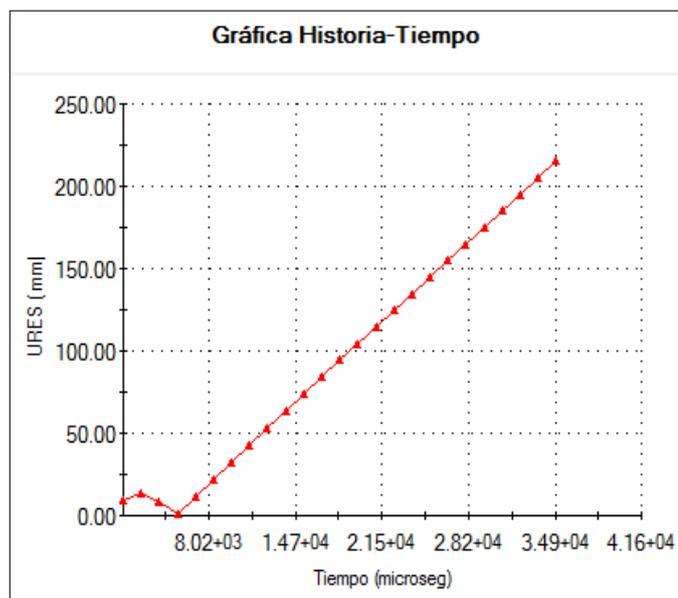


Figura 2. 31. Grafica Desplazamiento-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.6.1.4 ENERGÍA INTERNA-TIEMPO

En la **figura 2.32** se muestra la energía interna que se produce al momento del impacto.

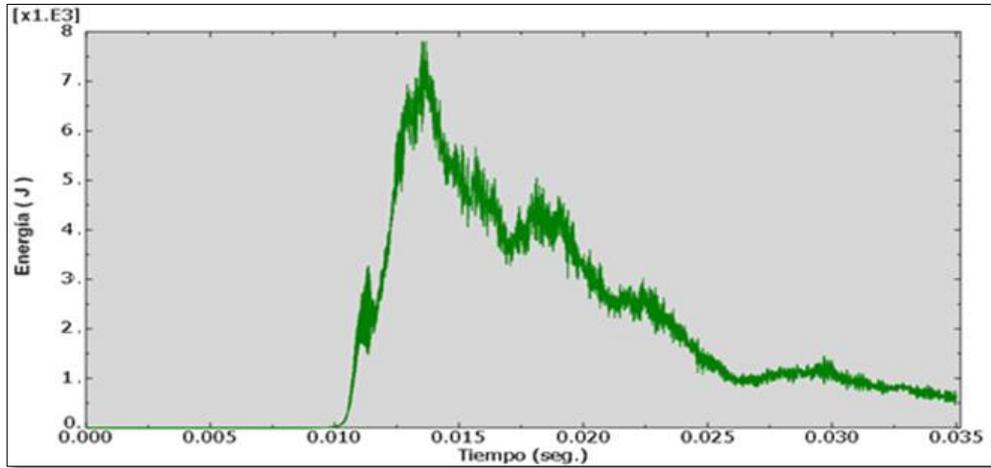


Figura 2. 32. Grafica Energía interna-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.6 DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 7)

En la **figura 2.33** se muestra el diseño del atenuador con el material de balsa. Ver **anexo 7**.

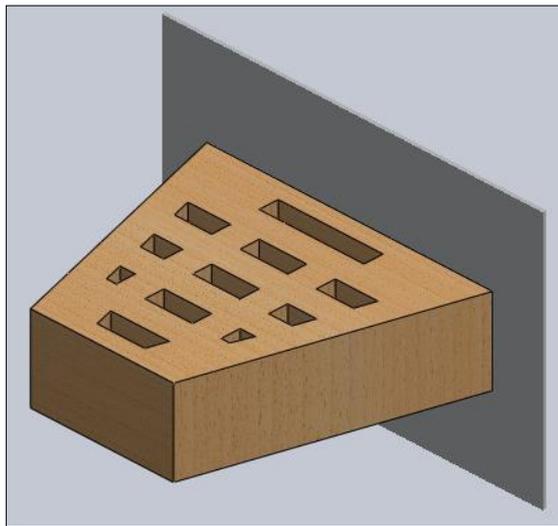


Figura 2. 33. Diseño atenuador de balsa.

Fuente: Autores.

2.4.6.1 RESULTADOS

A continuación se muestra la simulación realizada en software abaqus estudiantil, en la cual se obtiene los siguientes resultados:

2.4.6.1.1 DEFORMACIÓN

En la **figura 2.34** se muestra la deformación producida del atenuador en el tiempo calculado según norma y el nuevo diseño.

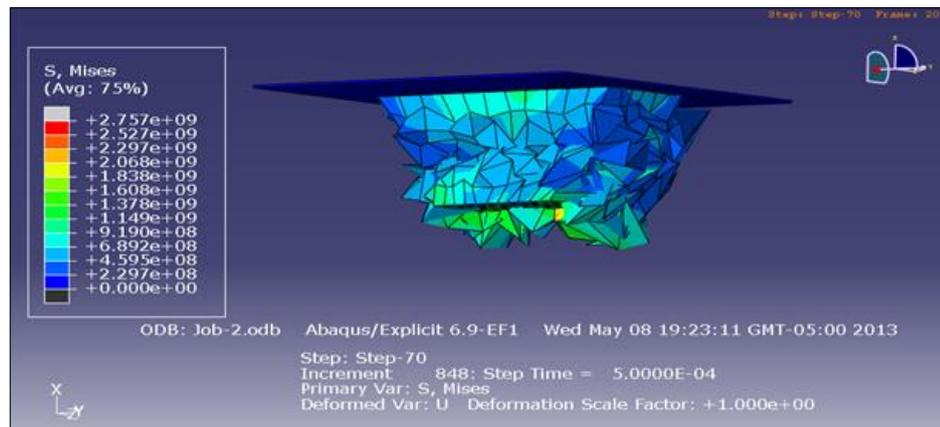


Figura 2. 34. Deformación del atenuador.

Fuente: Autores.

2.4.6.1.2 VELOCIDAD-TIEMPO

En la **figura 2.35** se muestra el comportamiento de la velocidad en función del tiempo.

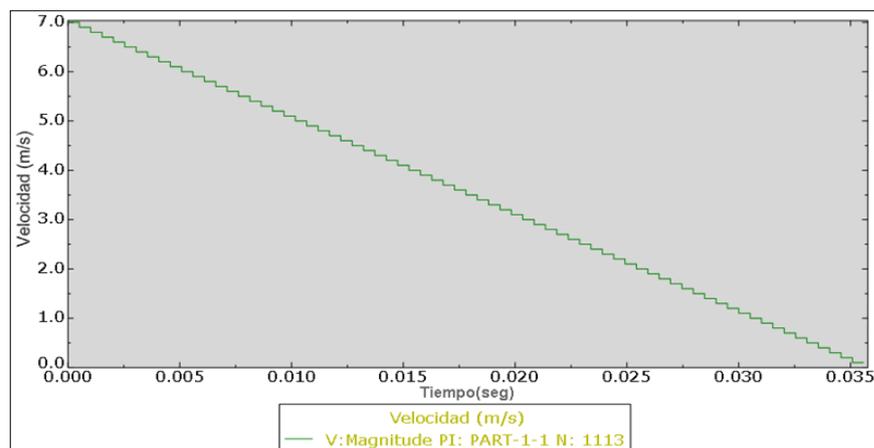


Figura 2. 35. Grafica Velocidad-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.6.1.3 DESPLAZAMIENTO-TIEMPO

En la **figura 2.36** se muestra el desplazamiento total del atenuador en su análisis dinámico.

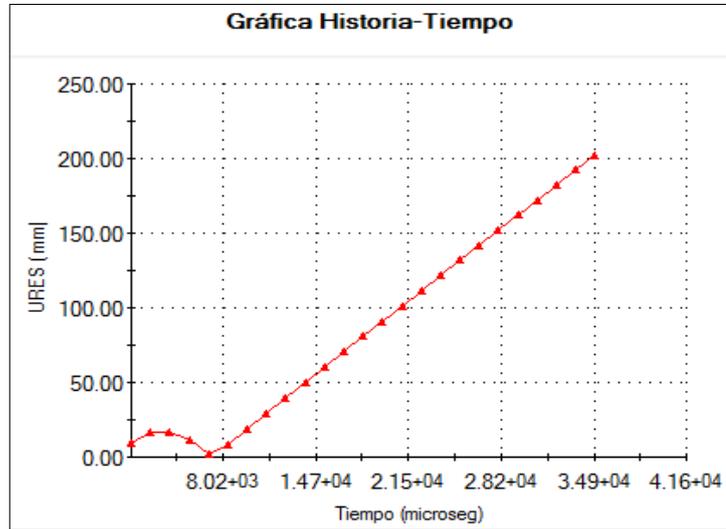


Figura 2. 36. Grafica Desplazamiento-tiempo.

Fuente: Autores.

2.4.6.1.4 ENERGÍA INTERNA-TIEMPO

En la **figura 2.37** se muestra la energía total de absorción en el momento de la colisión.

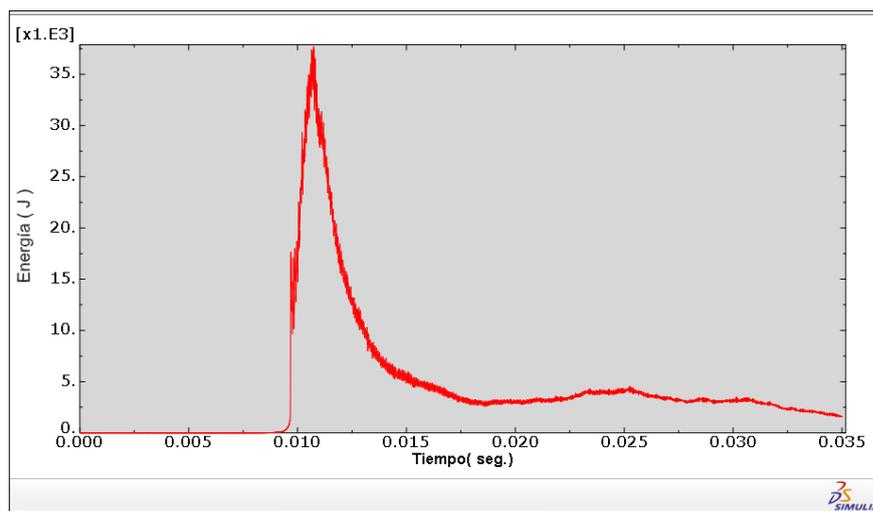


Figura 2. 37. Grafica Energía interna-tiempo.

Fuente: Autores.

2.5 TABLA DE PRIORIZACIÓN DE DISEÑOS DE ATENUADORES DE IMPACTO

En la **tabla 2-3** se detalla un análisis de priorización de los diseños expuestos anteriormente con los requerimientos necesarios para su selección y construcción, para luego finalmente seleccionar los más adecuados según los resultados obtenidos. La valoración está definida de la siguiente manera:

3: Bueno; **2:** Regular; **1:** Malo

Tabla 2- 3. Priorización para la selección de los atenuadores.

Fuente: Autores.

DISEÑOS DE ATENUADORES DE IMPACTO	Costo del Material			Energía de Absorción			Desplazamiento			Deformación			SUMATORIA TOTAL
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Diseño de Aluminio (Propuesta 1)		x		x			x			x			5
Diseño de Aluminio (Propuesta 2)		x		x				x			x		7
Diseño de Aluminio-poliestireno expandido (Propuesta 3)		x				x	x					x	9
Diseño de Aluminio (Propuesta 4)	x					x		x				x	9
Diseño de Balsa (Propuesta 5)			x			x	x			x			8
Diseño de Balsa (Propuesta 6)			x		x			x			x		10
Diseño de Balsa (Propuesta 7)			x			x			x			x	12

2.5.1 SELECCIÓN DE LOS ATENUADORES DE IMPACTO

Al concluir el análisis de los diseños propuestos y tomando en cuenta los requerimientos que deben poseer los atenuadores de impacto, se observa que el diseño de balsa (propuesta 6) obtiene 12 puntos, el diseño de balsa (propuesta 5) obtiene 10 puntos y el diseño de aluminio (propuesta 3) alcanza 9 puntos; es decir estos diseños presentan las mejores características mecánicas y físicas.

Finalmente con el puntaje obtenido en la tabla de priorización, se procede a la selección de los tres diseños de atenuadores de impacto para la construcción y su análisis posterior.

2.6 PRUEBA DINÁMICA DE IMPACTO

Con el fin de asegurar la funcionalidad de los diseños de atenuadores creados, se realiza una prueba de impacto por caída.

Para ello se somete a los atenuadores a las fuerzas establecidas por el reglamento de la formula SAE, que se detallan la **tabla 2-2**.

2.6.1 BANCO DE PRUEBAS

Para realizar los ensayos de impacto se construye un banco de pruebas, como se muestra en la **figura 2.38**.



Figura 2. 38. Banco de pruebas de impacto.

Fuente: Autores.

2.6.1.1 PARTES DEL BANCO DE PRUEBAS

Para la sujeción de las partes del banco de pruebas, se utiliza una estructura tubular de acero de 1 pulgada de espesor y 1.5mm de diámetro. A continuación se detalla las partes del banco de pruebas:

2.6.1.1.1 TANQUE:

En la **figura 2.39** se muestra un tanque que representa el peso del vehículo monoplace, para esto se coloca 300kg dentro de este para cumplir lo que esta establecidos por la formula SAE.



Figura 2. 39. Tanque para simular el peso.

Fuente: Autores.

2.6.1.1.2 RODAMIENTOS:

En la **figura 2.40** se muestra el rodamiento utilizado en el banco de pruebas. Se utiliza 10 rodamientos de una hilera de bolas de contacto radial 6009 Z. Estos rodamientos sirven para deslizar el tanque hacia el piso, con un mínimo de fricción.



Figura 2. 40. Rodamiento de bolas.

Fuente: Autores.

2.6.1.1.3 ÁNGULOS

Se utiliza 4 ángulos los mismos que sirven de guía y actúan como un sistema de pista para mantener la carga en un camino recto a su objetivo previsto.

2.6.1.1.4 TECLE

Se utiliza un tecle de que soporta 1 tonelada, la misma que nos sirve para elevar el peso simulado por el tanque hacia la altura requerida para dicha prueba.

Para ello se coloca una cuerda de 1 pulgada de diámetro la misma que está sujeta en el tanque.

2.6.1.1.5 MAMPARO

En la **figura 2.41** se muestra el mamparo frontal de 300x400mm, construido con tubos de acero inoxidable de 1 pulgada por 1.5mm de espesor. El mamparo va colocado en la parte inferior del tanque con esto se consigue simular la parte frontal del vehículo monoplaza.



Figura 2. 41. *Mamparo Frontal.*

Fuente: *Autores.*

2.6.1.2 CÁLCULOS DEL BANCO DE PRUEBAS

Para realizar las pruebas de impacto se tomara en cuenta la altura necesaria para que al impactarse contra el suelo llega a la velocidad necesaria dada por la norma.

A continuación se detalla los cálculos para determinar la altura requerida tomando en cuenta la fricción producida por los rodamientos.

Para esto se utiliza la siguiente formula:

$$E_o + W = E \quad (2.9^1)$$

¹ Paúl G. Hewitt, Física Conceptual, Novena edición, 2007. Pag 109.

En donde:

E_o =Energía cinética.

W = Trabajo producido.

