



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO EXPERIMENTAL

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

“ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LOS ANCLAJES DE CINTURONES DE SEGURIDAD EN ASIENTOS DE AUTOBÚS INTERPROVINCIAL PARA VERIFICAR SU RESISTENCIA SEGÚN LA NORMA NTE INEN 2704 EN LA EMPRESA MIVILTECH SOLUCIONES INDUSTRIALES S. A”

AUTOR: Luis Antonio Martínez Calderón

TUTOR: Ing. MSc. Diego Núñez

Ambato –Ecuador

2016 - 2017

APROBACIÓN POR EL TUTOR

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema “ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LOS ANCLAJES DE CINTURONES DE SEGURIDAD EN ASIENTOS DE AUTOBÚS INTERPROVINCIAL PARA VERIFICAR SU RESISTENCIA SEGÚN LA NORMA NTE INEN 2704 EN LA EMPRESA MIVILTECH SOLUCIONES INDUSTRIALES S. A”, elaborado por el Sr. Luis Antonio Martínez Calderón, portador de la cédula de ciudadanía: 1804626909, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

.....
Ing. MSc. Diego Núñez

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO

Declaro que el presente Trabajo Experimental bajo el tema: “ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LOS ANCLAJES DE CINTURONES DE SEGURIDAD EN ASIENTOS DE AUTOBÚS INTERPROVINCIAL PARA VERIFICAR SU RESISTENCIA SEGÚN LA NORMA NTE INEN 2704 EN LA EMPRESA MIVILTECH SOLUCIONES INDUSTRIALES S. A”, en su totalidad, incluyendo ideas, criterios, análisis y conclusiones son de mi completa autoría.

.....
Luis Antonio Martínez Calderón

C. I.: 1804626909

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la institución

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este trabajo experimental dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando ésta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

.....
Luis Antonio Martínez Calderón

C. I.: 1804626909

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del tribunal examinador aprueban el informe de investigación, sobre el tema: “ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LOS ANCLAJES DE CINTURONES DE SEGURIDAD EN ASIENTOS DE AUTOBÚS INTERPROVINCIAL PARA VERIFICAR SU RESISTENCIA SEGÚN LA NORMA NTE INEN 2704 EN LA EMPRESA MIVILTECH SOLUCIONES INDUSTRIALES S. A”, del egresado Luis Antonio Martínez Calderón de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica.

Ambato, abril de 2017

Para constancia firman.

.....
Ing. Mg. César Arroba

.....
Ing. Mg. Gonzalo López

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza y sabiduría para seguir adelante.

A mis padres Luis y Liliana, por su amor y apoyo incondicional. Es gracias a sus consejos y su guía que he podido convertirme en la persona que soy.

A mis hermanos Marcelo y Silvana por brindarme su ayuda y su confianza.

AGRADECIMIENTO

Un profundo agradecimiento a la Universidad Técnica de Ambato por abrirme sus puertas y permitirme formar parte de esta prestigiosa institución.

A los docentes de la Facultad de la Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica por compartir sus conocimientos y sus valiosos consejos.

Al Ing. MSc. Diego Núñez, por su tiempo, guía y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. por la apertura y total colaboración.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

PÁGINAS PRELIMINARES	
APROBACIÓN POR EL TUTOR.....	II
AUTORÍA DEL TRABAJO	III
DERECHOS DE AUTOR.....	IV
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
INDICE DE TABLAS	XVIII
RESUMEN EJECUTIVO	XXI
ABSTRACT	XXII
CAPÍTULO I.....	1
ANTECEDENTES.....	1
1.1. Tema.....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO II	6
FUNDAMENTACIÓN	6
2.1. Fundamentación teórica.....	6
2.1.1. Cinturones de seguridad	6
2.1.1.1. Elementos de los cinturones de seguridad.....	7
2.1.1.2. Tipos de cinturones de seguridad	9
2.1.2. Ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad	12
2.1.2.1. Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa	12
2.1.3. Análisis por elementos finitos	15
2.1.3.1. Aplicaciones del análisis por elementos finitos.....	15
2.1.3.2. Proceso para la resolución de problemas por el método de elementos finitos	16

2.1.3.3.	Software para análisis por elementos finitos	18
2.1.4.	Análisis estructural por elementos finitos	18
2.1.4.1.	Tipos de análisis estructural por elementos finitos.....	19
2.1.5.	Análisis lineales y no lineales.....	24
2.1.5.1.	Análisis lineales.....	24
2.1.5.2.	Análisis no lineales.....	26
2.1.6.	Mallado por elementos finitos	27
2.1.6.1.	Tipos de elementos	27
2.1.6.2.	Selección del tipo de elementos y recomendaciones para mallado.....	31
2.1.6.3.	Parámetros de evaluación de la calidad de mallado	33
2.1.7.	Hourglassing.....	36
2.1.8.	Mecánica de materiales	38
2.1.8.1.	Ensayo de tracción.....	39
2.1.8.2.	Diagrama esfuerzo – deformación.....	41
2.1.8.3.	Ensayo de flexión de tres puntos	47
2.2.	Hipótesis	48
2.3.	Señalamiento de variables de la hipótesis	48
2.3.1.	Variable independiente	48
2.3.2.	Variable dependiente	48
CAPÍTULO III.....		49
METODOLOGÍA		49
3.1.	Nivel o tipo de investigación.....	49
3.1.1.	Bibliográfica	49
3.1.2.	Experimental.....	49
3.1.3.	Descriptiva.....	49
3.1.4.	Explicativa.....	49
3.2.	Población y muestra	50
3.2.1.	Población	50
3.2.2.	Muestra	50
3.3.	Operacionalización de variables.....	51
3.3.1.	Variable independiente	51
3.3.2.	Variable dependiente	52
3.4.	Plan de recolección de información	53

3.5.	Plan de procesamiento y análisis	53
3.5.1.	Recolección de información preliminar	55
3.5.1.1.	Condiciones de entorno para el ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad.....	55
3.5.1.1.1.	Determinación de la categoría del vehículo	55
3.5.1.1.2.	Determinación de la carga de inercia	57
3.5.1.1.3.	Determinación de las cargas totales	57
3.5.1.1.4.	Criterio de aceptación y rechazo	58
3.5.1.2.	Descripción de la estructura del asiento	58
3.5.1.2.1.	Identificación de materiales de la estructura	59
3.5.1.3.	Anclajes de cinturones de seguridad	60
3.5.1.3.1.	Identificación de materiales de los anclajes y cinturones.....	61
3.5.2.	Modelo digital	61
3.5.3.	Ensayos de materiales.....	62
3.5.3.1.	Ensayo de tracción de acero ASTM A36	62
3.5.3.2.	Ensayo de flexión de acero ASTM A36.....	63
3.5.3.3.	Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A	63
3.5.3.4.	Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A.....	64
3.5.4.	Simulaciones de los ensayos de materiales	64
3.5.5.	Simplificación y optimización del modelo digital de la estructura.....	64
3.5.6.	Modelos de materiales utilizados	65
3.5.7.	Condiciones de frontera para las simulaciones	69
3.5.8.	Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad	70
3.5.9.	Análisis e interpretación de resultados	70
CAPÍTULO IV		71
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		71
4.1.	Recolección de datos	71
4.1.1.	Ensayo de tracción de acero ASTM A36	72
4.1.2.	Ensayo de flexión de acero ASTM A36.....	78
4.1.3.	Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A	84
4.1.4.	Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A.....	90
4.2.	Análisis de los resultados	96

4.2.1.	Simulaciones de los ensayos de materiales	96
4.2.1.1.	Simulación del ensayo de tracción del acero ASTM A36.....	96
4.2.1.1.1.	Verificación de la calidad de la malla	97
4.2.1.1.2.	Resultados de la simulación	98
4.2.1.1.3.	Comparación del ensayo real y simulado	100
4.2.1.2.	Simulación del ensayo de flexión del acero ASTM A36	102
4.2.1.2.1.	Verificación de la calidad de la malla	102
4.2.1.2.2.	Resultados de la simulación	104
4.2.1.2.3.	Comparación del ensayo real y simulado	106
4.2.1.3.	Simulación del ensayo de tracción del acero ASTM A500 grado A.....	108
4.2.1.3.1.	Verificación de la calidad de la malla	108
4.2.1.3.2.	Resultados de la simulación	110
4.2.1.3.3.	Comparación del ensayo real y simulado	112
4.2.1.4.	Simulación del ensayo de flexión del acero ASTM A500 grado A.....	113
4.2.1.4.1.	Verificación de la calidad de la malla	114
4.2.1.4.2.	Resultados de la simulación	115
4.2.1.4.3.	Comparación del ensayo real y simulado	117
4.2.2.	Simulaciones de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad.....	119
4.2.2.1.	Simulación en un asiento con cinturones de seguridad de dos puntos.....	119
4.2.2.1.1.	Verificación de la calidad de la malla	120
4.2.2.1.2.	Resultados de la simulación	121
4.2.2.2.	Simulación en un asiento con cinturones de seguridad de tres puntos.....	135
4.2.2.2.1.	Verificación de la calidad de la malla	136
4.2.2.2.2.	Resultados de la simulación	137
4.2.3.	Rediseño de la estructura.....	156
4.2.3.1.	Descripción de la estructura rediseñada	157
4.2.3.2.	Simulación en un asiento con cinturones de seguridad de dos puntos.....	159
4.2.3.2.1.	Verificación de la calidad de la malla	160
4.2.3.2.2.	Resultados de la simulación	161

4.2.3.3.	Simulación en un asiento con cinturones de seguridad de tres puntos.....	181
4.2.3.3.1.	Verificación de la calidad de la malla	181
4.2.3.3.2.	Resultados de la simulación	183
4.3.	Verificación de la hipótesis	207
4.3.1.	Estructura original	207
4.3.1.1.	Asiento con dos puntos de anclaje para cinturones de seguridad.....	207
4.3.1.2.	Asiento con tres puntos de anclaje para cinturones de seguridad.....	208
4.3.2.	Estructura modificada.....	208
4.3.2.1.	Asiento con dos puntos de anclaje para cinturones de seguridad.....	209
4.3.2.2.	Asiento con tres puntos de anclaje para cinturones de seguridad.....	210
CAPÍTULO V		211
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		211
5.1.	Conclusiones.....	211
5.2.	Recomendaciones	214
MATERIALES DE REFERENCIA		216
	Bibliografía.....	216
ANEXOS.....		220

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Cinturón de seguridad.....	6
Figura 2. 2. Anclajes de cinturones de seguridad.....	7
Figura 2. 3. Cinturón de seguridad.....	7
Figura 2. 4. Asta del cinturón de seguridad.	8
Figura 2. 5. Hebilla de cinturones de seguridad.....	8
Figura 2. 6. Carrete inercial.....	8
Figura 2. 7. Pretensor de cinturón de seguridad.....	9
Figura 2. 8. Pretensor de cinturón de seguridad.....	9
Figura 2. 9. Cinturón de seguridad de dos puntos pélvico.....	10
Figura 2. 10. Cinturón de seguridad de dos puntos torácico.....	10
Figura 2. 11. Cinturón de seguridad de tres puntos.....	11
Figura 2. 12. Cinturón de seguridad de cuatro puntos.	11
Figura 2. 13. Cinturón de seguridad de cinco puntos.....	11
Figura 2. 14. Bloque pélvico.....	13
Figura 2. 15. Bloque torácico.....	13
Figura 2. 16. Condiciones para un ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un automóvil.....	14
Figura 2. 17. Discretización de un elemento continuo.....	15
Figura 2. 18. Resolución de problemas por el método de elementos finitos	17
Figura 2. 19. Análisis estático de un elemento mecánico	20
Figura 2. 20. Análisis dinámico del impacto de dos cuerpos.....	21
Figura 2. 21. Análisis modal de una estructura.....	22
Figura 2. 22. Análisis armónico de la vibración de una cuerda	23
Figura 2. 23. Análisis dinámico explícito de un impacto a alta velocidad.....	24
Figura 2. 24. Relaciones entre fuerzas y desplazamiento lineales para análisis lineales y no lineales	25
Figura 2. 25. Elemento truss	28
Figura 2. 26. Elemento beam	29
Figura 2. 27. Elementos bidimensionales con diferentes disposiciones de nodos	29
Figura 2. 28. Elemento membrana	30
Figura 2. 29. Elemento Shell.....	30
Figura 2. 30. Elemento tetraédrico.....	31
Figura 2. 31. Elemento hexaédrico	31
Figura 2. 32. Calidad de elementos triangulares y cuadriláteros	33
Figura 2. 33. Relación de aspecto de un elemento bidimensional	34
Figura 2. 34. Oblicuidad en elementos triangulares y cuadriláteros	35
Figura 2. 35. Curvatura de un elemento cuadrilátero.....	35
Figura 2. 36. Distorsión en la forma de un elemento hexaédrico debido a hourglassing	36
Figura 2. 37. Influencia del hourglassing en los resultados de un análisis dinámico explícito.....	37
Figura 2. 38. Máquina para ensayo de tracción y espécimen normalizado.....	40

Figura 2. 39. Fases del ensayo de tracción.....	41
Figura 2. 40. Diagrama esfuerzo – deformación ingenieril	43
Figura 2. 41. Diagramas esfuerzo – deformación de diferentes tipos de materiales	44
Figura 2. 42. Diagrama esfuerzo – deformación real.....	45
Figura 2. 43. Comportamiento perfectamente elástico de materiales	46
Figura 2. 44. Comportamiento elástico y perfectamente plástico de materiales....	46
Figura 2. 45. Comportamiento elástico con endurecimiento por deformación de materiales.....	47
Figura 2. 46. Ensayo de flexión de tres puntos	47
Figura 3. 1. Diagrama de flujo para recolección y análisis de información.....	54
Figura 3. 2. Peso del asiento a evaluarse.....	57
Figura 3. 3. Estructura de asiento de autobús interprovincial fabricada por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A.	58
Figura 3. 4. Partes de la estructura del asiento.....	59
Figura 3. 5. Ubicación de los puntos de anclaje en la estructura del asiento	60
Figura 3. 6. Modelo digital de la estructura del asiento.....	61
Figura 3. 7. Ensayo de tracción de acero ASTM A36	62
Figura 3. 8. Ensayo de flexión de acero ASTM A36.....	63
Figura 3. 9. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A	63
Figura 3. 10. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A.....	64
Figura 3. 11. Modelo simplificado de la estructura del asiento	65
Figura 3. 12. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 36	66
Figura 3. 13. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 500 grado A.....	67
Figura 3. 14. Propiedades del modelo de material del poliéster	68
Figura 3. 15. Cuerpos totalmente rígidos en los bloques de tracción	69
Figura 3. 16. Elementos del modelo totalmente fijos.....	69
Figura 3. 17. Orientación de las cargas aplicadas para las simulaciones.....	70
Figura 4. 1. Convergencia de resultados de los ensayos de tracción del acero ASTM A36.....	77
Figura 4. 2. Convergencia de resultados de los ensayos de flexión del acero ASTM A36.....	83
Figura 4. 3. Convergencia de resultados de los ensayos de tracción del acero ASTM A500 grado A.....	89
Figura 4. 4. Convergencia de resultados de los ensayos de flexión del acero ASTM A500 grado A	95
Figura 4. 5. Modelo digital para el ensayo de tracción de acero ASTM A36.....	96
Figura 4. 6. Malla del modelo digital con elementos cuadriláteros tipo shell	97
Figura 4. 7. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla.....	98
Figura 4. 8. Curvas esfuerzo – desplazamiento del ensayo real y simulado	101
Figura 4. 9. Modelo digital para el ensayo de flexión de acero ASTM A36	102

Figura 4. 10. Malla del modelo digital con elementos cuadriláteros shell y elementos hexaédricos	103
Figura 4. 11. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla.....	104
Figura 4. 12. Curvas carga – flecha del ensayo real y simulado	107
Figura 4. 13. Modelo digital para el ensayo de tracción de acero ASTM A500..	108
Figura 4. 14. Malla del modelo digital con elementos cuadriláteros tipo shell ...	109
Figura 4. 15. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla.....	110
Figura 4. 16. Curvas esfuerzo – desplazamiento del ensayo real y simulado	113
Figura 4. 17. Modelo digital para el ensayo de flexión de acero ASTM A500 ...	114
Figura 4. 18. Malla del modelo digital con elementos cuadriláteros tipo shell ...	114
Figura 4. 19. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla.....	115
Figura 4. 20. Curvas carga – flecha del ensayo real y simulado	118
Figura 4. 21. Modelo y condiciones para la simulación	119
Figura 4. 22. Malla del modelo digital con elementos shell	120
Figura 4. 23. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla.....	121
Figura 4. 24. Ubicación de los elementos N° 10725, 10726 y 10727	123
Figura 4. 25. Esfuerzos en los elementos N° 10725, 10726 y 10727	124
Figura 4. 26. Ubicación de los elementos N° 10719 y 10732	125
Figura 4. 27. Esfuerzos en los elementos N° 10719 y 10732.....	125
Figura 4. 28. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 10732.....	126
Figura 4. 29. Ubicación de los elementos N° 44198, 44296 y 44315	127
Figura 4. 30. Esfuerzos en los elementos N° 44198, 44296 y 44315.....	128
Figura 4. 31. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 44198.....	129
Figura 4. 32. Ubicación de los elementos N° 25262, 25263 y 25283	130
Figura 4. 33. Esfuerzos en los elementos N° 25262, 25263 y 25283.....	130
Figura 4. 34. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 25283.....	131
Figura 4. 35. Deformación plástica efectiva máxima en la estructura	133
Figura 4. 36. Desplazamiento total máximo en la estructura.....	133
Figura 4. 37. Relación de energías de la simulación.....	134
Figura 4. 38. Modelo y condiciones para la simulación	135
Figura 4. 39. Malla del modelo digital con elementos shell	136
Figura 4. 40. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla.....	137
Figura 4. 41. Ubicación de los elementos N° 14248, 14249 y 14250	139
Figura 4. 42. Esfuerzos en los elementos N° 14248, 14249 y 14250.....	140
Figura 4. 43. Ubicación de los elementos N° 14255 y 14256	141
Figura 4. 44. Esfuerzos en los elementos N° 14255 y 14256.....	141
Figura 4. 45. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 14255	142
Figura 4. 46. Ubicación de los elementos N° 47908, 48004 y 48007	143
Figura 4. 47. Esfuerzos en los elementos N° 47908, 48004 y 48007.....	144
Figura 4. 48. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 47908.....	145
Figura 4. 49. Ubicación de los elementos N° 28786, 28788 y 28808	146
Figura 4. 50. Esfuerzos en los elementos N° 28786, 28788 y 28808.....	146
Figura 4. 51. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 28808.....	147
Figura 4. 52. Ubicación de los elementos N° 40975 y 41028	149
Figura 4. 53. Esfuerzos en los elementos N° 40975 y 41028.....	149

Figura 4. 54. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 40975.....	150
Figura 4. 55. Ubicación de los elementos N° 40926 y 41014	152
Figura 4. 56. Esfuerzos en los elementos N° 40926 y 41014.....	152
Figura 4. 57. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 41014.....	153
Figura 4. 58. Deformación plástica efectiva máxima en la estructura.....	154
Figura 4. 59. Desplazamiento total máximo en la estructura.....	154
Figura 4. 60. Relación de energías de la simulación.....	155
Figura 4. 61. Modelo y condiciones para la simulación	159
Figura 4. 62. Malla del modelo digital con elementos shell	160
Figura 4. 63. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla.....	161
Figura 4. 64. Ubicación de los elementos N° 28123, 28126 y 28128	163
Figura 4. 65. Esfuerzos en los elementos N° 28123, 28126 y 28128.....	164
Figura 4. 66. Ubicación de los elementos N° 28143 y 28145	165
Figura 4. 67. Esfuerzos en los elementos N° 28143 y 28145.....	165
Figura 4. 68. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 28126.....	166
Figura 4. 69. Ubicación de los elementos N° 27365, 27370 y 27546	167
Figura 4. 70. Esfuerzos en los elementos N° 27365, 27370 y 27546.....	167
Figura 4. 71. Ubicación de los elementos N° 27494, 27495 y 27505	168
Figura 4. 72. Esfuerzos en los elementos N° 27494, 27495 y 27505	169
Figura 4. 73. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 27365.....	170
Figura 4. 74. Ubicación de los elementos N° 27901, 27910 y 27955	171
Figura 4. 75. Esfuerzos en los elementos N° 27901, 27910 y 27955.....	171
Figura 4. 76. Ubicación de los elementos N° 27937, 27945 y 27947	172
Figura 4. 77. Esfuerzos en los elementos N° 27937, 27945 y 27947.....	172
Figura 4. 78. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 27947	173
Figura 4. 79. Ubicación de los elementos N° 27547, 27740 y 27747	174
Figura 4. 80. Esfuerzos en los elementos N° 27547, 27740 y 27747.....	175
Figura 4. 81. Ubicación de los elementos N° 27548, 27719 y 27721	176
Figura 4. 82. Esfuerzos en los elementos N° 27548, 27719 y 27721.....	176
Figura 4. 83. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 27548.....	177
Figura 4. 84. Deformación plástica efectiva máxima en la estructura.....	179
Figura 4. 85. Desplazamiento total máximo en la estructura.....	179
Figura 4. 86. Relación de energías de la simulación.....	180
Figura 4. 87. Modelo y condiciones para la simulación	181
Figura 4. 88. Malla del modelo digital con elementos shell	182
Figura 4. 89. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla.....	183
Figura 4. 90. Ubicación de los elementos N° 31724, 31726 y 31757	185
Figura 4. 91. Esfuerzos en los elementos N° 31724, 31726 y 31757.....	186
Figura 4. 92. Ubicación de los elementos N° 31746 y 31754	187
Figura 4. 93. Esfuerzos en los elementos N° 31746 y 31754.....	187
Figura 4. 94. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31754.....	188
Figura 4. 95. Ubicación de los elementos N° 31133, 31140 y 31144	189
Figura 4. 96. Esfuerzos en los elementos N° 31133, 31140 y 31144.....	189
Figura 4. 97. Ubicación de los elementos N° 31095, 31099 y 31106.....	190
Figura 4. 98. Esfuerzos en los elementos N° 31095, 31099 y 31106.....	191