E =Energía potencial

Remplazando por sus equivalencias en función de la masa tenemos:

$$E_o = \frac{mv^2}{2} \quad (2.10)^1$$

En donde:

E_o = Energía cinética (Joule).

m = Masa (Kg).

v = Velocidad ($\frac{m}{s}$).

$$E = mgh \quad (2.11)^2$$

En donde:

E = Energía potencial (Joule).

m = Masa (Kg).

h = altura (m).

$$W = fr * h \quad (2.12)^3$$

En donde:

W = Trabajo (Joule).

fr = Fuerza de fricción.

h = Altura (m).

¹ Wilson Buffa, Física, 5ª Edición, 2003 .Pag 151.

² Wilson Buffa, Física, 5ª Edición, 2003 .Pag 151.

³ Giancoli,C,douglas, Física Principio con aplicaciones.6ta edición.2006 Pag 142.

Se sabe también que toda fuerza se puede expresar como una relación de masa por una aceleración, así tenemos:

$$f_r = m * a_{fr} \quad (2.13)^1$$

En donde:

f_r = fuerza de fricción.

m = masa (Kg).

a = aceleración ($\frac{m}{s^2}$).

Con estas equivalencias y reemplazando en la fórmula **2.10** y en la fórmula **2.11**, se obtiene la altura:

$$h = \frac{v^2}{2 * a_T} \quad (2.14)$$

Donde la **a_T** engloba la aceleración producida por la fricción y la gravedad.

2.6.1.2.1 CÁLCULO DE LA FRICCIÓN EN LOS RODAMIENTOS

Para el cálculo de la fricción producida de los rodamientos y su guía se tiene un coeficiente de rodadura que varía desde 0.01 a 0.25 mm para una rueda y riel de acero².

Para esto se realiza un cálculo de uno de los rodamientos y se lo multiplicara por el número de rodamientos que se encuentra en el banco.

En la **figura 2.42** se detalla las dimensiones en milímetros (mm) del rodamiento rígido de bolas 6009 Z.

¹ Tripper Mosca. Física para la ciencia y tecnología. 5ta edición. 2003. pag 111.

² A Raymond, Física, 6ª Edición, 2005 Pag 101.

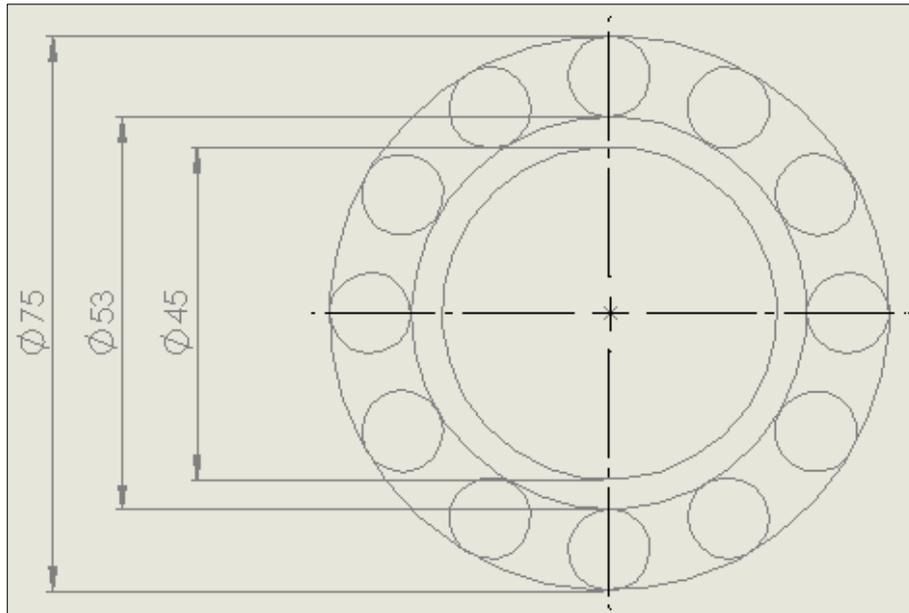


Figura 2. 42. Medidas del rodamiento.

Fuente: Autores.

En la **figura 2.43** esta detallada la ficha tecnica del rodamiento 6009 Z.

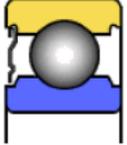
6009 Z		
Rodamiento de una hilera de bolas de contacto radial con 1 deflector		
Características principales	Diám. interior (d)	45 mm (+0, -12)μ
	Diám. exterior (D)	75 mm (+0, -13)μ
	Anchura BI (B)	16 mm (+0, -120)μ
	Anchura BE (C)	(+0, -120)μ
	Anchura total (T)	
	Peso	0.248 kg
	Temperatura mini aconsejada	-20 ° C
	Temperatura máxi aconsejada	110 ° C
	Velocidad límite grasa	8300 tr/min
	Velocidad límite aceite	
Estanqueidad	Deflector metal	
Jaula	Acero	
Frecuencias características (Hz) a 60 tr/min para el anillo interior giratorio	Frecuencia jaula	0.427
	Frecuencia cuerpos rodantes	6.726
	Frecuencia anillo ext.	5.554
	Frecuencia anillo int.	7.445
		En caso de anillo exterior que gira, consultar NTN-SNR.

Figura 2. 43. Ficha técnica del rodamiento 6009Z.

Fuente: www.ntn-snr.com/common/catalogue/es-es/6009%20Z.pdf

En la **figura 2.44** se muestra un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que se encuentran implícitas en el rodamiento, en donde se tiene las fuerzas normales el peso y las fuerzas de rozamiento.

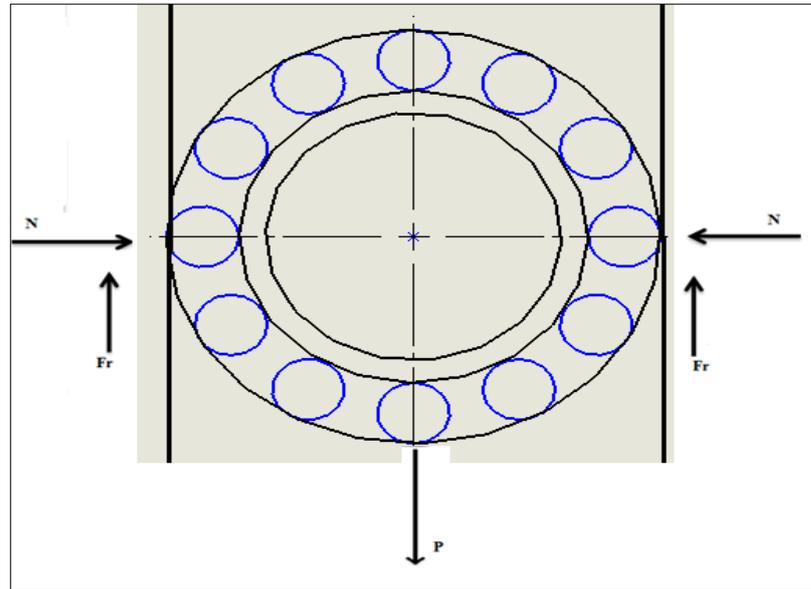


Figura 2. 44. Fuerzas implicadas en el rodamiento.

Fuente: Autores.

Dónde:

N = Fuerza Normal.

Fr = Fuerza de fricción.

P = Peso.

2.6.1.2.2 CÁLCULO DE LA INERCIA EN RODAMIENTOS

A continuación se realiza el cálculo de la inercia producida, para ello se utiliza la siguiente formula:

$$I = mR_g^2 \quad (2.14)^1$$

¹ George. B. Thomas, Calculo de varias variables ,undécima edición.2006 .Pag 1086.

En donde:

I = Inercia (Kg* m²).

m =Masa (Kg).

R_g =Radio de giro (m).

Entonces:

$R_g = 2.65\text{cm}$

$m = 0.248\text{kg} * 10 \text{ rodamientos} = 2.48\text{Kg}$

Por tanto:

$$I = 2.48\text{Kg} * (0.026\text{m})^2$$

$$I = 0.0016 \text{ kg} * \text{m}^2$$

2.6.1.2.3 CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN EN RODAMIENTOS

Para el cálculo de la aceleración producida por la fricción se tomara la siguiente formula:

$$a = F \frac{\left(1 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)\right)}{\left(1 + \left(\frac{I}{R_2^2}\right)\right)} \quad (2.15)^1$$

Dónde:

a = aceleración ($\frac{m}{s^2}$).

F = Fuerza aplicada por el peso del rodamiento (N).

R_1 =Radio interno (m).

R_2 = Radio externo (m).

¹ Wilson Buffa, Física, 5ª Edición, 2003 .Pag 235.

I = Inercia (kg * m²).

Como la fuerza que se aplica viene dada por la gravedad tenemos que:

$$F = m * g \quad (2.16)^1$$

Dónde:

F = Fuerza (N).

m = Masa (Kg).

g = Gravedad ($\frac{m}{s^2}$).

Entonces:

$$m = 2.48 \text{ Kg.}$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}.$$

Remplazando en la fórmula **2.16** tenemos:

$$F = 2.48kg * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 24.32 \text{ N}$$

Con la fuerza obtenida y remplazando los valores en la ecuación **2.15** tenemos:

$$a = 24.32N \frac{\left(1 + \left(\frac{0.0230m}{0.0370m}\right)\right)}{\left(1 + \left(\frac{0.0016kg * m^2}{(0.0370m)^2}\right)\right)}$$

$$a = 18.18 \frac{m}{s^2}$$

¹ Giancoli C. Douglas, Física, 6ª Edición, Pag 71.

2.6.1.2.4 CÁLCULO DE LA ALTURA DE CAÍDA

Calculada la aceleración producida por la fricción en los rodamientos, se tiene que la aceleración total de caída es:

$$a_T = g - a_f \quad (2.17)^1$$

Dónde:

g = gravedad ($\frac{m}{s^2}$).

a_f = aceleración producida por la fricción ($\frac{m}{s^2}$).

Entonces:

$$g = 9.8 \left(\frac{m}{s^2}\right).$$

$$a_f = 18.18 \left(\frac{m}{s^2}\right).$$

Remplazando en la fórmula 2.17 tenemos:

$$a_T = (9.8 - 18.18) \frac{m}{s^2}$$

$$a_T = 8.37 \frac{m}{s^2}$$

Con este valor y teniendo en cuenta que la velocidad con la que se va a impactar es de 7m/s, remplazando en la fórmula 2.14 se tiene que la altura de caída de los elementos es:

$$h = \frac{v^2}{2 * a_T}$$

Dónde:

h = Altura (m).

v = velocidad ($\frac{m}{s}$).

¹ Paúl G. Hewitt, Física conceptual, 9ª Edición, 2004. Pag 65.

$a_T = \text{Aceleración total } \frac{m}{s^2}.$

Entonces:

$$v = 7 \frac{m}{s}.$$

$$a_T = 8.37 \frac{m}{s^2}.$$

Remplazando en la fórmula **2.14**, tenemos que la altura es:

$$h = \frac{(7 \frac{m}{s})^2}{2 * 8.37 \frac{m}{s^2}}$$

$$h = 2.92m$$

2.7 CONSTRUCCIÓN DE LOS ATENUADORES SELECCIONADOS

2.7.1 CONSTRUCCIÓN ATENUADOR DE ALUMINIO-POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3)

Para la construcción del atenuador se emplea una plancha de aluminio que tiene 2.44m de largo, 1.22m de ancho y un espesor de 4mm.

Mediante un proceso de cortado la plancha se divide en cuatro áreas las mismas que son de las siguientes medidas:

- Áreas para construir los pisos del atenuador de impacto.

En la **figura 2.45** se muestran las dimensiones de las áreas seccionadas para la construcción de los tres pisos del atenuador de impacto.

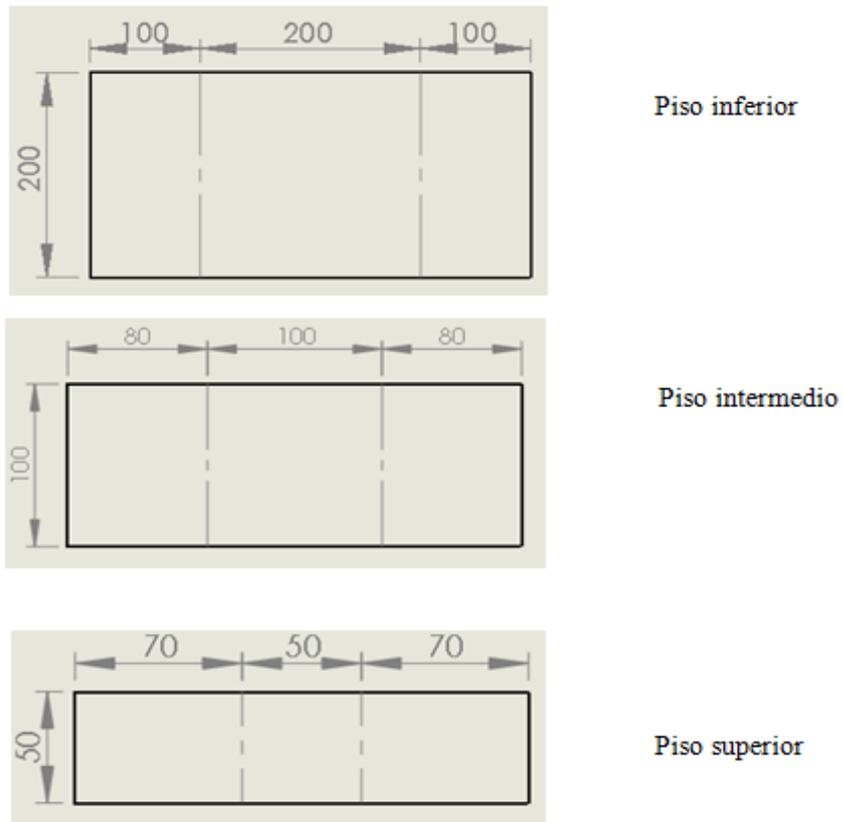


Figura 2. 45. Áreas para la construcción de los pisos.

Fuente: Autores.

- Área para la construcción del mamparo frontal

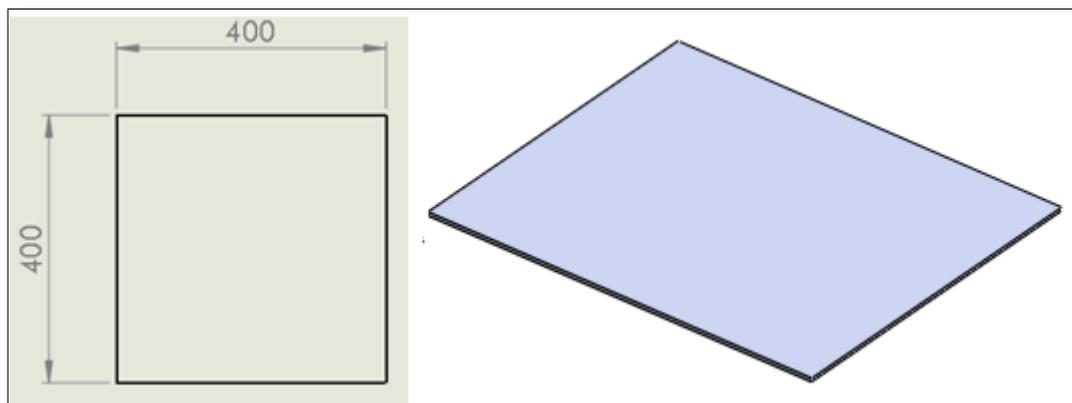


Figura 2. 46. Área para la construcción del mamparo.

Fuente: Autores.