Figura 4. 99. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31133.....	192
Figura 4. 100. Ubicación de los elementos N° 31503, 31507 y 31553	193
Figura 4. 101. Esfuerzos en los elementos N° 31503, 31507 y 31553.....	193
Figura 4. 102. Ubicación de los elementos N° 31534, 31540 y 31552	194
Figura 4. 103. Esfuerzos en los elementos N° 31534, 31540 y 31552.....	195
Figura 4. 104. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31507	196
Figura 4. 105. Ubicación de los elementos N° 31145 y 31349	196
Figura 4. 106. Esfuerzos en los elementos N° 31145 y 31349.....	197
Figura 4. 107. Ubicación de los elementos N° 31315, 31327 y 31330	198
Figura 4. 108. Esfuerzos en los elementos N° 31315, 31327 y 31330.....	198
Figura 4. 109. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31315.....	199
Figura 4. 110. Ubicación de los elementos N° 44286 y 44339	200
Figura 4. 111. Esfuerzos en los elementos N° 44286 y 44339.....	200
Figura 4. 112. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 44286.....	201
Figura 4. 113. Ubicación de los elementos N° 44238, 44321 y 44322	202
Figura 4. 114. Esfuerzos en los elementos N° 44238, 44321 y 44322.....	203
Figura 4. 115. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 44321	204
Figura 4. 116. Deformación plástica efectiva máxima en la estructura	205
Figura 4. 117. Desplazamiento total máximo en la estructura.....	205
Figura 4. 118. Relación de energías de la simulación.....	206

INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Tasa de reducción de lesiones con el uso de cinturones de seguridad...7	
Tabla 2. 2. Aplicaciones del método de elementos finitos.....16	
Tabla 3. 1. Variable independiente51	
Tabla 3. 2. Variable dependiente.....52	
Tabla 3. 3. Parámetros de evaluación según el Reglamento 14 CEPE55	
Tabla 3. 4. Peso de diferentes modelos de autobús interprovincial disponibles en el país.....56	
Tabla 3. 5. Categorías de vehículos para transporte de pasajeros56	
Tabla 3. 6. Cargas totales aplicadas según el Reglamento 14 CEPE.....58	
Tabla 3. 7. Materiales utilizados en la estructura del asiento.....59	
Tabla 3. 8. Ubicación de los anclajes en la estructura60	
Tabla 3. 9. Materiales de los anclajes y cinturones de seguridad61	
Tabla 3. 10. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 36.....66	
Tabla 3. 11. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 500 grado A.....67	
Tabla 3. 12. Propiedades del modelo de material del poliéster.....68	
Tabla 4. 1. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 0172	
Tabla 4. 2. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 02.....73	
Tabla 4. 3. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 03.....74	
Tabla 4. 4. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 04.....75	
Tabla 4. 5. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 05.....76	
Tabla 4. 6. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 0178	
Tabla 4. 7. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 0279	
Tabla 4. 8. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 0380	
Tabla 4. 9. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 0481	
Tabla 4. 10. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 0582	
Tabla 4. 11. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 0184	
Tabla 4. 12. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 02.....85	
Tabla 4. 13. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 03.....86	
Tabla 4. 14. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 04.....87	
Tabla 4. 15. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 05.....88	
Tabla 4. 16. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 0190	
Tabla 4. 17. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 0291	
Tabla 4. 18. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 0392	
Tabla 4. 19. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 0493	
Tabla 4. 20. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 0594	
Tabla 4. 21. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla98	
Tabla 4. 22. Simulación del ensayo de tracción del acero ASTM A3699	
Tabla 4. 23. Comparación de los resultados del ensayo real y simulado.....100	
Tabla 4. 24. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla103	

Tabla 4. 25. Simulación del ensayo de flexión del acero ASTM A36.....	105
Tabla 4. 26. Comparación de los resultados del ensayo real y simulado.....	106
Tabla 4. 27. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla	109
Tabla 4. 28. Simulación del ensayo de tracción del acero ASTM A500 grado A.....	111
Tabla 4. 29. Comparación de los resultados del ensayo real y simulado.....	112
Tabla 4. 30. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla	115
Tabla 4. 31. Simulación del ensayo de flexión del acero ASTM A500 grado A.....	116
Tabla 4. 32. Comparación de los resultados del ensayo real y simulado.....	117
Tabla 4. 33. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla	121
Tabla 4. 34. Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un asiento con cinturones de dos puntos.....	122
Tabla 4. 35. Esfuerzos en los elementos N° 10725, 10726 y 10727	124
Tabla 4. 36. Esfuerzos en los elementos N° 10719 y 10732	125
Tabla 4. 37. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 10732	126
Tabla 4. 38. Esfuerzos en los elementos N° 44198, 44296 y 44315	128
Tabla 4. 39. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 44198	129
Tabla 4. 40. Esfuerzos en los elementos N° 25262, 25263 y 25283	131
Tabla 4. 41. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 25283	132
Tabla 4. 42. Energías de la simulación	134
Tabla 4. 43. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla	137
Tabla 4. 44. Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un asiento con cinturones de tres puntos.....	138
Tabla 4. 45. Esfuerzos en los elementos N° 14248, 14249 y 14250	140
Tabla 4. 46. Esfuerzos en los elementos N° 14255 y 14256	141
Tabla 4. 47. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 14255	142
Tabla 4. 48. Esfuerzos en los elementos N° 47908, 48004 y 48007	144
Tabla 4. 49. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 47908	145
Tabla 4. 50. Esfuerzos en los elementos N° 28786, 28788 y 28808	147
Tabla 4. 51. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 28808	148
Tabla 4. 52. Esfuerzos en los elementos N° 40975 y 41028	150
Tabla 4. 53. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 40975	151
Tabla 4. 54. Esfuerzos en los elementos N° 40926 y 41014	152
Tabla 4. 55. Energías de la simulación	155
Tabla 4. 56. Modificaciones a la estructura del asiento	158
Tabla 4. 57. Modificaciones en los anclajes inferiores de cinturones de seguridad	159
Tabla 4. 58. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla	161
Tabla 4. 59. Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un asiento con cinturones de dos puntos.....	162
Tabla 4. 60. Esfuerzos en los elementos N° 28123, 28126 y 28128	164
Tabla 4. 61. Esfuerzos en los elementos N° 28143, y 28145	165
Tabla 4. 62. Esfuerzos en los elementos N° 27365, 27370 y 27546.....	168
Tabla 4. 63. Esfuerzos en los elementos N° 27494, 27495 y 27505	169
Tabla 4. 64. Esfuerzos en los elementos N° 27901, 27910 y 27955	171

Tabla 4. 65. Esfuerzos en los elementos N° 27937, 27945 y 27947	173
Tabla 4. 66. Esfuerzos en los elementos N° 27547, 27740 y 27747	175
Tabla 4. 67. Esfuerzos en los elementos N° 27548, 27719 y 27721	176
Tabla 4. 68. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 27548	177
Tabla 4. 69. Energías de la simulación	180
Tabla 4. 70. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla	182
Tabla 4. 71. Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un asiento con cinturones de tres puntos.....	184
Tabla 4. 72. Esfuerzos en los elementos N° 31724, 31726 y 31757	186
Tabla 4. 73. Esfuerzos en los elementos N° 31746 y 31754	187
Tabla 4. 74. Esfuerzos en los elementos N° 31133, 31140 y 31144	190
Tabla 4. 75. Esfuerzos en los elementos N° 31095, 31099 y 31106	191
Tabla 4. 76. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31133	192
Tabla 4. 77. Esfuerzos en los elementos N° 31503, 31507 y 31553	194
Tabla 4. 78. Esfuerzos en los elementos N° 31534, 31540 y 31552	195
Tabla 4. 79. Esfuerzos en los elementos N° 31145 y 31349	197
Tabla 4. 80. Esfuerzos en los elementos N° 31315, 31327 y 31330	198
Tabla 4. 81. Esfuerzos en los elementos N° 44286 y 44339	201
Tabla 4. 82. Esfuerzos en los elementos N° 44238, 44321 y 44322	203
Tabla 4. 83. Energías de la simulación	206
Tabla 4. 84. Evaluación de resultados.....	207
Tabla 4. 85. Evaluación de resultados.....	208
Tabla 4. 86. Evaluación de resultados.....	209
Tabla 4. 87. Evaluación de resultados.....	210

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo experimental tiene como finalidad realizar el análisis por elementos finitos de tipo dinámico explícito de los anclajes de cinturones de seguridad en estructuras de asientos de autobús interprovincial fabricados por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. bajo los parámetros de evaluación establecidos en el Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

En primer lugar se recopiló toda la información necesaria para el desarrollo del tema, siendo lo más relevante los parámetros de ensayo, aceptación y rechazo bajo los cuales se realizará el análisis, tales parámetros varían en función del vehículo al que pertenecen los asientos que se van a evaluar así como también del tipo de cinturón de seguridad utilizado, en este caso los asientos pertenecen a un autobús interprovincial correspondiente a la categoría de vehículos M3 donde se emplean cinturones tanto de dos como de tres puntos de anclaje.

A continuación, luego de una correcta medición se realizó un modelo digital de la estructura completa del asiento real, el cual debió ser simplificado y optimizado para reducir el gasto computacional de análisis, se identificaron también los materiales utilizados en la estructura, siendo éstos aceros estructurales ASTM A500 grado A y ASTM A36 cuyas propiedades reales fueron obtenidas mediante ensayos de tracción y flexión. Con las propiedades reales obtenidas de los ensayos se realizaron simulaciones de los mismos con la finalidad de obtener un modelo de material con un comportamiento cercano al real al comparar los resultados de ambos ensayos y obteniendo el porcentaje de error entre ellos.

Finalmente, con las condiciones de entorno, propiedades de materiales y un modelo digital adecuado se realizaron las simulaciones de resistencia de anclajes para cinturones de seguridad de dos y tres puntos, obteniendo como resultado que la estructura existente no es capaz de resistir por completo los ensayos debido a que se producen esfuerzos y deformaciones excesivas en ella, para lo cual se realizaron nuevos análisis en una estructura con ciertas modificaciones con respecto a la original, la cual fue capaz de resistir los ensayos.

ABSTRACT

This study aims to perform an explicit dynamics finite element analysis of seatbelt anchorages used in interprovincial bus seat structures manufactured by MIVILTECH Industrial Solutions according to evaluation parameters established in the Regulation No. 14 of the Economic Commission for Europe referenced in Ecuadorian Technical Standard INEN 2704.

First, It was necessary to collect all the necessary information to develop the topic. The most important data is the evaluation, acceptance and rejection parameters, which depend on the type of vehicle where the seats are used. In this case the seats belong to a M3 category vehicle, in which seat belts with two and three anchorage points are used.

After an adequate measurement, a digital model of the whole seat structure was made, which was simplified and optimized to reduce the analysis computing time. The materials used to build the structure were identified, these materials are ASTM A500 grade A and ASTM A36 structural steels. Their real properties were obtained from traction and flexion tests. With the real properties of the materials the tests were simulated to obtain a material model with a similar behavior to the real materials. The validity of the material models was evaluated through the comparison of the error percentages from the real and simulated tests.

Finally, with all the necessary data, material properties and an adequate digital model, resistance analysis of seat belt anchorages for two and three point seat belts were performed. As a result the current structure manufactured by MIVILTECH Industrial Solutions is not able to resist the tests because the stress and strain levels are higher than the allowed by the materials. Consequently, the structure was modified to perform new analyses; the new structure was able to resist the tests satisfactorily.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. Tema

“ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LOS ANCLAJES DE CINTURONES DE SEGURIDAD EN ASIENTOS DE AUTOBÚS INTERPROVINCIAL PARA VERIFICAR SU RESISTENCIA SEGÚN LA NORMA NTE INEN 2704 EN LA EMPRESA MIVILTECH SOLUCIONES INDUSTRIALES S. A”

1.2. Antecedentes

Con la finalidad de garantizar la seguridad de los ocupantes de vehículos de transporte terrestre se han establecido normativas y reglamentos internacionales que determinan los parámetros para el adecuado funcionamiento y resistencia de sus diferentes componentes estructurales. Este es el caso de los anclajes de cinturones de seguridad que tienen como función principal brindar protección en caso de un accidente, siendo capaces de resistir sus efectos sin sufrir daños considerables que comprometan la integridad de los tripulantes.

En este campo se han realizado varias investigaciones a nivel mundial utilizando el análisis por elementos finitos y simulaciones conducidas por ordenador con la finalidad de obtener modelos cada vez más aproximados a la realidad que permitan replicar en forma virtual pruebas físicas establecidas en reglamentos y normas.

Así por ejemplo, Henniger, Hessenberger y Mullerschon [1], realizaron un análisis estadístico de los diferentes parámetros que intervienen en una simulación de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en la estructura de un asiento de automóvil según el Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa, los factores evaluados fueron el espesor de los elementos estructurales que conforman la estructura del asiento y las propiedades de los materiales empleados, obteniendo

como resultado una correlación no lineal cuya confiabilidad disminuye a medida que se incrementa el número de parámetros de análisis.

Heo et al. [2], realizaron un análisis de los anclajes de cinturones de seguridad en un asiento de automóvil utilizando el software LS - Dyna, en este trabajo se identifica el desempeño general del asiento y de ciertos componentes como soportes y pernos de unión de los anclajes bajo las condiciones establecidas en el Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa, se obtuvieron los valores de las fuerzas resultantes en los puntos de anclaje y los esfuerzos generados en los pernos de unión, con lo cual se consiguió un modelo para una adecuada selección de componentes.

En el trabajo realizado por Yuce et al. [3], se llevó a cabo un análisis por elementos finitos de los anclajes de cinturones de seguridad en una estructura de asiento de autobús según el Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa, con la finalidad de obtener un modelo válido para la optimización de dicha estructura utilizando materiales ligeros y de menor espesor que a su vez permitan el cumplimiento del reglamento; concluyendo que el material más apropiado fue un acero de alta resistencia, con el cual se pudo reducir el peso total de la estructura al emplear perfiles estructurales de menor espesor.

Un estudio similar fue desarrollado por Vatambe [4], siendo aplicado en la estructura y pilar lateral de un automóvil, se realizaron análisis de optimización para tres materiales: acero común, acero de alta resistencia y aluminio bajo la Regulación Federal de Seguridad para Vehículos a Motor 207/210 de los Estados Unidos, llegando a la conclusión de que el aluminio es el material más apropiado ya que permite una significativa reducción del peso de la estructura con una resistencia similar a la del acero.

1.3. Justificación

La seguridad en el transporte es un asunto de gran interés a nivel mundial debido a la creciente demanda de este servicio, lo cual crea la necesidad de garantizar la seguridad de los usuarios y para ello se han establecido diferentes normativas y reglamentos que tienen por objeto evaluar la resistencia y correcto desempeño de los diferentes componentes de vehículos de transporte público, mucho más en aquellos vehículos destinados a recorrer grandes distancias como son los autobuses interprovinciales, mismos que deben contar con estrictas medidas de seguridad.

Debido a que los accidentes de tránsito son la octava causa de muerte a nivel mundial [5], se han desarrollado medidas de protección para los ocupantes de vehículos, siendo la más efectiva de ellas los cinturones de seguridad, ya que éstos pueden reducir de un 60 a 80 % las probabilidades de fallecimiento o heridas graves en caso de un accidente [5]. Así por ejemplo en Chile, donde a partir del año 2011 es obligatorio el uso de cinturones de seguridad en autobuses se ha registrado una disminución considerable del número de fallecidos con respecto al año 2010, siendo esta reducción del 87% [6].

De ahí la importancia de contar con sistemas de protección para pasajeros en vehículos de transporte público interprovincial, los cuales deben ser capaces de cumplir con sus funciones en forma adecuada, para ello las regulaciones y normativas existentes establecen los parámetros de desempeño. Este es el caso de los anclajes de cinturones de seguridad, los cuales deben ser capaces de resistir condiciones adversas sin sufrir daños que afecten su funcionamiento.

Entre los principales reglamentos existentes a nivel mundial para la evaluación y aceptación de anclajes de cinturones de seguridad se encuentran el Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa [7] y el Reglamento Federal de Seguridad para Vehículos Motorizados N° 210 de los Estados Unidos [8]. Estos reglamentos son tomados a menudo como referencia en diferentes países. En el caso del Ecuador, la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704 [9] que establece los parámetros de evaluación para anclajes de cinturones de seguridad toma como referencia a los reglamentos internacionales mencionados anteriormente, sin

embargo el Reglamento N° 14 es el más utilizado debido a que en él se consideran aspectos más reales de evaluación como por ejemplo el tomar en cuenta una carga de inercia producida por el peso del mismo asiento que se va a evaluar, además de que se establecen diferentes parámetros en función del tipo de vehículo al que pertenece el asiento.

Aunque se cuenten con normas y reglamentos para la seguridad en vehículos, en nuestro país se puede evidenciar que no todas las unidades de transporte interprovincial cuentan con cinturones de seguridad, a pesar de que el Reglamento Técnico Ecuatoriano 043 [10], establece que los autobuses interprovinciales deben contar con estos dispositivos de protección, los cuales a su vez deben ser lo suficientemente resistentes para garantizar la integridad de los pasajeros.

Resulta difícil realizar las pruebas y ensayos reales exigidos en reglamentos, esto se debe principalmente a la inexistencia de laboratorios con equipos especializados para tales fines, incluso de existir estos laboratorios los ensayos especializados tendrían un costo elevado que en muchos casos las empresas no estarían dispuestas a asumir ya que además de los costos de ensayo muchas veces se requiere la destrucción de los componentes y estructuras sometidas a pruebas.

Como una alternativa, el análisis por elementos finitos es cada vez más utilizado en varias industrias, en especial la automotriz ya que al tener regulaciones ambientales y de seguridad cada vez más estrictas no es posible realizar pruebas físicas constantemente, con lo cual las herramientas virtuales resultan de gran ayuda al momento de diseñar nuevos productos o mejorar los ya existentes.

Es por ello que este trabajo resultará de significativa importancia para la empresa MIVILTECH Soluciones Industriales S.A. pues el uso del método de elementos finitos y simulaciones conducidas por ordenador resulta muy factible ya que permite la realización de pruebas de resistencia de sus estructuras de asientos de autobús interprovincial con cinturones de seguridad de dos y tres puntos de anclaje bajo parámetros establecidos en normas y reglamentos vigentes, y en caso de requerirse se pueden realizar mejoras y optimizaciones a fin de obtener resultados satisfactorios, con lo que además se logra una considerable reducción de costos al permitir la realización de varias pruebas virtuales en lugar de pruebas físicas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar la resistencia de los anclajes de cinturones de seguridad en asientos de autobús interprovincial de acuerdo a los parámetros establecidos en el Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704 utilizando el método de elementos finitos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar las propiedades de los materiales empleados actualmente en la empresa MIVILTECH Soluciones Industriales S.A. para la construcción de estructuras de asientos de autobús interprovincial por medio de ensayos de resistencia de materiales.
- Establecer las condiciones de carga y contorno o frontera requeridas para realizar la simulación de manera efectiva.
- Realizar un modelo digital optimizado que permita obtener diferentes simulaciones por el método de elementos finitos con la variación de parámetros y condiciones de frontera.
- Evaluar los resultados obtenidos en las simulaciones para verificar su aceptación o rechazo de acuerdo a los parámetros establecidos en el Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN

2.1. Fundamentación teórica

2.1.1. Cinturones de seguridad

Los cinturones son dispositivos de seguridad pasiva en forma de arnés tejido que se instalan en vehículos con la finalidad de mantener a los ocupantes sujetos a sus asientos, evitando que salgan expulsados o sufran colisiones contra objetos contundentes u otras personas en caso de producirse un accidente de tránsito [11], siendo los más comunes choques y volcamientos. Usualmente están fabricados en forma de tejido a partir de fibras poliméricas de alta resistencia, usualmente poliéster o nylon.