Para construir un piso del atenuador de impactos se cortan dos planchas de aluminio con las dimensiones indicadas en la figura anterior y mediante un proceso se obtiene

el doblado, luego se unen las dos piezas mediante solda especial de aluminio y finalmente se obtiene el piso del atenuador.

El mismo proceso se realiza para la construcción de los otros pisos faltantes. En la **figura 2.47** se muestra el procedimiento antes descrito.

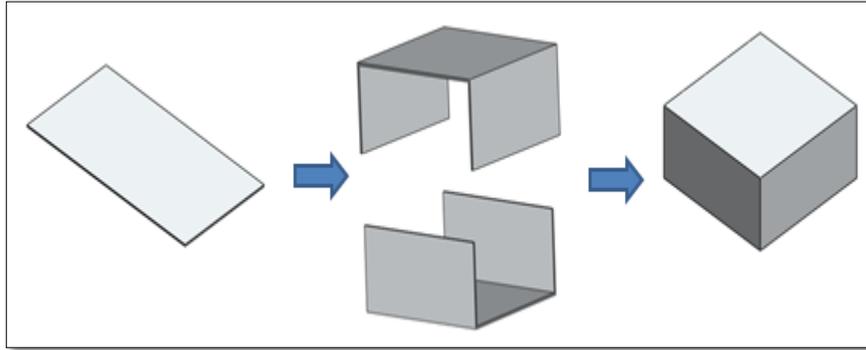


Figura 2. 47. Ensamblaje para construir los pisos.

Fuente: Autores.

Una vez construido los pisos en estos se realizan agujeros por los cuales se introduce el poliestireno expandido en aerosol, luego estos se ensamblan para obtener el diseño deseado, finalmente se adjunta el mamparo frontal; el atenuador terminado en su totalidad se indica en la **figura 2.48**.

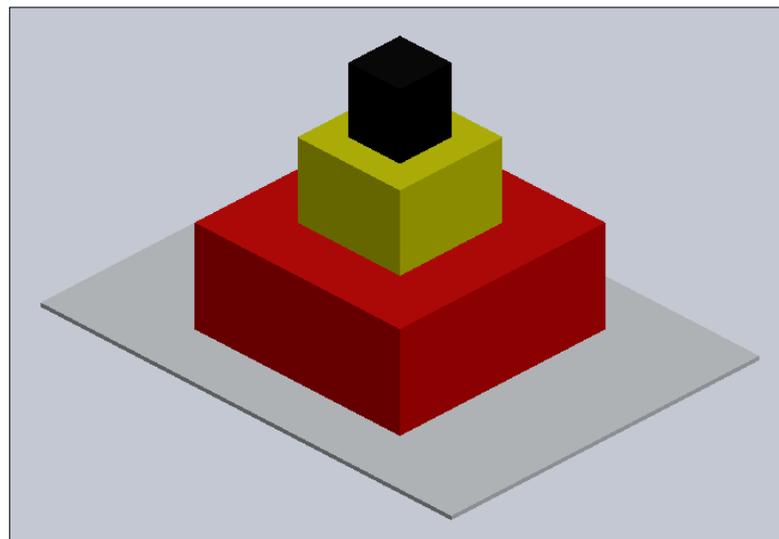


Figura 2. 48. Atenuador de aluminio.

Fuente: Autores.

2.7.2 CONSTRUCCIÓN DEL ATENUADOR DE BALSA (PROPUESTA 6)

Para la construcción del atenuador de impacto se emplea 10 planchas de 600 mm de largo x 300 mm de ancho y 10 mm de espesor como se muestra en la **figura 2.49**.

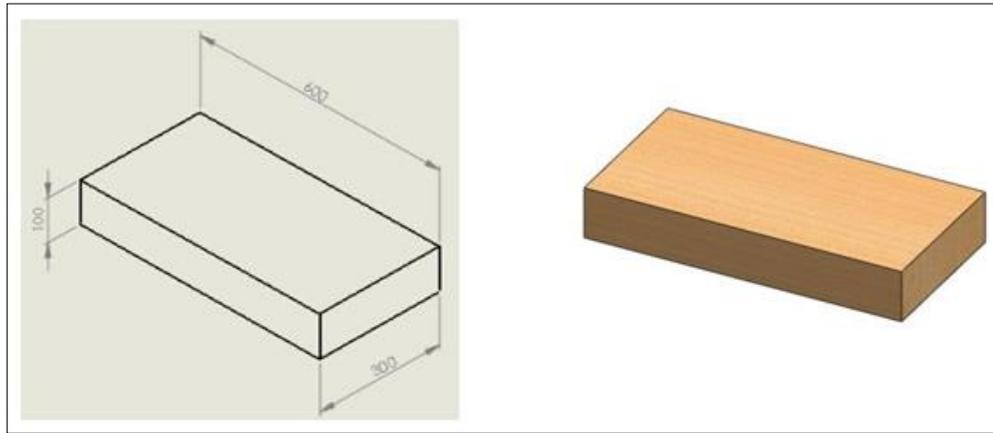


Figura 2. 49. *Plancha de Balsa.*

Fuente: *Autores.*

Mediante un proceso de cortado a laser se procede a dar los cortes deseados a las planchas de balsa individualmente, para la cual se realiza con anticipación el diseño con las medidas exactas del atenuador de impacto en el software AutoCAD Mecánico versión estudiantil y finalmente se procede a dar la forma del mismo como se indica en la **figura 2.50**.

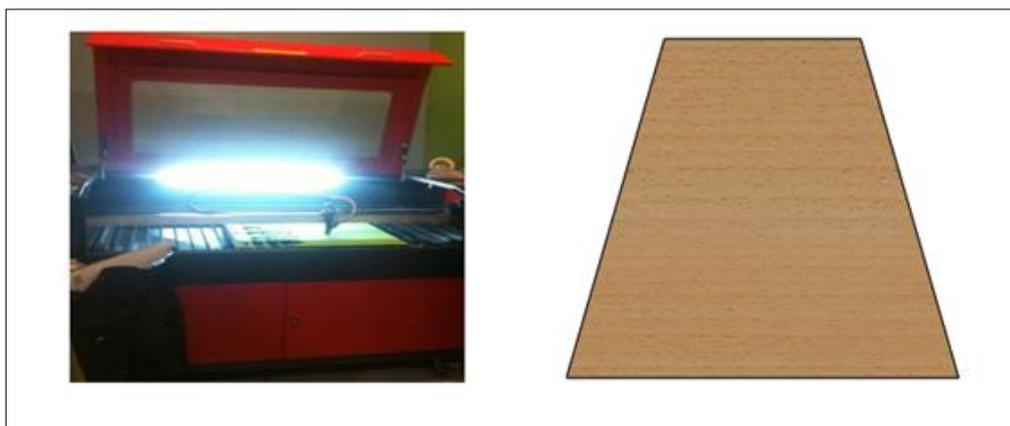


Figura 2. 50. *Corte de Plancha de Balsa.*

Fuente: *Autores.*

Una vez obtenido los cortes en todas las planchas de balsa se procede a ensamblar todo el conjunto y obtener como resultado el atenuador que se utiliza en las pruebas dinámicas como se muestra en la **figura 2.51**.

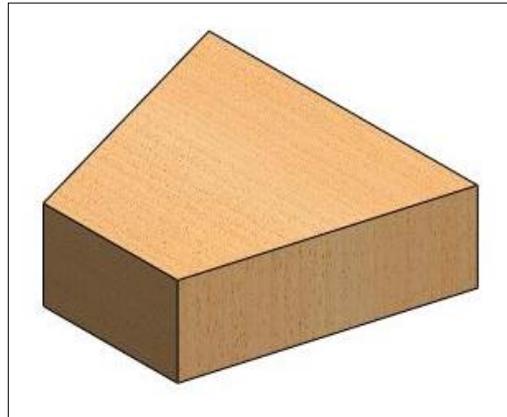


Figura 2. 51. *Planchas de Balsa Ensambladas.*

Fuente: *Autores.*

El mamparo frontal se construye a partir de una plancha de aluminio de 3 mm de espesor con las medidas que se indican a continuación en la **figura 2.52**.

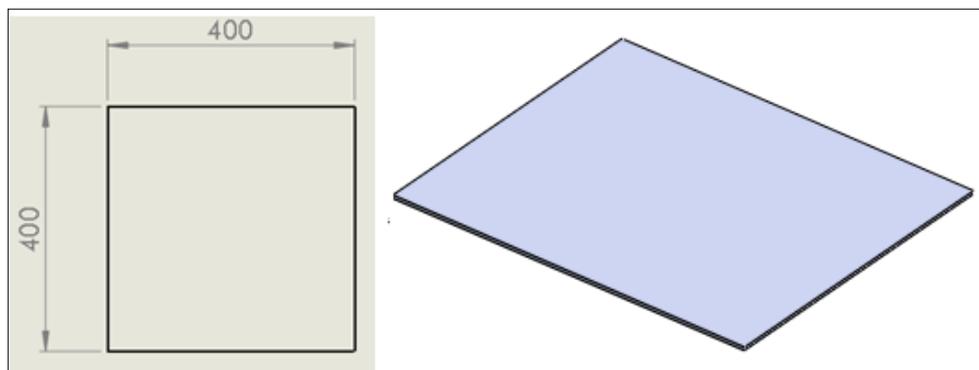


Figura 2. 52. *Mamparo Frontal.*

Fuente: *Autores.*

Una vez obtenidas estas dos pizas tanto el atenuador de impacto como el mamparo frontal de aluminio se une las dos piezas y se forma un solo conjunto el mismo que se utiliza para las pruebas dinámicas como se muestra en la **figura 2.53**.



Figura 2. 53. *Atenuador de Balsa.*

Fuente: *Autores.*

2.7.3 CONSTRUCCIÓN DEL ATENUADOR DE Balsa (PROPUESTA 7)

Para la construcción del atenuador de impacto se emplea 10 panchas de 600 mm de largo x 300 mm de ancho y 10 mm de espesor como se muestra en la **figura 2.54.**

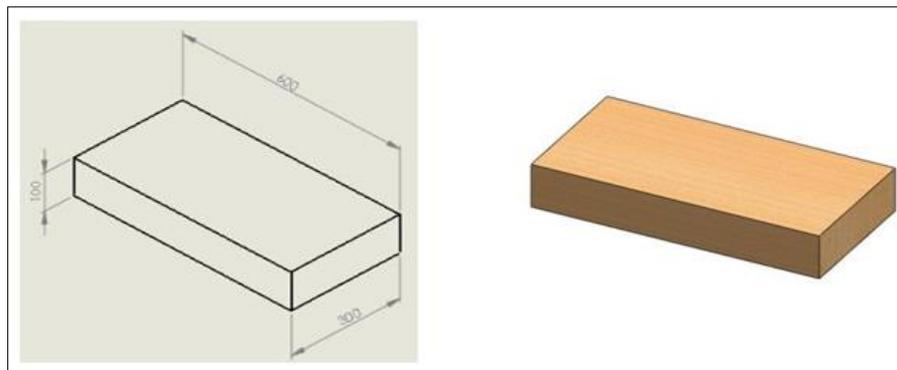


Figura 2. 54. *Plancha de Balsa.*

Fuente: *Autores*

Mediante un proceso de cortado a laser se procede a dar los cortes deseados a las planchas de balsa individualmente, para la cual se realiza con anticipación el diseño con las medidas exactas del atenuador de impacto en el software AutoCAD Mecánico versión estudiantil y finalmente se procede a dar la forma del mismo como se indica en la **figura 2.55.**

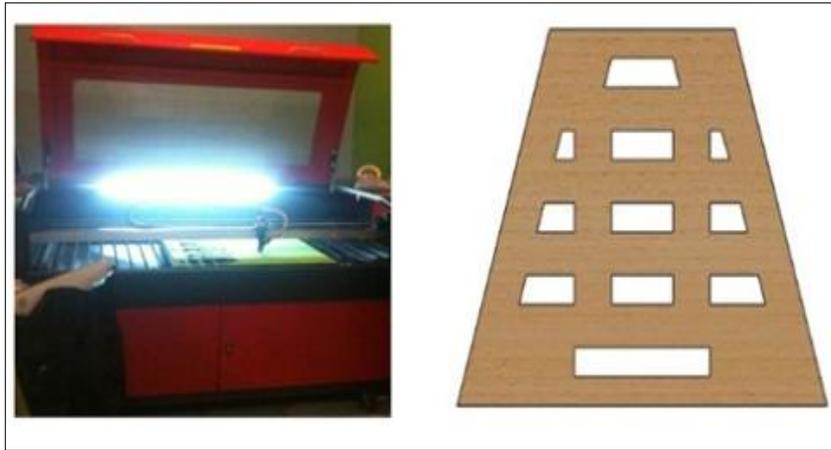


Figura 2. 55. Corte de Plancha de Balsa.

Fuente: Autores

Una vez obtenido los cortes en todas las planchas de balsa se procede a ensamblar todo el conjunto y obtener como resultado el atenuador que se utiliza en las pruebas dinámicas como se indica en la **figura 2.56**.

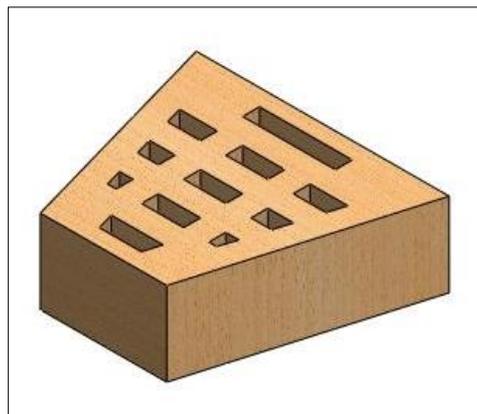


Figura 2. 56. Planchas de Balsa ensambladas.

Fuente: Autores.

El mamparo frontal se construye a partir de una plancha de aluminio de 3 mm de espesor con las medidas que se indican a continuación en la **figura2.57**.

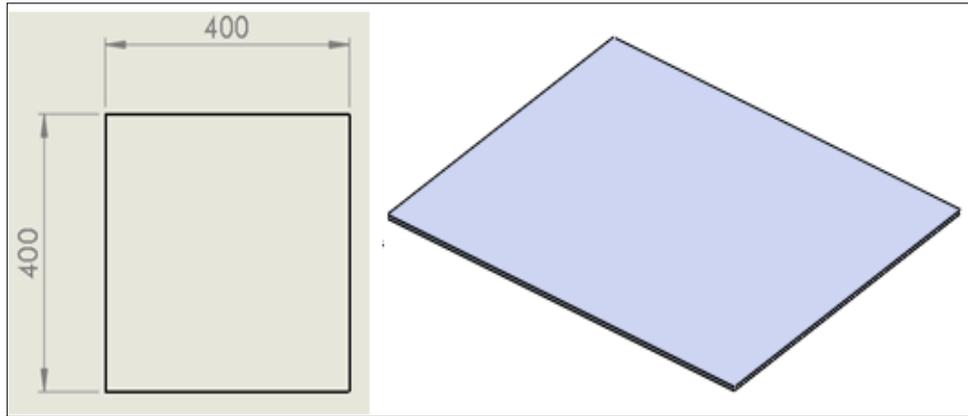


Figura 2. 57. *Mamparo Frontal.*

Fuente: *Autores.*

Una vez obtenidas estas dos piezas tanto al atenuador de impacto como el mamparo frontal de aluminio se une las dos piezas y se forma un solo conjunto el mismo que se utiliza para las pruebas dinámicas como se muestra en la **figura 2.58.**

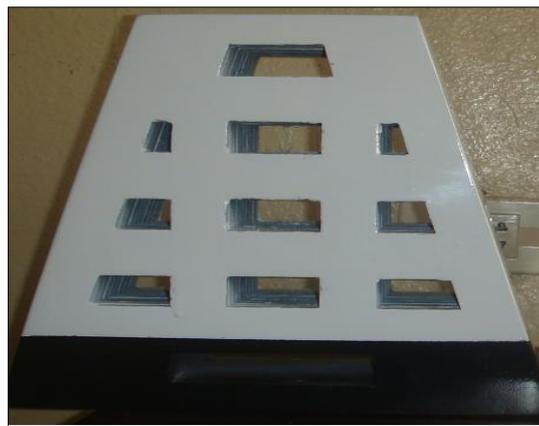


Figura 2. 58. *Atenuador de Balsa 2.*

Fuente: *Autores.*

CAPITULO III

PRUEBAS DE IMPACTO DEL ATENUADOR Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se realiza el análisis de los resultados de los atenuadores seleccionados en el capítulo anterior, con la finalidad de escoger el más adecuado para una posible utilización en un monoplaza, tomando en cuenta los requerimientos que exige la norma fórmula SAE.

Se procede a analizar los resultados obtenidos tanto en el planteamiento computacional, como también los obtenidos en las pruebas dinámicas de impacto con lo cual se verifica e interpreta el comportamiento de cada uno de ellos.

Por último se elige uno de los tres atenuadores que mejores resultados brinde tanto en absorción de energía, desplazamiento y deformación.

3.2. CONCEPTOS GENERALES

A continuación se detalla algunos conceptos generales que se requieren para el análisis del atenuador de impacto. Así tenemos:

3.2.1. TEORÍA DE FALLA

La teoría de falla es un método de análisis de diseño que define la relación más relevante entre los esfuerzos aplicados a un componente y la resistencia del material con que se va a fabricar dadas las condiciones de servicio. La Resistencia del material debe ser mayor a los esfuerzos aplicados¹

Entre uno de los modelos de falla se tiene:

3.2.1.1. TEORÍA DE VON MISES

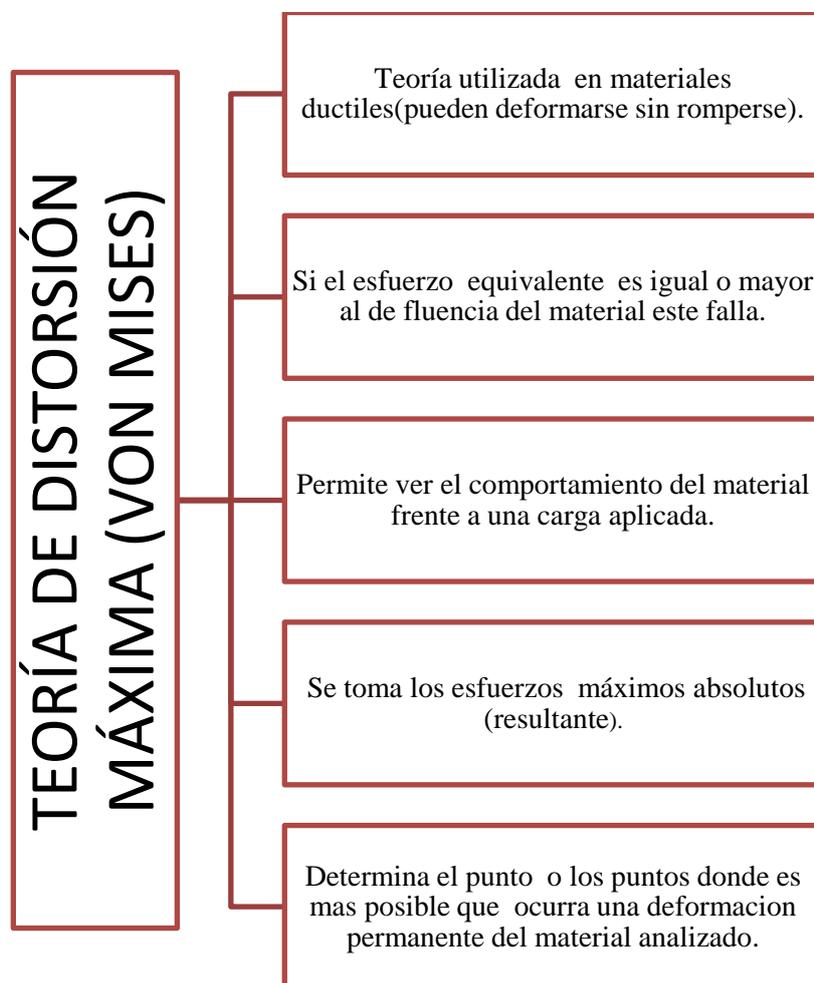


Figura 3. 1. Teoría de Distorsión Von Mises.

Fuente: R. C.Hibbeler. *Mecánica de Materiales*. 6ta edición 2004. Pág. 544-545.

¹ Robert L. Mott, P.E Diseño de elementos de Maquinas. 4ta edición.2006.Pág. 186.

3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS POR SOFTWARE

De acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo 2 de la simulación mediante software con elementos finitos del atenuador de impacto para un monoplaza, se procede a realizar un análisis en base a las propiedades mecánicas del material utilizado en la fabricación.

3.3.1.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DISEÑO DE Balsa PROPUESTA 6

En la **figura 3.2** se muestra el diseño realizado con este material.

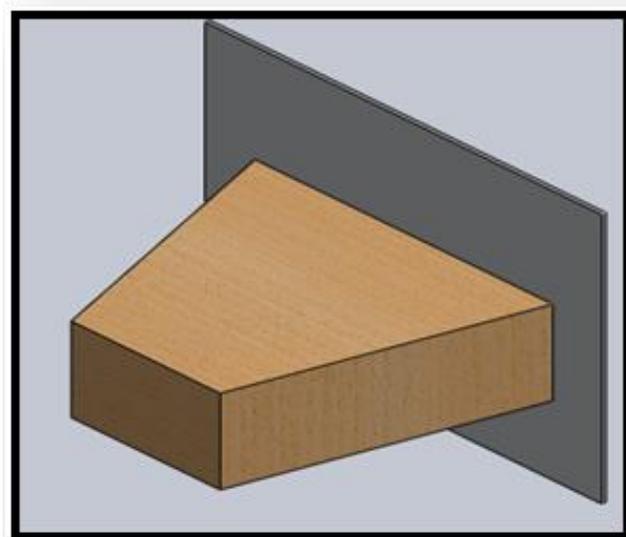


Figura 3. 2. *Atenuador de impacto (propuesta 6).*

Fuente: *Autores.*

Las propiedades de este material están detalladas en el capítulo I.

3.3.1.1.1. ANÁLISIS VON MISES

En la **tabla 3-1**. Se muestra los valores máximo y mínimo de tensiones von mises.

Tabla 3- 1. *Análisis Von Mises (propuesta 6).*
Fuente: Autores.

Nombre	Tipo	Min (GPa)	Ubicación (nodo)	Max (GPa)	Ubicación (nodo)
Stress	VON: Von Misses	0	1399	2.75	450

Como se puede observar en la **figura 3.3** está representado el esfuerzo equivalente según la teoría de Von Mises.

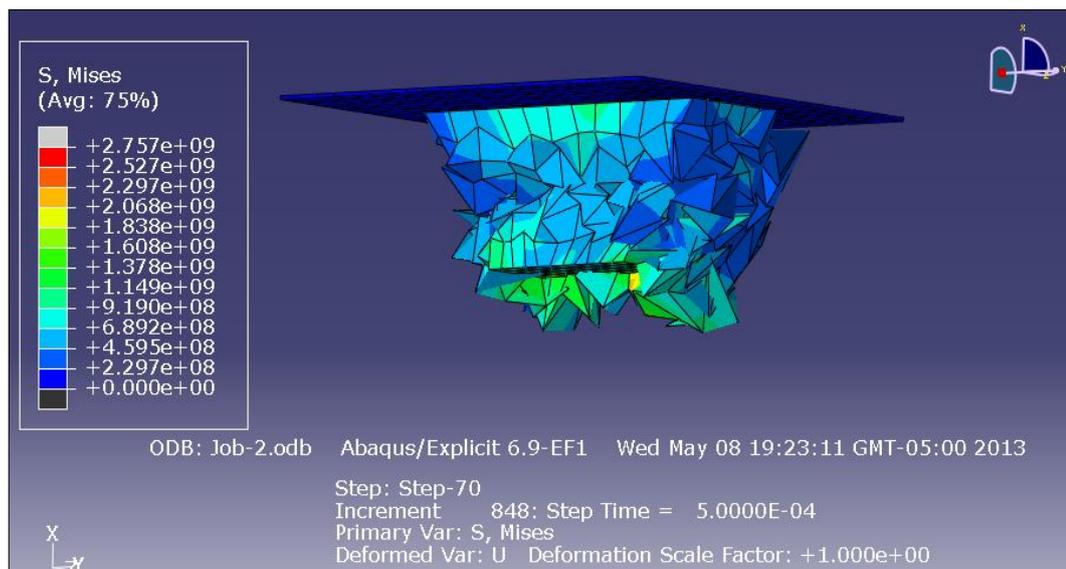


Figura 3. 3. *Grafica Von Mises.*

Fuente: Autores.

Los resultados vienen dado en Giga pascales, así el color rojo representa los puntos y las zonas con mayor sollicitación de carga, el color amarillo y verde zonas en donde la sollicitación de carga es media, mientras que el color azul indica las zonas donde el material tiene una carga mínima.

Como se observa en la gráfica los valores de deformación oscila entre 0 y 2.75 GPa.

El contorno del atenuador se encuentra con una carga mínima que este caso es de 0.22 GPa, en la parte frontal se encuentra una carga media de 1.60 GPa y en la parte central está el máximo valor de deformación que es de 2.757 GPa y el mismo no excede el valor máximo de rotura de 4.1 GPa, produciéndose una deformación elástica y lo que se concluye que el material no fallara según esta teoría.

3.3.1.1.2. ANÁLISIS DESPLAZAMIENTO –TIEMPO

En la **tabla 3-2** se muestra el desplazamiento máximo dado en el atenuador.

Tabla 3- 2. Desplazamiento (propuesta 6).

Fuente: Autores.

Nombre	Tipo	Max (mm)
Desplazamiento	URES : desplazamiento resultante	215.4

En la **figura 3.4** se muestra el desplazamiento producido en el atenuador propuesta 5.

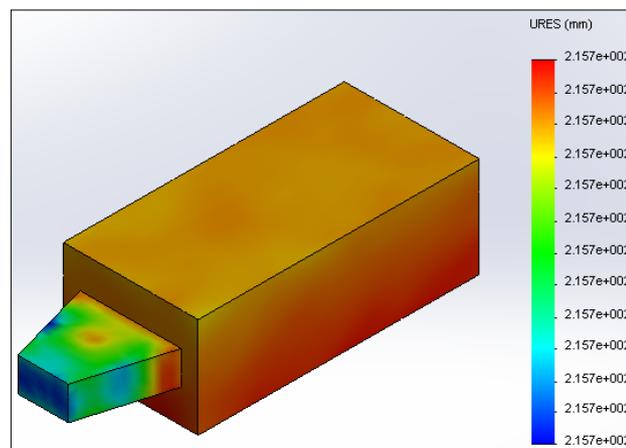


Figura 3. 4. Desplazamiento (propuesta 6).

Fuente: Autores.

Como se puede observar en la **figura 3.5** el desplazamiento total es de 215.4 mm, siendo un valor menor al total del atenuador que es de 260mm, lo cual permite tener 44.6 mm de material sobrante antes del contacto con el mamparo frontal.

Se puede observar que al inicio tiene una zona en donde se produce un desplazamiento negativo debido a que el material amortigua al producirse el impacto.

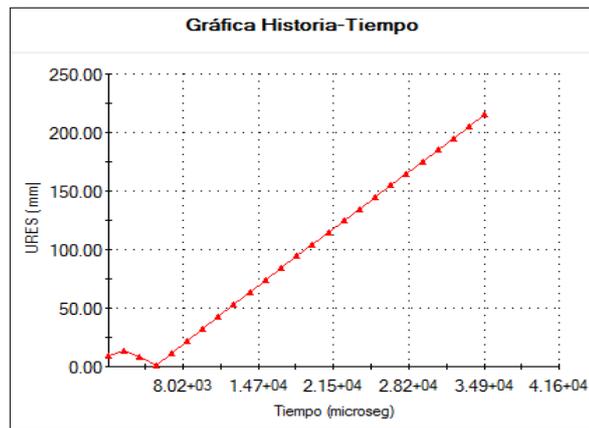


Figura 3. 5. Grafica Desplazamiento-Tiempo.

Fuente: Autores.

3.3.1.1.3. ANÁLISIS ENERGÍA-TIEMPO

Como se puede observar en la **figura 3.6** está representada la energía total de absorción del atenuador de balsa propuesta 5.

Los resultados vienen dado en Joule (J) y como se observa el máximo valor es de 7800 J y el mismo que es mayor al valor mínimo impuesto en la norma de 7350 J lo que se concluye que este diseño si absorbe la energía necesaria.

Se tiene que existe un tiempo de 0.010 segundos en el que el material se comprime y por ende no existe energía de absorción.

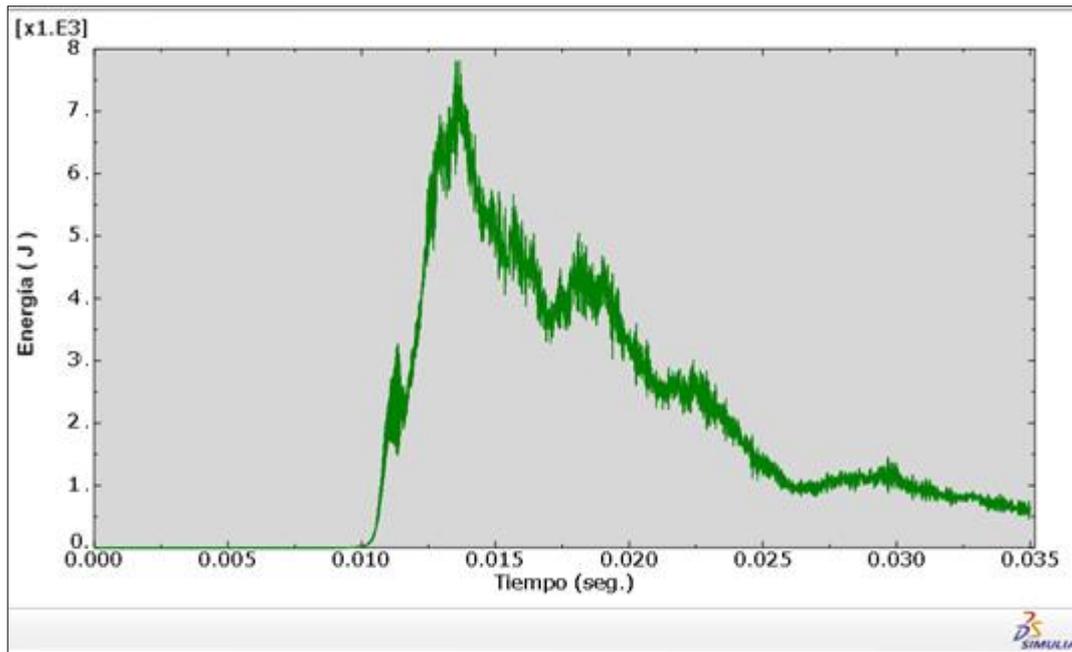


Figura 3. 6. Grafica Energía Total –Tiempo.

Fuente: Autores.