Figura 2. 1. Cinturón de seguridad [11]

Se debe considerar que los cinturones de seguridad son los dispositivos de protección más importantes ya que actúan como sistema de amortiguación, freno y retención ante un siniestro, reduciendo gradualmente las desaceleraciones bruscas producidas, mismas que de no controlarse adecuadamente podrían causar lesiones graves en la cabeza, cuello, espalda y piernas de los ocupantes.[12]

Su efectividad ha quedado ampliamente demostrada al contribuir con la prevención de lesiones severas, la tabla 2.1 muestra la tasa de prevención de lesiones con el uso del cinturón de seguridad.

Tabla 2. 1. Tasa de reducción de lesiones con uso de cinturones de seguridad. [13]

TIPO DE LESIÓN	CONDUCTOR	PASAJERO
Lesiones cerebrales	33%	56%
Fracturas craneales	18%	18%
Heridas faciales	45%	64%
Lesiones oculares	38%	40%
Fracturas faciales	6%	6%
Lesiones pulmonares	33%	58%

2.1.1.1. Elementos de los cinturones de seguridad

Los cinturones de seguridad constan de los siguientes elementos:

- **Puntos de anclaje:** Son los puntos que permiten la fijación del cinturón de seguridad a la estructura del asiento o del vehículo, se fabrican de materiales metálicos de alta resistencia a grandes esfuerzos y corrosión. [11]



Figura 2. 2. Anclajes de cinturones de seguridad. [14]

- **Cinturón:** Es una banda formada por fibras poliméricas de alta resistencia que se coloca en las regiones pélvica y torácica del usuario con la finalidad de brindarle protección en caso de un accidente. [11]



Figura 2. 3. Cinturón de seguridad. [14]

- **Asta:** Es un punto de anclaje del cinturón que se coloca en uno de los extremos inferiores del cinturón permaneciendo fijo. [11]



Figura 2. 4. Asta del cinturón de seguridad. [14]

- **Hebilla:** Elemento que sirve para la unión entre el asta y el extremo opuesto del cinturón permitiendo el cierre de éste, se fabrica de materiales metálicos y plásticos de alta resistencia. [11]



Figura 2. 5. Hebilla de cinturones de seguridad. [14]

- **Carrete inercial:** Es un dispositivo que tiene la finalidad de mantener el cinturón enrollado en su interior permitiendo su desplazamiento para brindar un mejor ajuste al cuerpo del ocupante, cuenta con dispositivos de bloqueo que evitan el desplazamiento del cinturón una vez ajustado en caso de un movimiento brusco. [11]



Figura 2. 6. Carrete inercial. [14]

- **Pretensor:** Es un componente encargado de acercar el cinturón hacia el cuerpo en caso de una colisión evitando que éste se extienda procurando mantener al ocupante en una posición fija, puede ubicarse en el carrete inercial o al final del asta. [11]



Figura 2. 7. Pretensor de cinturón de seguridad. [12]

- **Regulador de altura:** Es un componente exclusivo de los cinturones de tres puntos de anclaje de automóviles, permite regular la altura del tercer punto de anclaje para tener un mejor ajuste a cada persona. [11]



Figura 2. 8. Pretensor de cinturón de seguridad. [12]

2.1.1.2. Tipos de cinturones de seguridad

Se clasifican básicamente por el número de puntos de anclaje, entre los más comunes se encuentran:

- **Cinturón de dos puntos pélvico:** Es un cinturón que se coloca en la cintura del ocupante y se fija al asiento o al vehículo por medio de dos puntos de anclaje

inferiores, se utiliza principalmente en vehículos de transporte público como autobuses y aviones, en automóviles se ha dejado de usar debido a que no brinda protección a la cabeza y espalda. [12]



Figura 2. 9. Cinturón de seguridad de dos puntos pélvico. [12]

- **Cinturón de dos puntos torácico:** Estos cinturones se ubican en el tórax en forma diagonal, cuentan con dos puntos de anclaje: uno superior por encima del hombro y uno inferior, con este cinturón no se tienen protección en la parte inferior del cuerpo, se utilizaba en automóviles aunque no fue muy común [12].



Figura 2. 10. Cinturón de seguridad de dos puntos torácico. [15]

- **Cinturón de tres puntos:** Denominado también cinturón pélvico torácico, es una combinación de los dos cinturones anteriores creando un dispositivo muy efectivo ya que brinda protección tanto a la zona superior como inferior del cuerpo, cuenta con tres puntos de anclaje: uno superior y dos inferiores, se utiliza principalmente en automóviles y en los asientos delanteros de vehículos para transporte de pasajeros como autobuses. [12]



Figura 2. 11. Cinturón de seguridad de tres puntos. [12]

- **Cinturón de cuatro puntos:** Son empleados principalmente en vehículos de competición que debido a sus altas velocidades deben ser capaces de retener al ocupante en una posición más rígida, cuentan con cuatro puntos de anclaje: dos superiores y dos inferiores. [12]



Figura 2. 12. Cinturón de seguridad de cuatro puntos. [12]

- **Cinturón de cinco puntos:** Son cinturones utilizados en asientos especiales para retención infantil, teniendo dos puntos de anclaje superiores y tres inferiores. [12]

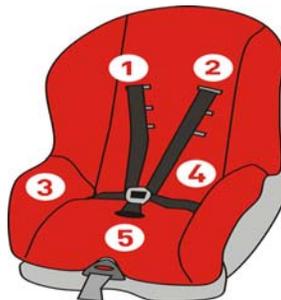


Figura 2. 13. Cinturón de seguridad de cinco puntos. [12]

2.1.2. Ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad

Con la finalidad de proteger la seguridad de los usuarios de vehículos de transporte público como son los autobuses interprovinciales, se han establecido reglamentos que disponen la utilización de dispositivos para la protección de pasajeros en caso de accidentes de tránsito.

Es por ello que en nuestro país en el Reglamento Técnico Ecuatoriano 043 con los requisitos para autobuses interprovinciales e intraprovinciales (Anexo 1) establece que los autobuses destinados para este servicio deben disponer de cinturones de seguridad en todos sus asientos, debiendo contar en forma obligatoria con cinturones de tres puntos de anclaje en la primera fila de asientos así como también en las filas próximas a puertas de salida, mientras que en los demás asientos se debe contar con cinturones de dos puntos de anclaje como mínimo [10].

Debido a estos requerimientos de seguridad es necesario garantizar que los anclajes que unen los cinturones de seguridad a la estructura de los asientos sean capaces de soportar condiciones extremas como es el caso de un accidente de tránsito, para ello se han establecido procedimientos de ensayo en normativas y reglamentos internacionales.

2.1.2.1. Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa

Este es quizá el reglamento para evaluación de anclajes de cinturones de seguridad más conocido ya que incluye procedimientos de ensayo para diferentes tipos de vehículos y cinturones de seguridad.

El ensayo es cuasi estático, consiste en la evaluación de la resistencia de anclajes de cinturones de seguridad por medio de la aplicación de grandes fuerzas de tracción directamente en los cinturones de seguridad por medio de bloques sobre los cuales se colocan los cinturones. Esta es una de las pruebas de resistencia de componentes más severas ya que las cargas aplicadas son sumamente grandes.

Los principales parámetros establecidos en el reglamento para la realización del ensayo son:

- Se aplican fuerzas de tracción sobre bloques cuyas dimensiones y forma se muestran en las figuras 2.14 y 2.15, existen dos bloques uno pélvico y uno torácico, los cuales deben ser lo suficientemente rígidos y resistentes como para no sufrir deformaciones ni daños.

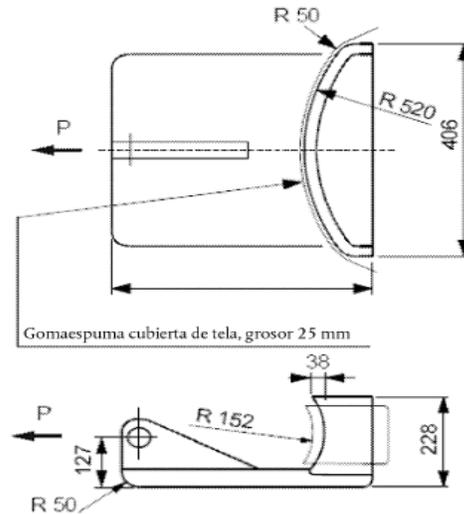


Figura 2. 14. Bloque pélvico. [7]

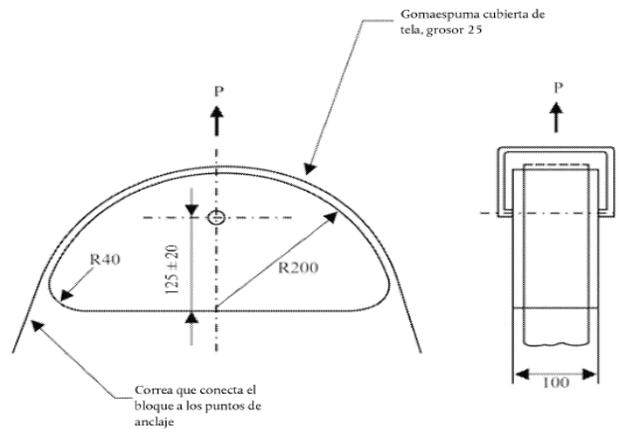


Figura 2. 15. Bloque torácico. [7]

- Los bloques deben ajustarse adecuadamente con los cinturones de seguridad, se utilizan ambos bloques en la evaluación de cinturones de seguridad con tres puntos de anclaje, mientras que para cinturones de dos puntos solo se necesitan los bloques pélvicos.