3.3.1.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA)

7

En la **figura 3.7** se muestra el diseño de realizado con el material de balsa.

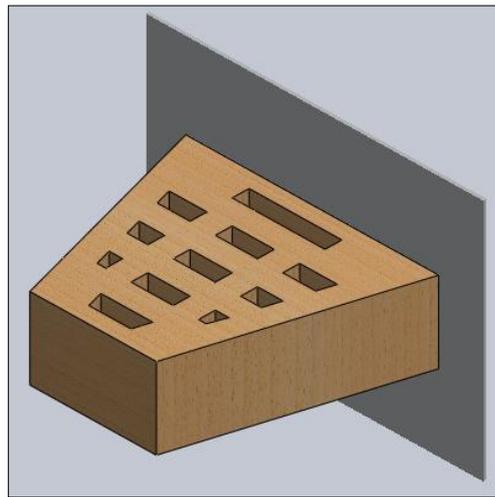


Figura 3. 7. Atenuador de balsa (Propuesta 7).

Fuente: Autores.

El material utilizado es la balsa al igual que la propuesta anterior y sus propiedades esta detallado en el capítulo I.

3.3.1.2.1. ANÁLISIS VON MISES

En la **tabla 3-3** se muestra los valores máximo y mínimo de tensiones von mises.

Tabla 3- 3. Resultados Von Mises (Propuesta 7).

Fuente: Autores.

Nombre	Tipo	Min (GPa)	Ubicación (nodo)	Max (GPa)	Ubicación (nodo)
Stress	VON: Von Misses	0	1120	1.43	265

Como se puede observar en la **Figura 3.8** está representado el esfuerzo equivalente según la teoría de Von Mises.

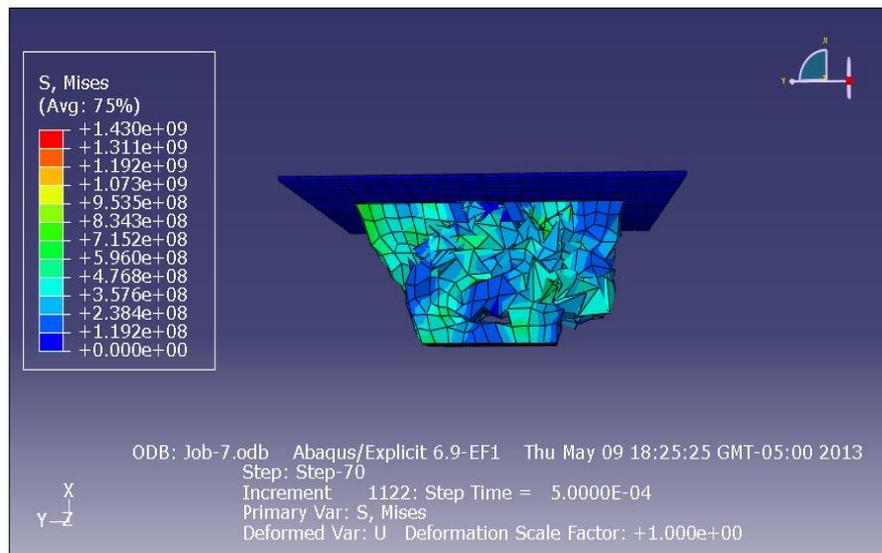


Figura 3. 8. Grafica Von Mises.

Fuente: Autores.

Los resultados vienen dado en Giga pascales, así el color rojo representa los puntos y las zonas con mayor sollicitación de carga, el color amarillo y verde zonas en donde la sollicitación de carga es media, mientras que el color azul indica las zonas donde el material tiene una carga mínima.

Como se observa en la gráfica los valores de deformación oscila entre 0 y 1.43 GPa.

Existe zonas del atenuador que encuentra con una carga mínima que este caso es de 0.19 GPa, en la parte posterior se encuentra una carga media de 0.71 GPa y en la parte central está el máximo valor de deformación que es de 1.43 GPa y el mismo no excede el valor máximo de rotura de 4.1 GPa, produciéndose una deformación elástica y lo que se concluye que el material no fallara según esta teoría.

3.3.1.2.2. ANÁLISIS DESPLAZAMIENTO –TIEMPO

En la **tabla 3-4** se muestra el desplazamiento máximo producido en el atenuador.

Tabla 3- 4. *Desplazamiento (Propuesta 7).*

Fuente: Autores.

Nombre	Tipo	Max (mm)
Desplazamiento	URES : desplazamiento resultante	212.4

En la **figura 3.9** se muestra el desplazamiento producido en el atenuador en función del tiempo de impacto.

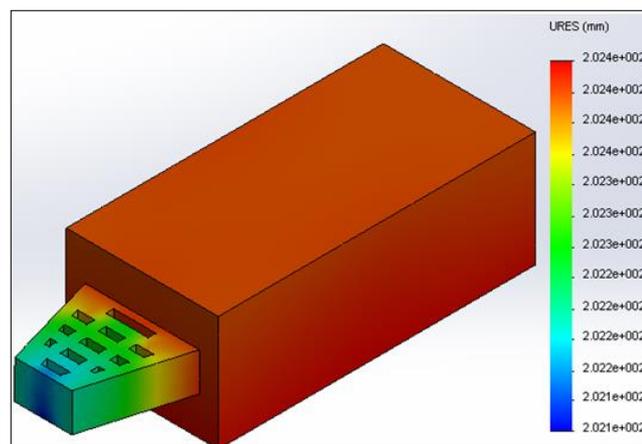


Figura 3. 9. *Desplazamiento (Propuesta 7).*

Fuente: Autores.

En la **figura 3.10** se muestra el valor de desplazamiento que viene dado en mm y se tiene que es de 212.4 mm lo que se puede decir que no llega al valor máximo de 260mm dados en el diseño, por tanto el mamparo no llegara a ser contacto al momento de una colisión.

Se puede observar que al inicio tiene una zona en donde se produce un desplazamiento negativo debido a que el material amortigua al producirse el impacto. Tiene un desplazamiento lineal.

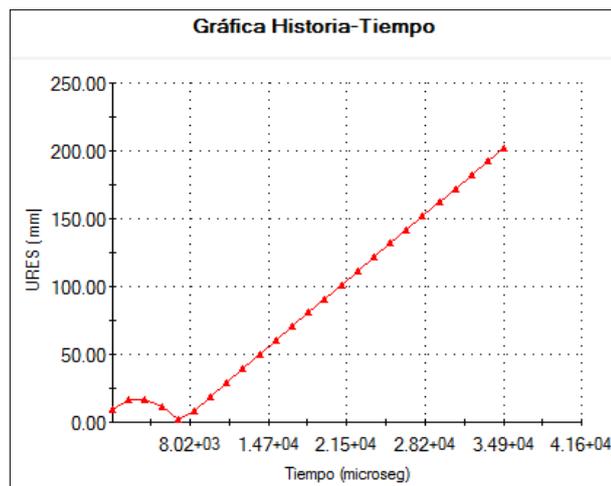


Figura 3. 10. Grafica Desplazamiento-Tiempo (Propuesta 7).

Fuente: Autores.

3.3.1.2.3. ANÁLISIS ENERGÍA TOTAL –TIEMPO

Como se puede observar en la **figura 3.11** está representada la energía total de absorción del atenuador de balsa (propuesta 7), para ello se toma el análisis de uno de los nodos de la simulación.

Los resultados vienen dado en Joule (J), y como se observa el máximo valor es de 37000 J y el mismo que es mayor al valor mínimo impuesto en la norma de 7350 J lo que se concluye que este diseño si absorbe la energía necesaria. Se puede observar que existe un tiempo de 0.009 segundos en donde no existe absorción de energía ya que el material amortigua el impacto, luego tiene un pico máximo de 37000 J que es el valor máximo de absorción que paulatinamente disminuye manteniéndose en un valor aproximado de 5500J.

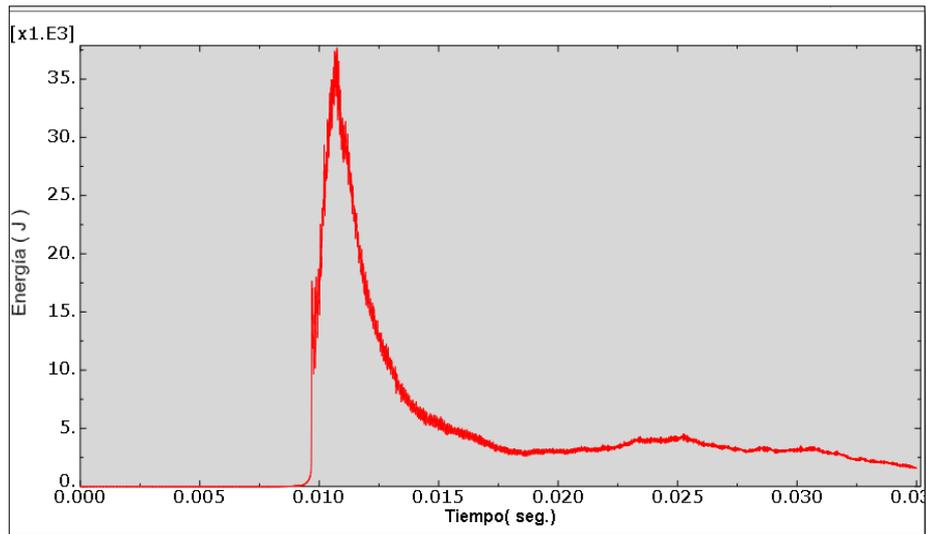


Figura 3. 11. *Grafica Energía Total –Tiempo (Propuesta 7).*
Fuente: Autores.

3.3.1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS CON MATERIAL DE ALUMINIO Y POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3)

En la **figura 3.12** se muestra el diseño de aluminio y poliestireno expandido.

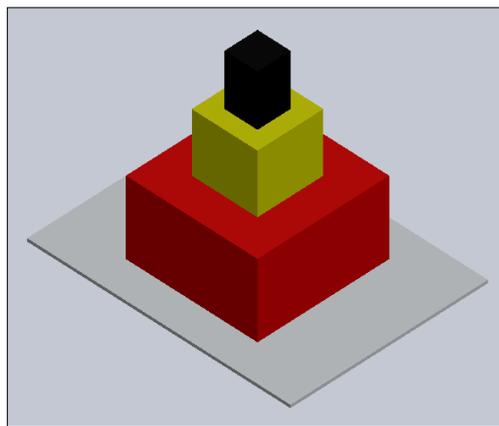


Figura 3. 12. *Atenuador diseño con material de aluminio-poliestireno expandido.*
Fuente: Autores.

Las propiedades del aluminio y el poliestireno expandido esta detallado en el capítulo I.

3.3.1.3.1. ANÁLISIS VON MISES

En la **tabla 3-5** se muestra los valores máximo y mínimo de tensiones von mises.

Tabla 3- 5. Resultados Von Mises (aluminio).

Fuente: Autores.

Nombre	Tipo	Min (GPa)	Ubicación (nodo)	Max (GPa)	Ubicación (nodo)
Stress	VON: Von Misses	8.07	1320	6.75	245

Como se puede observar en la **figura 3.13** está representado el esfuerzo equivalente según la teoría de Von Mises.

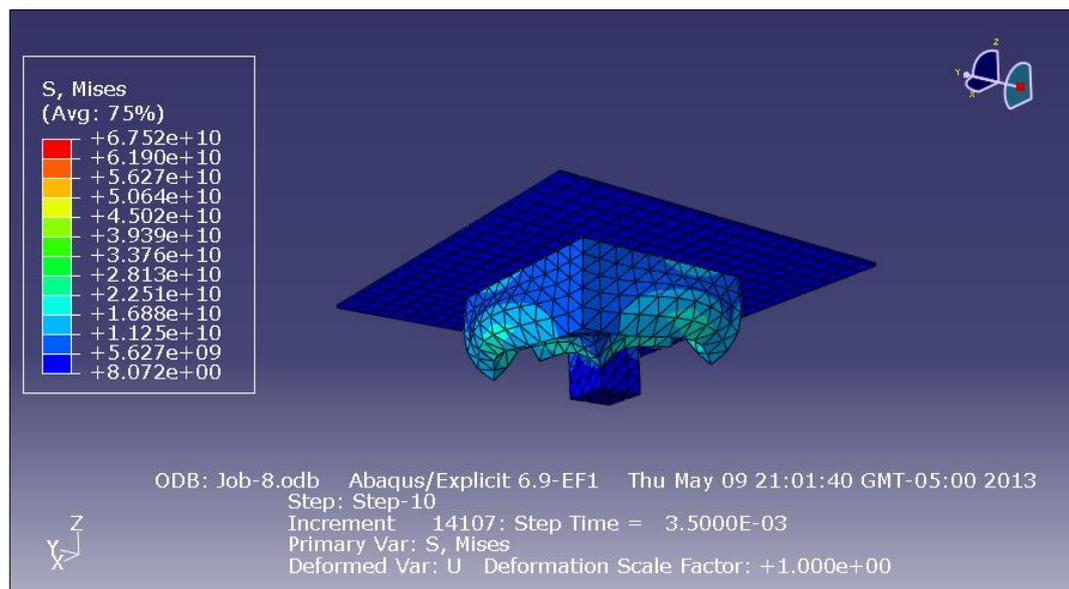


Figura 3. 13. Grafica Von Mises.

Fuente: Autores.

Los resultados vienen dado en Giga pascales, así el color rojo representa los puntos y las zonas con mayor sollicitación de carga, el color amarillo y verde zonas en donde la sollicitación de carga es media, mientras que el color azul indica las zonas donde el material tiene una carga mínima.

Como se observa en la gráfica los valores de deformación oscila entre 0 y 67 GPa.

Existe zonas del atenuador que encuentra con una carga mínima; como es el caso del cubo de la parte superior de este diseño, que en este caso es de 5.6 GPa, está en la parte del segundo cubo se encuentra una carga media de 39 GPa y en la parte central está el máximo valor deformación que es de 67 GPa y el mismo no excede el valor máximo de rotura de 70 GPa, pero que esta próximo y por ende existe una deformación máxima y llegando a la zona próxima a la rotura.

3.3.1.3.2. DESPLAZAMIENTO –TIEMPO

En la **Tabla 3-6** se muestra el desplazamiento máximo producido en el atenuador.

Tabla 3- 6. *Desplazamiento (aluminio-poliestireno).*

Fuente: *Autores.*

Nombre	Tipo	Max (mm)
Desplazamiento	URES : desplazamiento resultante	198

En la **figura 3.14** se muestra el desplazamiento producido en el atenuador en función del tiempo de impacto con la escala de valores.

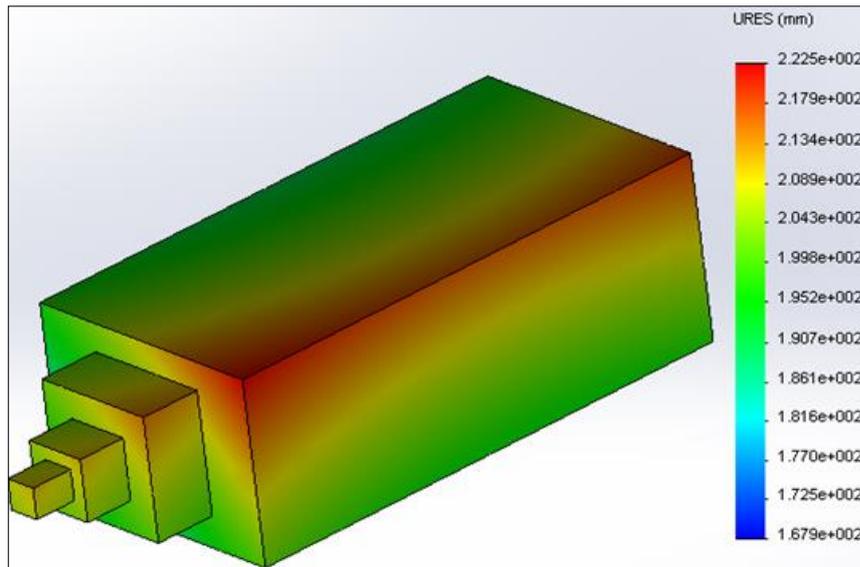


Figura 3. 14. Desplazamiento atenuador de aluminio-poliestireno expandido.

Fuente: Autores.

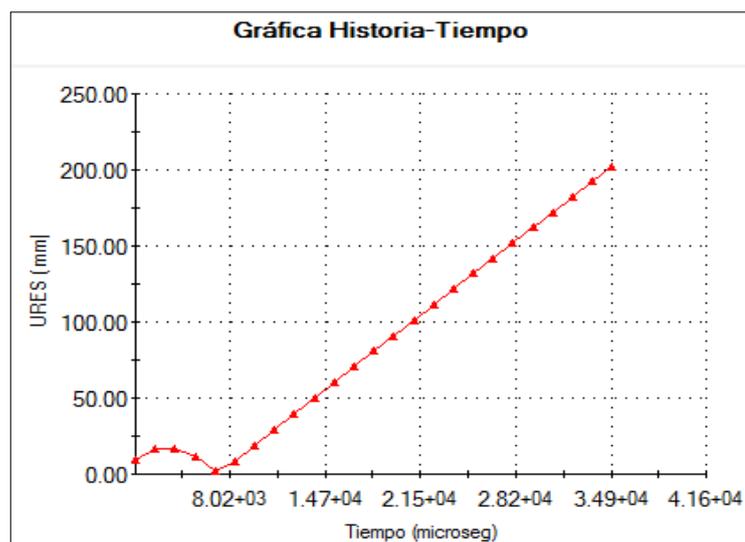


Figura 3. 15. Grafica Desplazamiento-Tiempo (Aluminio-poliestireno).

Fuente: Autores.

En la **figura 3.15** se muestra el valor de desplazamiento que viene dado en mm y se tiene que su desplazamiento es de 198 mm lo que se puede decir que no llega al valor máximo de 250mm dados en su diseño, por tanto el mamparo no llegara a ser contacto al momento de una colisión.

3.3.1.3.3. ANÁLISIS ENERGÍA TOTAL –TIEMPO

Como se puede observar en la **figura 3.16** está representada la energía total de absorción del atenuador de aluminio-poliestireno expandido (Propuesta 3), para ello se toma el análisis de uno de los nodos de la simulación.

Los resultados vienen dado en Joule (J) y como se observa el máximo valor es de 25000 J y el mismo que es mayor al valor mínimo impuesto en la norma de 7350 J lo que se concluye que este diseño si absorbe la energía necesaria. Cabe señalar que el valor de es ascendente y por tanto a medida que se deforma sigue absorbiendo energía.

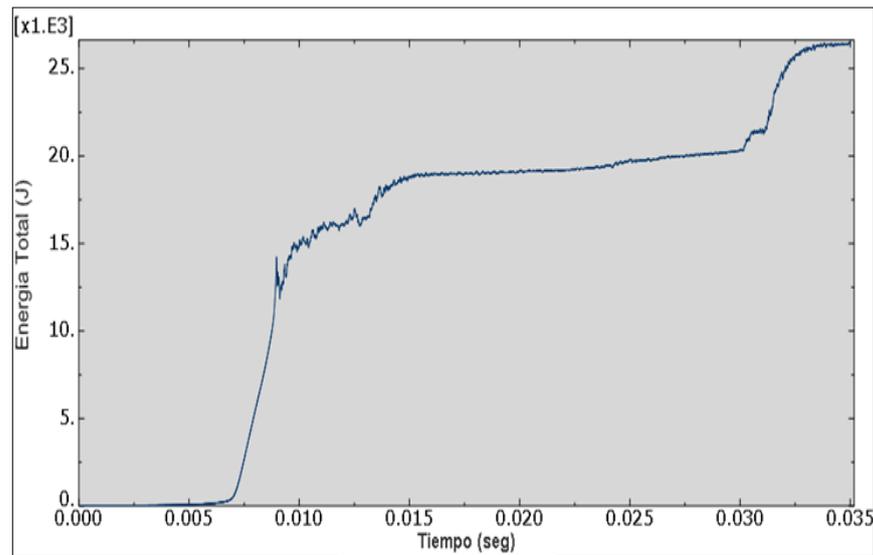


Figura 3. 16. Grafica Energía Total –Tiempo (Propuesta 3).

Fuente: Autores.

3.3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DINÁMICOS (PRUEBAS DE IMPACTO)

En este análisis se toma los resultados obtenidos en el impacto de los tres atenuadores en el banco de pruebas detallado en el capítulo II.

3.3.2.1. MEDICIÓN DEL MATERIAL RESIDUAL

Se realiza la medición de la cantidad de material residual en el mamparo de aluminio con la finalidad de comparar los resultados de desplazamiento total dado en software con las pruebas reales realizadas y verificar la concordancia de resultados.

Por lo expuesto se obtienen los siguientes resultados:

3.3.2.1.1. ATENUADOR DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 6)

En la **figura 3.17** se muestra el atenuador fabricado (a) y el deformado (b)

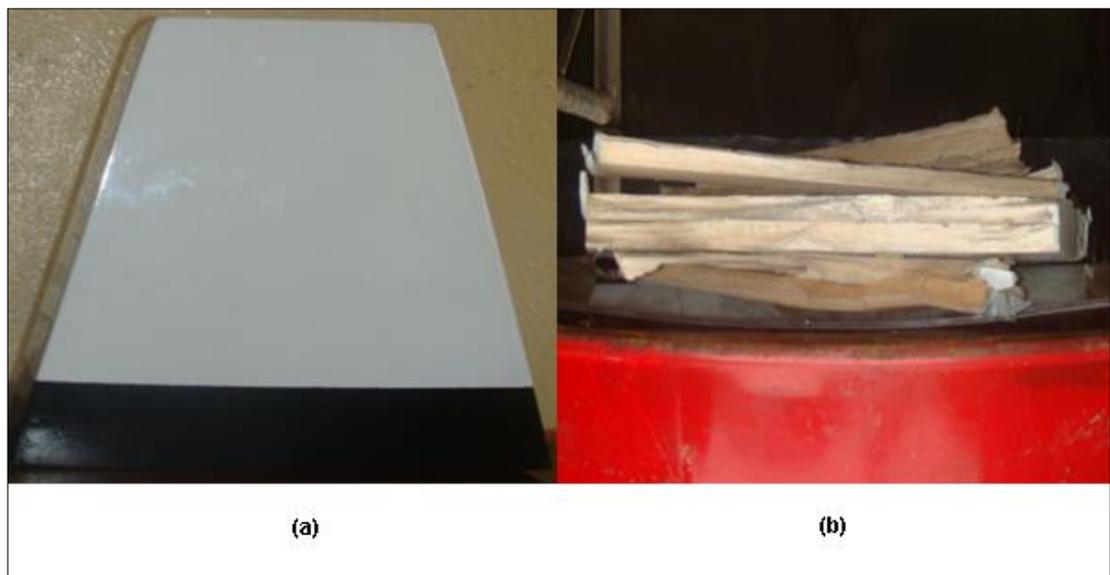


Figura 3. 17. *Atenuador Balsa (propuesta 6) :(a) Atenuador fabricado, (b). Atenuador deformado*

Fuente: Autores.

Como se puede observar en la **figura 3.17 (a)** existe dos zonas señaladas en el atenuador, una de color blanco que tiene una medida total de 220mm y la de color negro que tiene una altura de 40 mm, siendo esta la zona más crítica de todo el atenuador.

En la **figura 3.18** se puede observar que existe material residual en el mamparo y con la ayuda de un calibrador se mide la altura de material en diferentes puntos para sacar una media aritmética y así obtener un valor aproximado.



Figura 3. 18. *Medición de material.*

Fuente: *Autores.*

En la **tabla 3-7** se detalla las mediciones tomadas del material sobrante.

Tabla 3- 7. *Medición material (propuesta 5).*

Fuente: *Autores.*

Número de puntos	Medida con calibrador (mm)
1	78
2	74
3	71
4	65
5	58
6	69
7	73
8	75
9	64
10	51

Ahora se realiza una media aritmética para encontrar un valor promedio de cantidad de material sobrante así tenemos:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N} \quad (3.1)^1$$

¹ Manuel Vivanco. Muestreo estadístico. Diseño y Aplicaciones. 1ra edición. 2005 Pág. 37.

En donde:

\bar{x} = Media aritmética.

$\sum_{i=1}^n X_i$ = Sumatoria de los puntos de muestra.

N = Numero de elementos de muestra.

Así la cantidad de material residual es:

$$\bar{x} = \frac{78 + 74 + 71 + 65 + 58 + 69 + 73 + 75 + 64 + 51}{10}$$

$$\bar{x} = 67.8 \text{ mm}$$

Este valor es el total de material residual, medido hasta el mamparo frontal. Cabe señalar que se debe restar el valor de deformación producido en el mamparo al momento del impacto dinámico, que en este diseño es de 12mm y el espesor del elemento de referencia que es una plancha de madera de 3mm, por lo tanto su valor residual de material es 52.8mm.

Se tiene un desplazamiento de material de 201.2 mm, que es la resta de su valor total (260mm), con su valor residual (52.8mm), por lo que no existe contacto con el mamparo frontal del vehículo monoplaza.

3.3.2.1.2. ATENUADOR DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 7)

En la **figura 3.19** se muestra el atenuador fabricado (a) y el deformado (b).

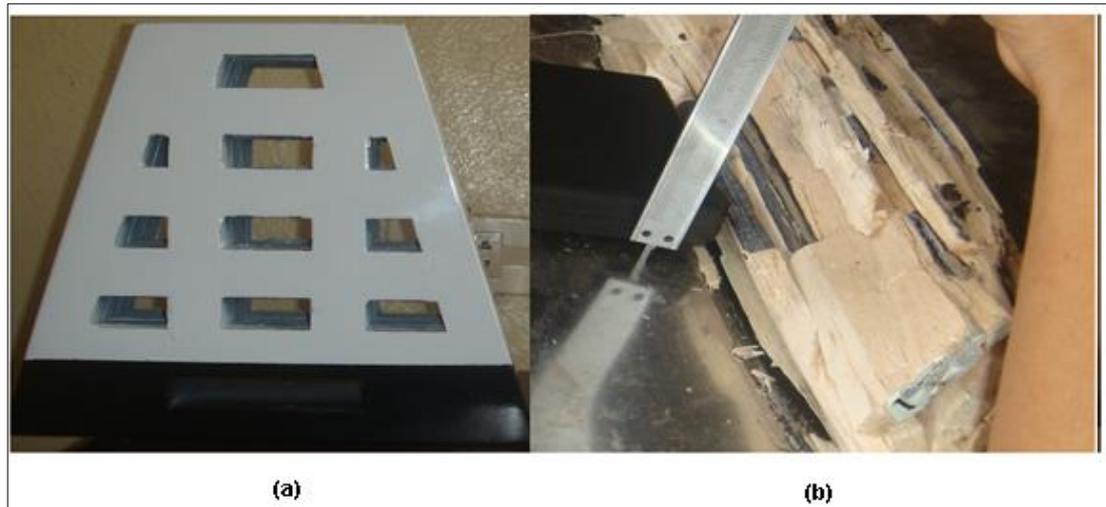


Figura 3. 19. *Atenuador Balsa (propuesta 7). :(a) Atenuador fabricado, (b). Atenuador deformado*

Fuente: *Autores.*

Como se puede observar en la **figura 3.19 (a)** existe dos zonas señaladas en el atenuador, una de color blanco que tiene una medida total de 200mm y la de color negro que tiene una altura de 60 mm, siendo esta la zona más crítica de todo el atenuador. Las medidas son las mismas del diseño anterior, solo varia su diseño interno.

En la **figura 3.20** se puede observar que existe material residual en el mamparo y con la ayuda de un calibre se mide la altura de material en diferentes puntos para sacar una media aritmética y así obtener un valor aproximado.



Figura 3. 20. *Medición de material.*

Fuente: *Autores.*

En la **tabla 3-8** se detalla las mediciones tomadas del material sobrante.

Tabla 3- 8. *Medición material (diseño dos).*

Fuente: *Autores.*

Número de puntos	Medida con calibrador (mm)
1	58
2	53
3	51
4	49
5	42
6	53
7	55
8	51
9	46
10	51

Ahora se realiza una media aritmética para encontrar un valor promedio de cantidad de material sobrante así tenemos:

$$\bar{x} = \frac{58 + 53 + 51 + 49 + 42 + 53 + 55 + 51 + 46 + 51}{10}$$

$$\bar{x} = 50.9 \text{ mm}$$

Este valor es el total de material residual, medido hasta el mamparo frontal. Cabe señalar que se debe restar el valor de deformación producido en el mamparo al momento del impacto dinámico, que en este diseño es de 3.5 mm y el espesor del elemento de referencia que es una plancha de madera de 3mm, por lo tanto su valor residual de material es 44.4 mm.

Se tiene un desplazamiento de material de 209.6 mm, que es la resta de su valor total (260mm), con su valor residual (44.4mm), por lo que no existe contacto con el mamparo frontal del vehículo monoplaza.

3.3.2.1.3. ATENUADOR DE ALUMINIO Y POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3)

En la **figura 3.21** se muestra el atenuador fabricado (a) y el deformado (b).



Figura 3. 21. *Atenuador Aluminio-Poliestireno Expandido. :(a) Atenuador fabricado, (b). Atenuador deformado*

Fuente: *Autores.*

Como se puede observar en la **figura 3.21 (a)** existe tres zonas señaladas en el atenuador, una de color negro que tiene una medida total de 70 mm, otra la de color amarillo que tiene una altura de 80 mm y por ultimo una sección de color rojo que tiene una medida total de 100 mm, que nos servirán como referencia para la posterior medición.

En la **figura 3.22** se puede observar que existe material deformado en el mamparo y con la ayuda de un calibrador se mide la altura de material en diferentes puntos para sacar una media aritmética y así obtener un valor aproximado.



Figura 3. 22. *Medición de atenuador de Aluminio-Poliestireno Expandido.*

Fuente: *Autores.*

En la **tabla 3-9** se detalla las mediciones tomadas del material sobrante.

Tabla 3- 9. *Medición material (Aluminio).*

Fuente: *Autores.*

Número de puntos	Medida con calibrador (mm)
1	105
2	103
3	105
4	100
5	104
6	114
7	98.5
8	106
9	107
10	90

Ahora se realiza una media aritmética para encontrar un valor promedio de cantidad de material restante así tenemos.

$$\bar{x} = \frac{105 + 103 + 105 + 100 + 104 + 114 + 98.5 + 106 + 170 + 90}{10}$$

$$\bar{x} = \mathbf{102.8mm}$$

Este valor es el total de material residual, medido hasta el mamparo frontal. Cabe señalar que se debe restar el valor de deformación producido en el mamparo al momento del impacto dinámico , que en este diseño es de 27 mm y el espesor del elemento de referencia que en este caso es una plancha de madera de 3mm Por lo tanto su valor residual de material es de 72.8 mm.