- Los asientos deberán ubicarse en una posición fija bloqueando los dispositivos de inclinación.
- Las cargas se aplicarán sobre cada uno de los bloques de evaluación y dependerán del tipo de cinturón que se vaya a evaluar y de la categoría del vehículo que se evalúa, en el caso de autobuses las cargas son de 4500 N para cinturones de tres puntos y 7400 N en cinturones de dos puntos.
- Además de las cargas anteriores debe añadirse una carga de inercia que depende del peso del asiento en los bloques pélvicos ya que estos se encuentran próximos al centro de gravedad del asiento, al igual que las cargas nominales la carga de inercia depende de la categoría del vehículo siendo igual a 6.6 veces el peso del asiento en el caso de autobuses.
- Las cargas de tracción se deben aplicar con una inclinación de entre 5° y 15°.
- Los anclajes deben ser capaces de soportar las cargas aplicadas durante 0.2 segundos sin romperse.

La figura 2.16 muestra las condiciones de un ensayo de resistencia de anclajes de seguridad de tres puntos en un automóvil.

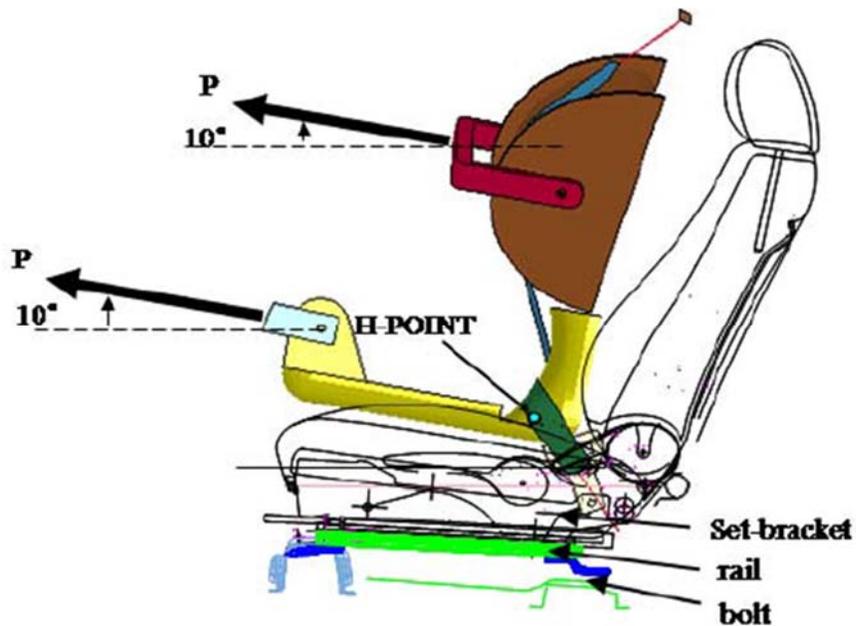


Figura 2. 16. Condiciones para un ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un automóvil. [2]

2.1.3. Análisis por elementos finitos

El desarrollo de nuevas herramientas informáticas que facilitan muchos procesos como el modelado de elementos y su análisis ha hecho que en los últimos años el análisis por elementos finitos gane mucha importancia en la ingeniería, siendo ampliamente utilizado en el análisis de elementos y estructuras, diseño, prototipado y optimización de productos al realizar simulaciones conducidas por ordenador evitando así procesos y cálculos complejos realizados anteriormente en forma manual. [16]

El método de elementos finitos consiste en un método de cálculo que en lugar de considerar a un cuerpo como continuo lo divide en un número finito de elementos de un determinado tamaño que se conectan entre ellos a través de nodos cuyo comportamiento se define por medio de las condiciones de borde [17], es decir se discretiza el modelo inicial con lo que se obtiene un sistema de ecuaciones que se resuelven numéricamente facilitando resolución de problemas cuya solución analítica es muy compleja [18]. La figura 2.17 muestra la discretización de un cuerpo continuo en elementos finitos.

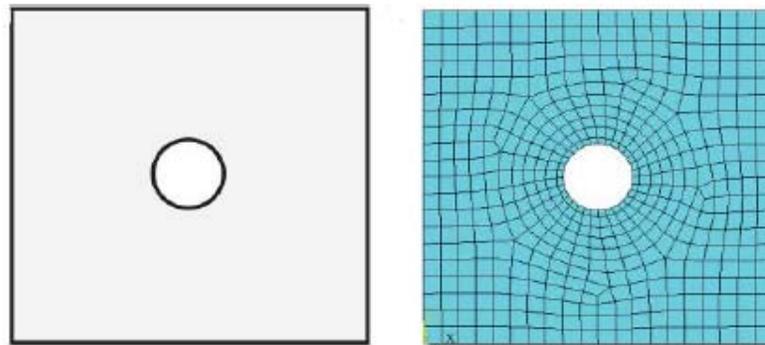


Figura 2. 17. Discretización de un elemento continuo. [16]

2.1.3.1. Aplicaciones del análisis por elementos finitos

Debido a la versatilidad del método de elementos finitos, éste puede ser aplicado en varias áreas de ingeniería e industrias como la automotriz, aeroespacial, defensa, diseño y desarrollo de productos, energía, transportes, construcción, materiales, biomecánica, etc. Para ello los programas especializados en elementos finitos

incluyen herramientas específicas para determinados casos. La tabla 2.2 muestra aplicaciones específicas en diferentes áreas de ingeniería.

Tabla 2. 2. Aplicaciones del método de elementos finitos. [16]

ÁREA DE ESTUDIO	EJEMPLOS DE APLICACIONES
Mecánica estructural	Análisis de resistencia estructural, colisión de vehículos, resistencia de componentes mecánicos, optimización de componentes y materiales
Análisis térmicos y transferencia de calor	Enfriamiento y calentamiento de cuerpos, fundición, transferencia de calor en motores de combustión interna
Fluidos	Análisis aerodinámico de vehículos, modelado de flujos de aire, flujo de líquidos
Electromagnetismo/electrostática	Cálculos en sensores y actuadores, diseño de antenas, interferencias electromagnéticas

2.1.3.2. Proceso para la resolución de problemas por el método de elementos finitos

Si bien es cierto cada problema que se desea resolver es diferente y tiene sus propias condiciones y parámetros, además de que cada programa software tiene sus diferencias, existe un proceso generalizado que puede aplicarse en la resolución de problemas por el método de elementos finitos, el cual se divide en tres etapas:

1) Pre proceso: En esta etapa el usuario define todas las condiciones necesarias previas a la resolución del problema [19], éstas son:

- Modelado del elemento o sistema que se va a analizar, esto significa crear una representación geométrica lo más cercana posible al objeto real.
- Discretización del modelo o mallado, se divide al modelo en varios elementos y nodos, considerando la adecuada distribución de éstos en la geometría del objeto además de su número ya que a mayor número de elementos se requiere un mayor gasto computacional.
- Definición de las propiedades de los elementos, asignando un material, espesor de elementos de ser necesario, conexiones entre nodos y formulaciones.

- Definición de condiciones de borde, se asignan cargas, desplazamientos o grados de libertad de movimiento tratando de replicar las condiciones reales del problema que se desea analizar.
- 2) **Solución:** En esta fase con las condiciones definidas anteriormente, se generan y se resuelven las ecuaciones de cada nodo, obteniendo la solución requerida para el tipo de análisis que se realice, en esta etapa el usuario no tiene control sobre el proceso ya que éste es realizado en forma autónoma por el ordenador empleando algoritmos propios de cada software o solver [19].
 - 3) **Post proceso:** En esta etapa se muestran en forma gráfica, generalmente con escalas de colores, los resultados obtenidos, el usuario debe ser capaz de interpretar adecuadamente estos resultados para verificar que estos sean correctos, en caso de no serlo se debe repetir el proceso anterior variando alguna de las condiciones planteadas inicialmente [19].

La figura 2.18 muestra un esquema resumido del proceso de resolución de problemas por el método de elementos finitos.

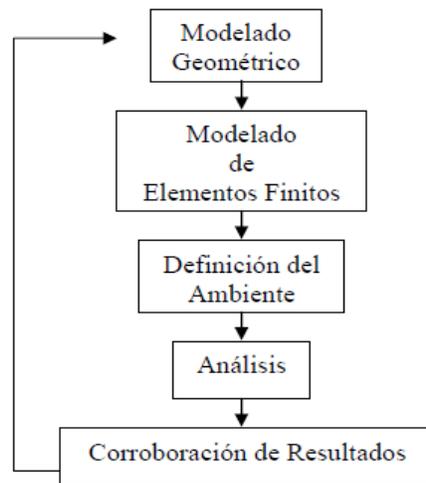


Figura 2. 18. Resolución de problemas por el método de elementos finitos. [18]

2.1.3.3. Software para análisis por elementos finitos

Debido a que el método de elementos finitos tiene cada vez un mayor uso a nivel mundial, una variedad de programas especializados se han desarrollado para este fin, siendo los más populares aquellos que incluyen la capacidad de realizar diferentes tipos de análisis, sin embargo existen algunos programas enfocados en un tipo de análisis por lo que son utilizados en aplicaciones específicas. Entre los programas más conocidos para el análisis por elementos finitos se encuentran:

- Abaqus
- Advance Design
- ANSA
- ANSYS
- Autodesk simulation
- AutoForm
- COMSOL Multiphysics
- DYNA 3D
- Hyperworks
- LS – DYNA
- MADYMO
- MSC Patran/Nastran
- Radioss
- SAP 2000 [18]

2.1.4. Análisis estructural por elementos finitos

El análisis estructural es el que más uso y aplicación tiene con el método de elementos por lo que no se lo debe confundir al relacionarlo únicamente con aplicaciones de construcción e ingeniería civil, sino por el contrario se aplica en estructuras navales, aeronáuticas, automotrices y mecánicas, además del análisis de componentes de máquinas. [20]

En estos análisis se pueden calcular diferentes resultados como esfuerzos, deformaciones y fuerzas de reacción a partir de desplazamientos nodales, los cuales son calculados inicialmente mediante la resolución de un sistema de ecuaciones [20].