Se tiene un desplazamiento de material de 171.2 mm, que es la resta de su valor total (250mm), con su valor residual (72.8 mm), por lo que no existe contacto con el

mamparo frontal del vehículo monoplaza. Se puede decir que al tener menos deformación de material va a reducirse su valor de absorción de energía

3.3.2.2. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LOS MAMPAROS FRONTALES

A continuación se realiza un análisis de la deformación de los mamparos sufrido al momento del impacto.

Este es un parámetro tomado en cuenta para la selección del atenuador, ya que lo que se requiere es un mínimo de deformación para que no sufra daño al monoplaza y principalmente al piloto y que el atenuador sea el que absorba toda la energía dada en el impacto.

3.3.2.2.1. MAMPARO ATENUADOR DISEÑO DE Balsa (PROPUESTA 6)

En la **figura 3.23** se muestra la deformación del mamparo tanto en simulación **(a)** como en la prueba realizada **(b)**.

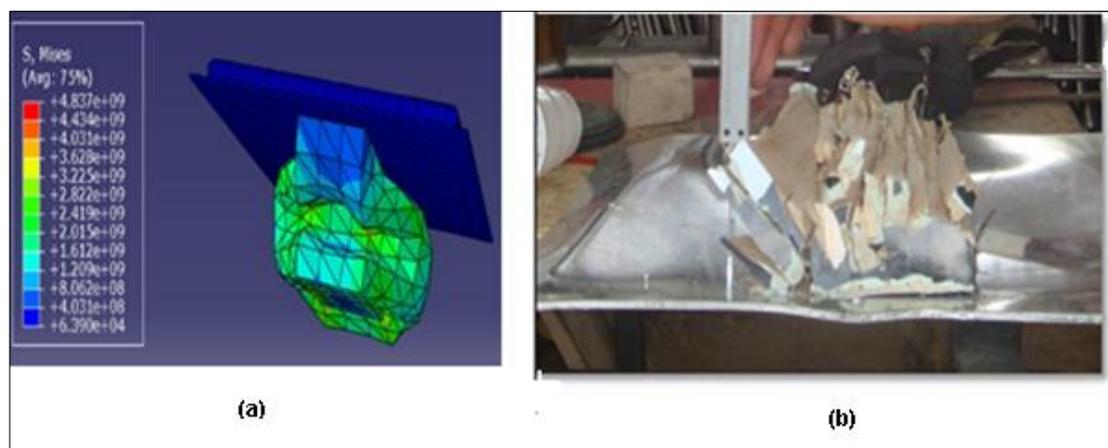


Figura 3. 23. Mamparo (propuesta 6) :(a) simulación, (b). Mamparo deformado.

Fuente: Autores.

Como se puede observar en la **figura 3.23 (a)**, el mamparo tiene un valor mínimo de carga (6.3 GPa), el mismo que no sobrepasa el módulo de elasticidad de 70 GPa que tiene el material de aluminio. Toda la carga la está soportada por el atenuador.

Existe una deformación del mamparo como se puede observar en la **figura 3.23 (b)** y al realizar su medición luego de las pruebas dinámicas se tiene que es de 12 mm.

En la figura 3.24 , imagen **(a)** y **(b)** , en el eje Y , se muestra el valor del mamparo sin deformar y deformado respectivamente, realizado en la simulacion.

Name: _U:Magnitud PE: PART-1-1 N: 1921			Name: _U:Magnitud PE: PART-3-1 N: 1921		
	X	Y		X	Y
1461	0.0353662	0.114481	1461	0.0353662	0.126393
1462	0.0353917	0.114429	1462	0.0353917	0.126403
1463	0.0354171	0.114469	1463	0.0354171	0.126397
1464	0.0354425	0.114479	1464	0.0354425	0.126369
1465	0.0354679	0.114629	1465	0.0354679	0.12633
1466	0.0354933	0.114615	1466	0.0354933	0.126307
1467	0.0355187	0.114608	1467	0.0355187	0.126308
1468	0.0355442	0.114618	1468	0.0355442	0.126313
1469	0.0355696	0.114624	1469	0.0355696	0.126311
1470	0.035595	0.11465	1470	0.035595	0.126307

Figura 3. 24. Mamparo (propuesta 6) :(a) Valor de mamparo sin deformar, (b). Valor de mamparo deformado. unidad de medida (metros).

Fuente: Autores.

En nuestro caso el valor máximo sin deformar es de 114.65 mm y deformado de 126.307mm.Realizando la resta de los dos se obtiene el desplazamiento del mamparo que es de 11.65 mm.

Por tanto se tiene que existe un rango de 2.91% de error entre la simulacion y el impacto real realizado.

3.3.2.2.2. MAMPARO ATENUADOR DISEÑO DE BALSA (PROPUESTA 7)

En la **figura 3.25 (a)**, se muestra el mamparo realizado en software, el mismo que tiene un valor mínimo de carga (0.56 GPa), que no sobrepasa el módulo de elasticidad de 70 GPa que tiene el material de aluminio. Toda la carga la está soportada por el atenuador.

Existe una deformación del mamparo como se puede observar en la **figura 3.25 (b)** y al realizar su medición luego de las pruebas dinámicas se tiene que es de 3.5 mm.



Figura 3. 25. Mamparo (propuesta 7) :(a) simulación, (b). Mamparo deformado

Fuente: Autores.

En la **figura 3.26** imagen (a) y (b) ,en el eje Y , se muestra el valor del mamparo sin deformar y deformado respectivamente,realizado en la simulacion.

Name: _U:Magnitude P1: PART-2-1 N: 2286			Name: _U:Magnitude P1: PART-2-1 N: 2286		
	X	Y		X	Y
1415	0.0348001	0.12168	1415	0.0348001	0.12358
1416	0.0348251	0.12168	1416	0.0348251	0.123577
1417	0.0348501	0.121537	1417	0.0348501	0.123694
1418	0.0348751	0.121359	1418	0.0348751	0.123868
1419	0.0349001	0.121187	1419	0.0349001	0.124069
1420	0.034925	0.121053	1420	0.034925	0.124288
1421	0.03495	0.120984	1421	0.03495	0.124517
1422	0.034975	0.120982	1422	0.034975	0.124545
1423	0.035	0.120982	1423	0.035	0.124545
1424	0.035	0.120982	1424	0.035	0.124545

(a)

(b)

Figura 3. 26. Mamparo (propuesta 7) :(a) Valor de mamparo sin deformar, (b). Valor de mamparo deformado unidad de medida (metros).

Fuente: Autores.

En nuestro caso el valor máximo sin deformar es de 120.982 mm y deformado de 124.545mm.Realizando la resta de los dos se obtiene el desplazamiento del mamparo que es de 3.563 mm.

Por tanto se tiene que existe un rango de 2.8% de error entre la simulacion y el impacto real realizado.

3.3.2.2.3. MAMPARO ATENUADOR DISEÑO DE ALUMINIO Y POLIESTIRENO EXPANDIDO (PROPUESTA 3)

En la **figura 3.27 (a)**, se muestra la deformación del mamparo en software, su valor de carga media es de 51 GPa, produciendo una deformación permanente pero que no sobrepasa el módulo de elasticidad de 70 GPa que tiene el material de aluminio.

En este caso el atenuador no se deforma en su totalidad y por ende transmite la energía hacia el mamparo.

Existe una deformación del mamparo como se puede observar en la **figura 3.27 (b)** y al realizar su medición luego de las pruebas dinámicas se tiene que es de 27 mm.

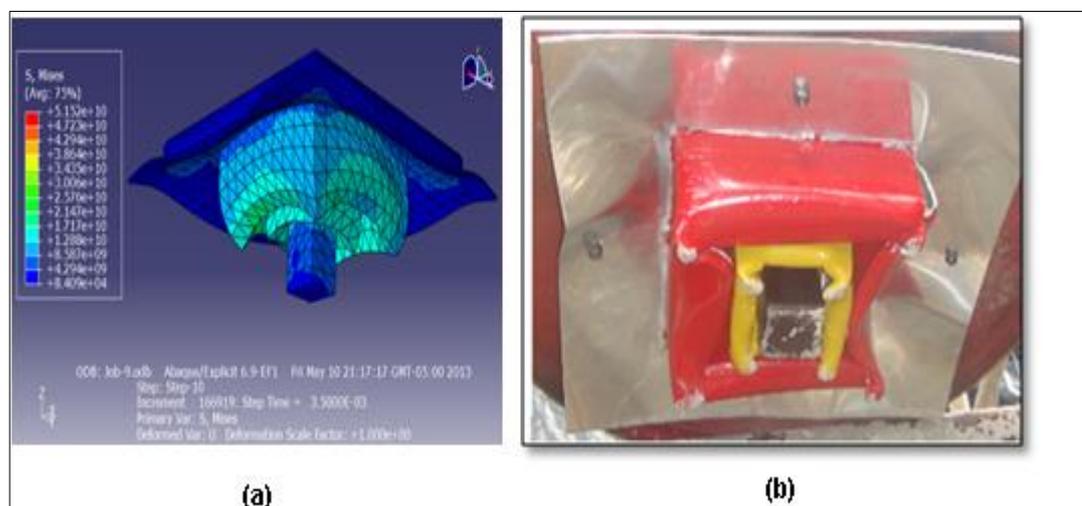


Figura 3. 27. Mamparo (Propuesta 3) :(a) simulación, (b). Mamparo deformado

Fuente: Autores.

En la **figura 3.28** imagen (a) y (b) ,en el eje Y , se muestra el valor del mamparo sin deformar y deformado respectivamente,realizado en la simulacion.

Name: _U:Magnitudo PE: PART-1-1 N: 2075			Name: _U:Magnitudo PE: PART-1-1 N: 2173		
	X	Y		X	Y
193	0.0336	0.100776	193	0.0336	0.121692
194	0.033775	0.100786	194	0.033775	0.121801
195	0.03395	0.100936	195	0.03395	0.125879
196	0.034125	0.101307	196	0.034125	0.125053
197	0.0343	0.101203	197	0.0343	0.125145
198	0.034475	0.101224	198	0.034475	0.15325
199	0.03465	0.101558	199	0.03465	0.127403
200	0.034825	0.101649	200	0.034825	0.127479
201	0.035	0.101803	201	0.035	0.127648
202	0.035	0.101803	202	0.035	0.127648

(a) (b)

Figura 3. 28. Mamparo (propuesta 3) :(a) Valor de mamparo sin deformar, (b). Valor de mamparo deformado. Unidad de medida (metros).

Fuente: Autores.

En nuestro caso el valor máximo sin deformar es de 127.64 mm y deformado de 102.803mm.Realizando la resta de los dos se obtiene el desplazamiento del mamparo que es de 25.84 mm.

Por tanto se tiene que existe un rango de 4.3% de error entre la simulacion y el impacto real realizado, debido a las características de material y al mecanizado realizado en el mismo.

Se tiene por tanto que al tener mayor material residual del atenuador, el mamparo ha sufrido una deformación elevada y la misma afecta al piloto al producirse la colisión.

3.3.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

3.3.3.1 COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE ATENUADORES

Tabla 3- 10. Comparación de desplazamiento de atenuadores
Fuente: Autores.

ATENUADORES	Desplazamiento en Simulación (mm)	Desplazamiento en Pruebas Dinámicas (mm)
Propuesta 3	198	171.2
Propuesta 6	215.4	201.2
Propuesta 7	202.4	209.6

Como podemos ver en la **tabla 3- 10** tenemos los valores obtenidos tanto en la simulación como en la práctica, a continuación se muestran valores en porcentaje de error para cada propuesta indicada:

- **Propuesta 3:** Se da un porcentaje de error del 13.53 %, entre los valores de desplazamiento tanto estáticos como dinámicos realizados.

Análisis: Se puede decir que este porcentaje de error se da por varios parámetros, entre los cuales tenemos:

- En la simulación de software, se utilizó las características tanto físicas como mecánicas de un material de aluminio puro.
- No se tomó en cuenta para la simulación los puntos de unión con suelda.
- Al colocar dentro del atenuador, el material de poliestireno expandido, este no cubre algunas zonas internas en su totalidad.
- Por su diseño estructural, hay una diferencia entre las simulación la construcción, ya que en este último se procede a realizarlo por partes.

- **Propuesta 6:** Se da un porcentaje de error del 6.5 %, entre los valores de desplazamiento tanto estáticos como dinámicos realizados.

Análisis: Se puede decir que este porcentaje de error es aceptable ya que se tiene que:

- Los valores de desplazamiento tanto en simulación como en la prueba dinámica son similares.
- Se puede dar el error por el sentido de las fibras del material, para las pruebas dinámicas se coloca las mismas en sentido de compresión, pero en la simulación no se lo puede elegir.

- **Propuesta 7:** Se da un porcentaje de error del 3.5 %, entre los valores de desplazamiento tanto estáticos como dinámicos realizados.

Análisis: Se puede decir que este porcentaje de error es aceptable ya que se tiene que:

- Los valores de desplazamiento tanto en simulación como en la prueba dinámica son similares.
- Su error se debe a que en su mecanizado existen puntos críticos (aristas de corte).

3.3.3.2 COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE MAMPAROS

Como podemos ver en la **tabla 3- 11** tenemos los valores obtenidos tanto en la simulación como en la práctica,

Tabla 3- 11. Comparación de desplazamiento de atenuadores
Fuente: Autores.

MAMPAROS DE ATENUADORES	Desplazamiento en Simulación (mm)	Desplazamiento en Pruebas Dinámicas (mm)
Propuesta 3	25.84	27
Propuesta 6	11.65	12
Propuesta 7	3.56	3.5

A continuación se muestran valores en porcentaje de error para cada propuesta indicada:

- **Propuesta 3:** Se da un porcentaje de error del 4.3 % en la comparación de desplazamiento del mamparo.
- **Propuesta 6:** Se da un porcentaje de error del 2.91 % en la comparación de desplazamiento del mamparo.
- **Propuesta 7:** Se da un porcentaje de error del 2.8 % en la comparación de desplazamiento del mamparo.

Análisis: Se puede decir que estos porcentajes de error son aceptables entre los valores de análisis en software como los dinámicos reales. Para los tres mamparos se utilizó el mismo material de aluminio, y sus porcentajes varían de acuerdo al diseño planteado.

3.3.4. SELECCIÓN DEL ATENUADOR

Al finalizar el análisis de los resultados obtenidos tanto en software como en las pruebas dinámicas de impacto, se procede a seleccionar el atenuador más óptimo.

En la **tabla 3-12** se resume los resultados de los tres atenuadores:

Tabla 3- 12. Resultados.

Fuente: Autores.

RESULTADOS OBTENIDOS					
ATENUADORES	SOFTWARE			PRUEBAS DINÁMICAS	
	VON MISES (GPa)	DESPLAZAMIENTO (mm)	ENERGÍA (J)	DESPLAZAMIENTO (mm)	DEFORMACIÓN DE MAMPARO (mm)
PROPUESTA 6	2.75	215.4	7800	201.2	12
PROPUESTA 7	1.43	202.4	25000	209.6	3.5
PROPUESTA 3	67	198	5500	171.2	27

Luego de los resultados obtenidos se ha optado en la selección del diseño de balsa (propuesta 7) debido a que:

- La deformación de 1.43 GPa es inferior al límite del material (4.1GPa).
- El desplazamiento total del material es de 202.4 mm, y permite tener un valor de 41.6mm de material antes de que haga contacto con el mamparo frontal.
- La energía absorbida es de 25000 Joule, y esta esta sobre el valor mínimo solicitado por la norma que es de 7350 J.
- El desplazamiento dinámico esta en los valores con la simulación y es de 209.6mm.
- La deformación del mamparo es mínima (3.5mm) en comparación con las otras dos propuestas.

En la **figura 3.29** se muestra los tres atenuadores en donde constan: el diseño de balsa uno (a), el diseño de aluminio y poliestireno expandido (b) y el diseño de balsa dos (c).

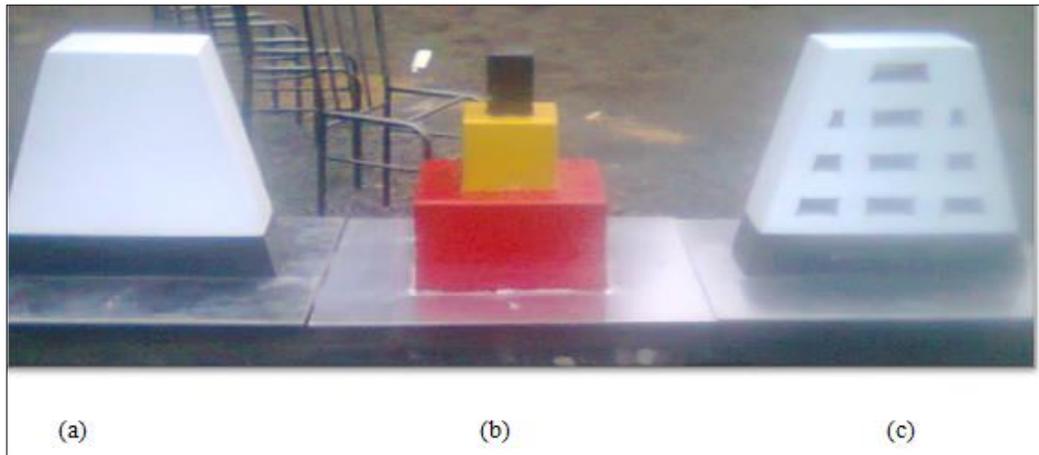


Figura 3. 29. *Atenuadores.*

Fuente: *Autores.*

Por lo tanto el seleccionado es el diseño de balsa (propuesta 7) el mismo indicado en la **figura 3.30**.



Figura 3. 30. *Atenuador Seleccionado.*

Fuente: *Autores.*

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE COSTO BENEFICIO

4.1. INTRODUCCIÓN

Con el análisis de costo del proyecto “Diseño y construcción de un atenuador de impacto para un vehículo monoplaza formula Student”, se realiza un estudio para poder obtener de manera acertada el costo real del atenuador, considerando todos los factores que involucran su construcción.

Además se realiza un análisis de los beneficios que presenta este elemento para el monoplaza, su utilidad y prestaciones, como también los beneficios propios como por ejemplo: adquirir nuevos conocimientos por medio de la utilización de nuevos software.

Por último se compara la inversión realizada con la de otras universidades o proveedores para ver la importancia de nuestro proyecto.

4.2. ANÁLISIS DE COSTOS

Para obtener el costo del atenuador de impacto se tiene en cuenta los siguientes aspectos (**figura4.1**):

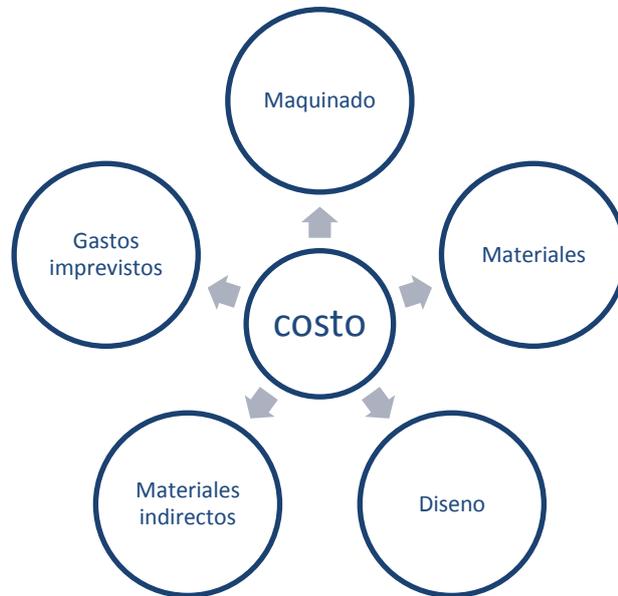


Figura 4. 1. Aspectos para Análisis de Costo.

Fuente: Autores.

En el análisis de costos permite determinar cuánto es el dinero invertido en el proyecto, dando a conocer todos los costos fijos, variables así como mano de obra directa e indirecta. En estos valores se incluyen todos los costos que implican la construcción del banco de pruebas.

4.2.1. COSTOS DIRECTOS

Son aquellos que se encuentran en mayor porcentaje respecto a los costos totales del proyecto como son:

- Costo de Materiales.
- Costo de Maquinaria.
- Costo de Montaje.

4.2.2. COSTOS INDIRECTOS

Son aquellos que no están tomados en forma minuciosa en el análisis de costos como por ejemplo: transporte, imprevistos, tiempos muertos, etc.

Estos son aspectos que siempre se encuentran presentes en un proyecto:

- Costos de materiales indirectos.
- Gastos imprevistos.

4.2.3. ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS

4.2.3.1. COSTO DE LOS MATERIALES

En este análisis se toma en cuenta los gastos que intervienen directamente con los materiales utilizados para la elaboración del atenuador, como también los utilizados para el desarrollo de las prueba de impacto del mismo. Se tiene que todos estos materiales se encuentran disponibles en el medio.

En la **tabla 4-1** se detallan los materiales adquiridos con sus costos tanto unitarios como totales:

Tabla 4- 1. Costo de los materiales.

Fuente: Autores.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (usd)	VALOR TOTAL (usd)
Tubo estructural redondo de 1"x1.5mm (disponible en 6m)	1	11.35	11.35
Plancha de aluminio (1.25m x2.45m) 3mm de espesor	1	120	120
Madera de balsa (600mm x300mm)	5	6.25	31.25
Ángulos de 2" (disponible en 6m)	4	19.25	77
Rodamientos RCH de bolas (6009z)	10	5	50
Varios			30
SUBTOTAL			319.6

4.2.3.2. COSTO DE UTILIZACIÓN DE MAQUINARIA

En este costo se detalla lo que tiene que ver con el valor respecto a la mano de obra directa empleada para la fabricación de los atenuadores de impacto y el banco de pruebas.

En la **tabla 4-2** se detalla el costo total de utilización de maquinaria.

Tabla 4- 2. Costo de utilización de Maquinaria.

Fuente: Autores.

MAQUINA	COSTO POR MAQUINA INCLUIDO MANO DE OBRA (USD/H)	TIEMPO TOTAL (H)	COSTO TOTAL POR MAQUINA (USD)
SOLDADURA	5	10	50
TALADRO	1	6.50	6.50
DOBLADORA DE PLANCHA DE ALUMINIO	1	3	3
MAQUINA LASER (MAQUINADO BALSA)	6	10	60
INSTRUMENTOS DE MEDIDA	3	5	15
SUBTOTAL			144.50

4.2.3.3. COSTO DE MONTAJE

Este costo relaciona la mano de obra ocupada para el ensamblaje de las partes y piezas utilizadas para el atenuador.

Para la mano de obra se usa una persona por un lapso de 10 horas siendo el costo por hora de 3 dólares.

En la **tabla 4-3** se muestra los costos de montaje para el atenuador de impacto:

Tabla 4- 3. Costo de Maquinado.

Fuente: Autores.

PERSONAL	ESPECIALIDAD	TIEMPO (H)	COSTO HORA	VALOR
MAESTRO	MECÁNICO	10	3	30
SUBTOTAL				30

4.2.3.4. COSTO DIRECTO TOTAL

En la **tabla 4-4**, se muestra el costo total de materiales directos:

Tabla 4- 4. Costo directo total.

Fuente: Autores.

COMPONENTE DEL COSTO	VALOR (USD)
COSTO DE LOS MATERIALES	319.60
COSTO DE MAQUINADO	144.50
COSTO DE MONTAJE	30
SUBTOTAL	494.10

4.2.4. ANÁLISIS DE COSTOS INDIRECTOS

4.2.4.1. COSTOS DE MATERIALES INDIRECTOS

Estos costos son los que se generan del uso de materiales suplementarios en la construcción de los atenuadores.

Los costos de materiales indirectos se muestran en la **tabla 4-5**:

Tabla 4- 5. Costo Materiales Indirectos.

Fuente: Autores.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
ELECTRODOS E6011-AGA- 1/8”(Kg)	2	4.50	9
LIJA DE MADERA #500	2	1.25	2.50
MUSTANG MASILLA PLASTICA- CONDOR	1	5.88	5.88
PINTURA DE ACABADO	3L	4	12
ESPUMA FLEX LIQUIDA	1	12.50	12.50
SUBTOTAL			41.88

4.2.4.2. COSTOS DE IMPREVISTOS

Para la construcción de los atenuadores se tiene costos de diseño, movilización, papelería, entre otros, como se detalla en la **tabla 4-6**:

Tabla 4- 6. Costos Imprevistos.

Fuente: Autores.

IMPREVISTO	VALOR (USD)
MOVILIZACIÓN	200
GASTOS DE INVESTIGACIÓN (internet)	12
IMPRESIÓN DE DOCUMENTOS	5
VARIOS	30
SUBTOTAL	247

4.2.4.3. COSTO INDIRECTO TOTAL

En la **tabla 4-7** se muestra los costos indirectos totales:

Tabla 4- 7. *Costo indirecto total.*

Fuente: *Autores.*

COMPONENTE DEL COSTO	VALOR (USD)
COSTO DE LOS MATERIALES INDIRECTOS	41.88
IMPREVISTO	247
SUBTOTAL	288.88

4.2.5. COSTO TOTAL

Este costo se obtiene de la sumatoria de los costos calculados y analizados en las secciones 4.4 y 4.7. Estos se indican en la **tabla 4-8**:

Tabla 4- 8. *Costo total.*

Fuente: *Autores.*

COMPONENTE DEL COSTO	VALOR (USD)
COSTO DIRECTO	494.10
COSTO INDIRECTO	288.88
SUBTOTAL	782.98

4.3. BENEFICIOS A CAUSA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ATENUADOR DE IMPACTOS EN UN VEHÍCULO MONOPLAZA

Los beneficios que se presentan con el atenuador de impactos en el vehículo monoplaza son tanto tangibles como intangibles y se los detalla a continuación cada uno de ellos.

4.3.1 BENEFICIOS TANGIBLES

Como beneficios tangibles es todo lo que se puede cuantificar en unidades monetarias, para ello con el atenuador de impacto seleccionado lo que se obtiene es un ahorro económico ya que es un diseño propio que cumple con los requerimientos dados en la competición.

El costo aproximado de este atenuador es de 60 dólares que dentro del presupuesto para un vehículo monoplaza es rentable.

4.3.2 BENEFICIOS INTANGIBLES

Los beneficios intangibles son todos aquellos que no se pueden cuantificar en unidades monetarias, pero al ser beneficio se lo debe tomar en cuenta dentro del análisis costo beneficio, a continuación se da a conocer los beneficios intangibles que se obtiene al desarrollar el proyecto.

- a. Competitividad.-** la construcción del atenuador de impacto se lo ha realizado con un costo mínimo en comparación de otras universidades como por ejemplo: en países extranjeros las universidades tienen presupuesto, laboratorios y la infraestructura necesaria para el desarrollo tanto de pruebas dinámicas como estáticas.

Pero esto no ha impedido que por medio de la investigación y la optimización de recursos estemos a la par, dando así un producto con las mismas

características y prestaciones dadas en otras universidades tanto locales como internacionales.

- b. Disminución de lesiones.-** Con la implementación del atenuador de impacto en el vehículo monoplace se logra disminuir las lesiones en el piloto al producirse una colisión, ya que este elemento absorbe la energía de impacto y no es transmitida al mismo.
- c. Aumento de seguridad.-** permite tener un elemento de protección y seguridad tanto para el conductor como para la carrocería del monoplace.
- d. Aprendizaje.-** Con la realización de este proyecto se pudo obtener conocimientos nuevos como los que se detalla a continuación:
 - Se logra aplicar un nuevo programa llamado Abaqus estudiantil, que permite realizar simulaciones tanto estáticas como dinámicas. Con este programa se obtiene diferentes resultados como: la energía de absorción, energía interna, desplazamiento, deformación, entre otros que nos permite analizar y obtener valores apegados a la realidad.
 - Un programa que se utiliza también en este proyecto es el Solidworks versión estudiantil, el cual nos permite realizar los diferentes diseños con sus respectivos materiales y a su vez permite realizar simulación estáticas.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- ASKELAND, Donald; PRADEEP, Fulay; WENDELIN, Wright. *Ciencia Ingeniería de los Materiales*. 6ta edición. Editorial Cengage Learning, 2011.
- ASHBY, Michael; JONES, David. *MATERIALES PARA INGENIERIA 2: Introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño*. 2da edición. Editorial Reverte,S.A, 2009.
- GROOVER, Mikell P. *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas*. 4ta edición. 2010.
- BESEDNJAK, Alejandro. *MATERIALES COMPUESTOS: Procesos de fabricación de embarcaciones*. 1ra edición. Editorial UPC, 2005.
- HULL, Derek. *Materiales Compuestos*. Editorial Reverte, S.A ,2003.
- MIRAVETE, Antonio. *Materiales Compuestos*. Vol. I. Editorial Reverte, 2007.
- VELEZ, Ligia María. *Materiales Industriales: Teoría y Aplicaciones*. Editorial ITM ,2008.
- MENENDEZ, Ángel. *El carbón en la Vida Cotidiana: De la pintura rupestre al ascensor espacial*.2012.
- CASTELLS, Elias; ALSINA, Santiago. *Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad*. Editorial Díaz de Santos,S.A,2011
- SHAWYER, Michael; Medina, Avilio. *El uso de hielo en pequeñas embarcaciones de pesca*. Editorial FAO, 2005.
- CORNWELL, B. *Mecánica Vectorial para ingenieros: Dinámica*. 9° edición.2006.
- HIBBELER, R. C. *Mecánica de Materiales*. 6° edición. Editorial Pearson educación México.2006.
- CERROLOZA, Miguel. *El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencia aplicadas: teoría y programa*.2007

- BUFFA, Anthony; JERRY, Wilson. *Física*. 5° edición. Editorial Pearson educación México.2003.
- STIMLER, Roberto. *Física I: Experiencias y 161 ejercicios resueltos*. 1° edición. Mar del Plata: EUDEM. 2010.
- SERWAY, Raymond; FAUGHN, Jerry. *Física para Bachillerato General*. 6° edición. México.2007
- BURBANO, Santiago; BURBANO Enrique; & GRACIA, Carlos. *Problemas de física*. 27° edición.2004.
- HEWITT, Paul. *Física Conceptual*. 9° edición. Editorial Pearson educación México.2007.
- DOUGLAS, Giancoli. *Física principios con aplicaciones*. 6° edición.2006
- MOSCA, Tipler. *Física para la ciencia y tecnología* 5° edición. Editorial Reverté.2003.
- THOMAS, Granmer. *Calculo Varias Variables*. 11° edición. 2006
- VIVANCO, Manuel. *Muestreo estadístico diseño y aplicaciones*. 1° edición. Editorial Universitaria. Chile, 2005

PAGINAS DE INTERNET

- Formula SAE. *Reglas Formula SAE 2013*. [en línea]. Recuperado 15/09/2012. Disponible en internet:

<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2013fsaerules.pdf>
- Productos estándar y rodamientos. *Rodamientos de una hilera de bolas*. [en línea]. Recuperado 23/06/2013. Disponible en internet:

<http://www.ntn-snr.com/common/catalogue/es-es/6009%20Z.pdf>

ANEXOS