2.1.4.1. Tipos de análisis estructural por elementos finitos

Entre los tipos de análisis estructural que se pueden realizar se encuentran los siguientes:

- **Análisis estático:** Este tipo de análisis calcula los efectos de una carga estable sobre una estructura o componente ignorando efectos de la inercia y amortiguaciones como las que se generan con cargas variables en el tiempo, sin embargo se pueden incluir cargas inerciales estables como velocidades rotacionales y gravedad, de la misma manera se pueden aproximar las cargas variables como cargas estáticas equivalentes. [20]

Este tipo de análisis se usa principalmente para determinar desplazamientos, esfuerzos deformaciones y fuerzas, se asume que las cargas aplicadas varían lentamente con respecto en el tiempo, lo cual se ve reflejado en la respuesta del elemento o estructura analizada. A pesar de estas condiciones se pueden tener análisis lineales y no lineales. [20]

Para obtener los resultados se utiliza un cálculo matricial que relaciona las deformaciones, fuerzas externas y rigidez [20], dicha relación es la siguiente:

$$[K] * \{u\} = \{F\} \quad (2.1)$$

Donde:

[K]: Matriz de rigidez

{u}: Vector de desplazamientos nodales

{F}: Vector de fuerzas externas

La figura 2.19 muestra un ejemplo del análisis estático de un elemento mecánico.

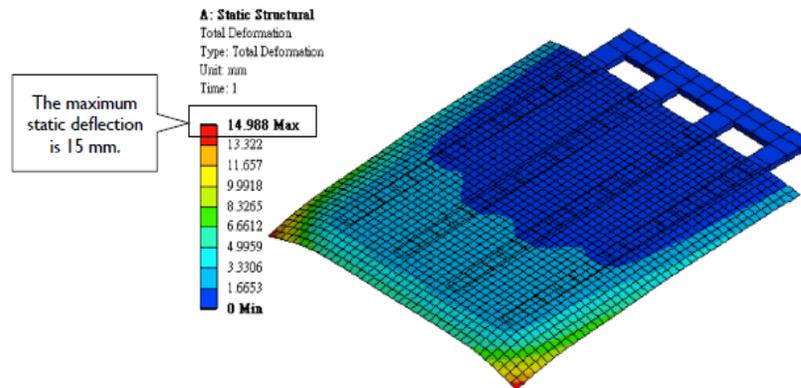


Figura 2. 19. Análisis estático de un elemento mecánico. [21]

- **Análisis transitorio:** Este tipo de análisis también se denomina análisis dependiente del tiempo, ya que en él se determina la respuesta dinámica de una estructura o componente bajo la acción de una carga variable en función del tiempo, a diferencia de un análisis estático los efectos de la inercia y amortiguaciones son considerados requiriendo un mayor gasto computacional que un análisis estático, por ello de ser posible se puede simplificar el modelo inicial con el fin de obtener uno equivalente que pueda ser resultado de forma estática. Si se considera que los efectos de la inercia y amortiguaciones no son importantes. [20]

Al ser un análisis dependiente del tiempo, es muy importante definir el tiempo total de solución el cual a su vez es dividido en segmentos de tiempo para los cuales se van resolviendo las ecuaciones que se generan permitiendo obtener soluciones en diferentes intervalos hasta el tiempo total, con lo cual se puede conocer el comportamiento gradual de la estructura u objeto analizado [20], cabe destacar que cuanto mayor sea el tiempo total de solución mayor será el gasto computacional requerido, de la misma manera si se establecen demasiados segmentos de tiempo con muy corta duración.

La ecuación matricial básica utilizada en este tipo de análisis incluye los efectos de la masa y amortiguación. Así:

$$[M] * \{\ddot{\mathbf{u}}\} + [C] * \{\dot{\mathbf{u}}\} + [K] * \{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}(t)\} \quad (2.2)$$

Donde:

[M]: Matriz de masa

[C]: Matriz de amortiguación

[K]: Matriz de rigidez

$\{\ddot{\mathbf{u}}\}$: Vector de aceleraciones nodales

$\{\dot{\mathbf{u}}\}$: Vector de velocidades nodales

$\{\mathbf{u}\}$: Vector de desplazamientos nodales

$\{\mathbf{F}(t)\}$: Vector de fuerzas externas

La figura 2.20 muestra un ejemplo del análisis dinámico de un impacto de dos cuerpos.

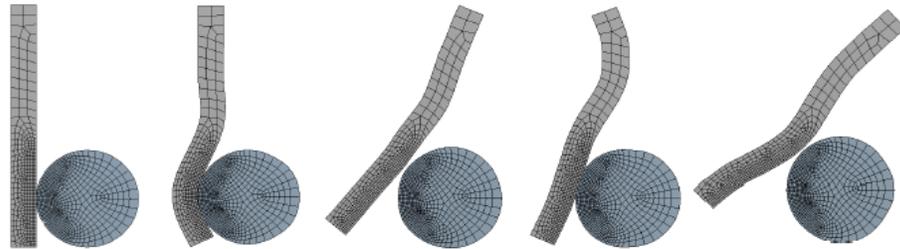


Figura 2. 20. Análisis dinámico del impacto de dos cuerpos. [21]

- **Análisis modal:** Este tipo de análisis se usa para determinar las características vibratorias como frecuencias naturales y modos de vibración de una estructura, máquina o componente, sirviendo como punto de partida en el diseño de máquinas y estructuras donde se puede complementar con análisis posteriores estáticos y dinámicos. [20]

La ecuación general que se utiliza para la resolución de este tipo de análisis no considera la acción de fuerzas externas ni de amortiguaciones ya que se consideran los efectos de una amortiguación libre sin amortiguación, la ecuación es:

$$[M] * \{\ddot{\mathbf{u}}\} + [K] * \{\mathbf{u}\} = \mathbf{0} \quad (2.3)$$

Donde:

[M]: Matriz de masa

[K]: Matriz de rigidez

{ \ddot{u} }: Vector de aceleraciones nodales

{u}: Vector de desplazamientos nodales

La figura 2.21 muestra un ejemplo del análisis modal de vibraciones de una estructura.

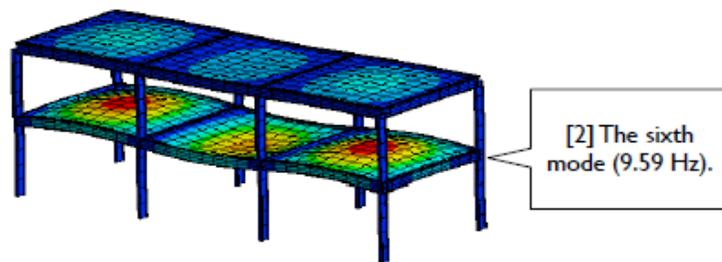


Figura 2. 21. Análisis modal de una estructura. [21]

- **Análisis armónico:** Este tipo de análisis permite evaluar el comportamiento de estructuras o componentes bajo la acción de cargas cíclicas, se emplea en el diseño de productos ya que se puede verificar su resistencia a vibraciones, resonancia y fatiga. [20]

En este tipo de análisis la ecuación general que se resuelve es la misma que en un análisis transitorio, sin embargo la fuerza externa tiene la forma:

$$F_i = A_i \text{sen}(\Omega t + \varphi_i) \quad (2.4)$$

Donde:

F_i : Fuerza externa

A_i : Amplitud de la fuerza

Ωt : Frecuencia angular de la fuerza externa

φ_i : Ángulo de fase de la fuerza

La figura 2.22 muestra un ejemplo de análisis armónico de la vibración en una cuerda.

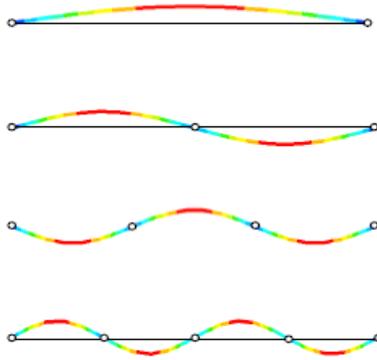


Figura 2. 22. Análisis armónico de la vibración de una cuerda. [21]

- **Análisis dinámico explícito:** Este tipo de análisis se utiliza para la solución de problemas dinámicos que en la realidad tienen una duración muy breve o generan efectos importantes en períodos muy cortos de tiempo, generalmente fracciones de segundo, como colisiones, explosiones e impactos en los cuales se tienen grandes no linealidades y deformaciones. [22]

A diferencia de los análisis dinámicos transitorios que utilizan métodos de solución implícitos, los análisis explícitos no requieren la resolución de un sistema de ecuaciones global para cada segmento de tiempo, sino que se llevan a cabo simulaciones que van modificando la malla en cada segmento de tiempo. Las ecuaciones que se plantean son a nivel local para cada elemento en lugar de sistemas de ecuaciones globales que involucran a todo el sistema, haciendo posible realizar cálculos en paralelo para resolver varios elementos a la vez; por esta razón las soluciones explícitas son más rápidas para cada segmento de tiempo. [21]

En los análisis explícitos se pueden evaluar más segmentos de tiempo de menor duración a diferencia de los análisis implícitos, además se permite una mayor distorsión de la malla, con lo cual los resultados obtenidos son más cercanos a la realidad en fenómenos de corta duración que impliquen grandes cantidades de energía y altas velocidades. [21]

La ecuación general para la resolución de este tipo de problemas es la misma que se emplea en los análisis transitorios.

La figura 2.23 muestra un ejemplo de análisis dinámico explícito de un impacto a alta velocidad.



Figura 2. 23. Análisis dinámico explícito de un impacto a alta velocidad.

[21]

2.1.5. Análisis lineales y no lineales

Años atrás los análisis explícitos no contaban con una gran aceptación ya que tenían un alto grado de complejidad y requerían grandes tiempos para la solución de problemas, sin embargo gracias al desarrollo de herramientas informáticas cada vez más fáciles de usar que incluyen algoritmos de solución más eficientes y rápidos además de la disponibilidad de equipos con mejores características físicas ha sido posible un mayor uso de análisis no lineales que permiten obtener resultados más aproximados a la realidad, lo cual es de gran utilidad en campos de la ingeniería y el diseño. [23]

2.1.5.1. Análisis lineales

En este tipo de análisis se parte de la relación mostrada en la ecuación 2.1, en la cual se considera la relación existente entre los desplazamientos nodales, la rigidez y las fuerzas externas aplicadas. Partiendo de esta relación se establece la base del análisis lineal, la cual considera a la rigidez como constante sin importar las cargas que se apliquen, su forma de aplicación o cuanto se deforme el modelo.

Al hacer esta suposición se considera que aunque la rigidez tenga variaciones muy pequeñas, éstas no afectarán a la forma del elemento que se esté analizando ni a las propiedades de su material ya que la matriz de rigidez depende directamente de factores como la geometría del modelo, su material y sus restricciones.

Ya que en la ecuación general de solución del problema la rigidez representa los valores de proporcionalidad entre las cargas aplicadas y los resultados obtenidos en los desplazamientos nodales, al ser la rigidez una constante la relación entre cargas y desplazamientos tendrá un comportamiento lineal. [21]

Debido a esto la solución de problemas lineales es rápida ya que las ecuaciones que se generan solamente deben resolverse una vez desde el inicio al final del problema, por lo que no se realizan actualizaciones de estado mientras el modelo se va deformando, lo cual representa un bajo gasto computacional sin importar que tan grande sea al modelo que se vaya a analizar. [23]

Por el contrario en los análisis no lineales la rigidez varía en función del tiempo, lo cual requiere de una solución más compleja y de mayor duración debido a que es necesario resolver un nuevo sistema de ecuaciones en fracciones del tiempo total de solución. [23]

La figura 2.24 muestra las relaciones entre las fuerzas externas aplicadas a un modelo y los desplazamientos nodales obtenidos para análisis lineales y no lineales.

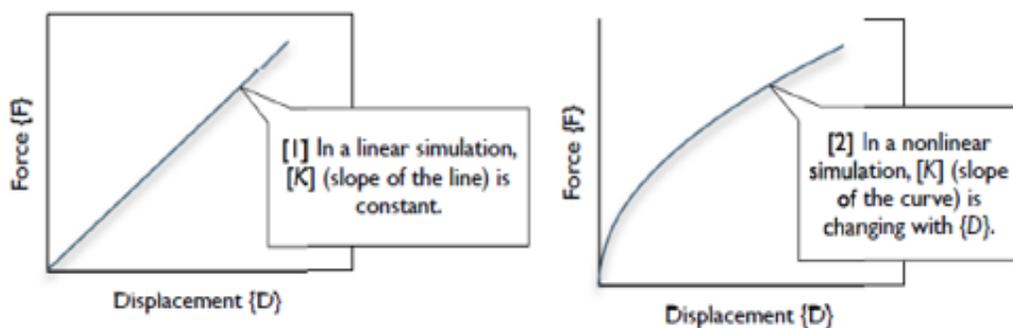


Figura 2. 24. Relaciones entre fuerzas y desplazamiento lineales para análisis lineales y no lineales. [21]

2.1.5.2. Análisis no lineales

A diferencia de los análisis lineales donde la rigidez del modelo se considera constante, los análisis no lineales la consideran una variable que puede cambiar debido a ciertos factores denominados no linealidades las cuales pueden ser geométricas, topológicas o de materiales. [21]

- **No linealidades geométricas:** Estas no linealidades se deben a grandes deformaciones sean éstas desplazamientos o rotaciones producidas en el modelo, las cuales ocasionan cambio en la rigidez [23].
- **No linealidades topológicas:** Estas no linealidades se refieren básicamente a cambios en las condiciones de entorno de un sistema e interacciones entre sus componentes, siendo las más importantes la falla o rotura de algún componente, variaciones en las condiciones de contacto inicial o cambios en las condiciones de carga, produciendo alteraciones en la rigidez al tener comportamientos desconocidos del sistema a medida que se producen estos cambios. [23]
- **No linealidades de material:** Estas no linealidades se producen debido a cambios en las propiedades de los materiales [23], tales cambios se deben a relaciones de esfuerzos y deformación no lineales de materiales, las cuales son propias de materiales plásticos y elastómeros.

Se denomina lineal a un material que cumple con la ley de Hooke [21], es decir que la relación esfuerzo – deformación sea constante, con lo cual un material de este tipo se denomina elástico ya que será capaz de recuperar su forma original luego de soportar una carga, sin embargo no siempre se puede tener este comportamiento en un material ya que si se supera una carga límite de se producirán deformaciones permanentes, en este caso el comportamiento del material será plástico pudiendo llegar romperse tras sufrir una deformación extrema; también existen materiales que son capaces de sufrir grandes deformaciones, las cuales son no lineales, estos materiales se denominan elastómeros o hiperelásticos.

En la realidad los materiales no pueden presentar únicamente un comportamiento elástico lineal, sino que más bien su comportamiento varía en función de las cargas aplicadas y las condiciones ambientales, teniendo materiales elasto – plásticos como el caso de los metales, rígidos, frágiles e hiperelásticos como caso de los elastómeros pueden deformarse mucho hasta romperse.

2.1.6. Mallado por elementos finitos

La base del método de elementos finitos es la discretización de un modelo continuo en un número finito de elementos de un tamaño determinado tratando de obtener una aproximación a un modelo real que busca obtener resultados válidos, aunque si bien es cierto con este método no se pueden obtener resultados totalmente exactos el uso de un buen mallado contribuye a una solución adecuada.

En un buen mallado se debe tener una adecuada distribución de elementos en el modelo procurando que éstos sean uniformes en tamaño y forma, existen varios tipos de elementos con diferentes formas y propiedades, los cuales deben elegirse cuidadosamente en función del tipo de análisis que se realiza y de la forma del modelo ya que se debe procurar que los objetos reproduzcan la forma del modelo inicial.

Cabe destacar que con un mayor número de elementos se puede tener una mejor adaptación a la geometría del modelo, sin embargo esto representará un mayor gasto computacional por lo que se debe buscar un equilibrio entre el número de elementos utilizados y el gasto computacional ya que no siempre una malla excesivamente refinada produce resultados más exactos. [19]

2.1.6.1. Tipos de elementos

Existen varios tipos de elementos que pueden emplearse en el mallado dependiendo del problema que se va a analizar, básicamente los elementos se dividen en tres grupos:

- a) Elementos unidimensionales
- b) Elementos bidimensionales
- c) Elementos tridimensionales

a) **Elementos unidimensionales:** También denominados elementos línea, los elementos más comunes en este grupo son:

- **Elementos truss:** Son elementos lineales formados por dos nodos, uno en cada extremo con tres grados de libertad por cada nodo, se caracterizan porque solamente pueden soportar cargas axiales de tracción o compresión en sus extremos, para utilizarlos se requiere definir su sección transversal, se recomienda su uso en elementos cuya longitud sea entre 8 y 10 veces mayor que su alto o ancho [19]. La figura 2.25 muestra un elemento truss representado en tres dimensiones.

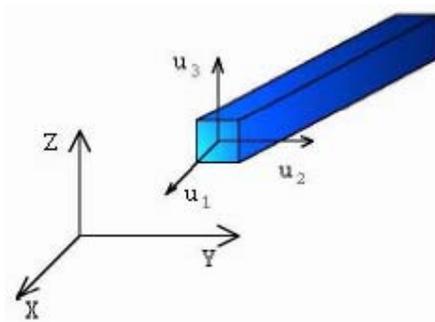


Figura 2. 25. Elemento truss. [19]

- **Elementos beam:** Son elementos lineales formados por dos nodos con seis grados de libertad por cada nodo, a diferencia de los elementos truss pueden soportar tanto cargas axiales como transversales, es decir que pueden actuar a tracción, compresión y flexión, para utilizarlos es necesario definir su sección transversal, resistencia a la torsión y el momento de inercia, son los elementos unidimensionales más usados en análisis de estructuras principalmente, se recomienda su uso en elementos cuya longitud sea al menos 10 veces mayor que su alto o ancho [19]. La figura 2.26 muestra un elemento beam representado en tres dimensiones.

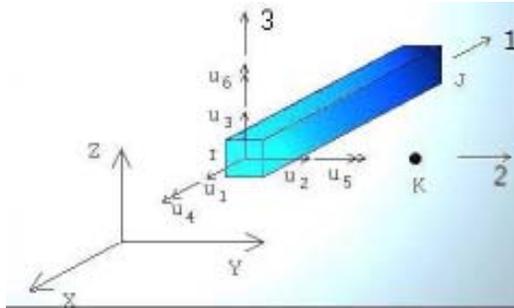


Figura 2. 26. Elemento beam. [19]

b) **Elementos bidimensionales:** También denominados elementos planos o superficiales, generalmente son triángulos o cuadriláteros con tres o cuatro nodos respectivamente, uno en cada uno de sus vértices, aunque de ser necesario se pueden tener nodos adicionales en sus aristas o en su superficie, las configuraciones más comunes pueden incluir un nodo adicional en el centro de cada arista o en el centro de la superficie. La figura 2.27 muestra elementos bidimensionales triangulares y cuadriláteros con diferentes disposiciones de nodos.

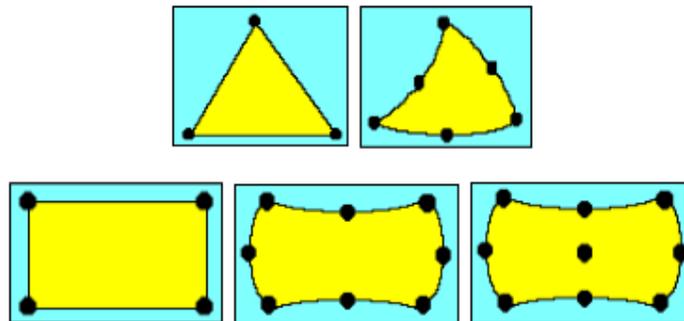


Figura 2. 27. Elementos bidimensionales con diferentes disposiciones de nodos. [24]

Los elementos más comunes en este grupo son:

- **Elementos membrana:** Son elementos planos con dos grados de libertad en cada nodo, soportan únicamente esfuerzos axiales pero no flexión, es decir esfuerzos planos y deformaciones planas, para utilizarlos es necesario definir el espesor del elemento en cada nodo [20]. La figura 2.28 muestra un elemento membrana representado en forma tridimensional.

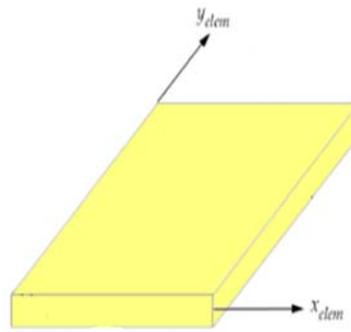


Figura 2. 28. Elemento membrana. [24]

- **Elementos Shell:** Son elementos planos con seis grados de libertad en cada nodo y son capaces de soportar esfuerzos axiales y de flexión, son los elementos bidimensionales de este tipo y para utilizarlos es necesario definir el espesor en cada nodo [20]. La figura 2.29 muestra un elemento Shell representado en forma tridimensional.

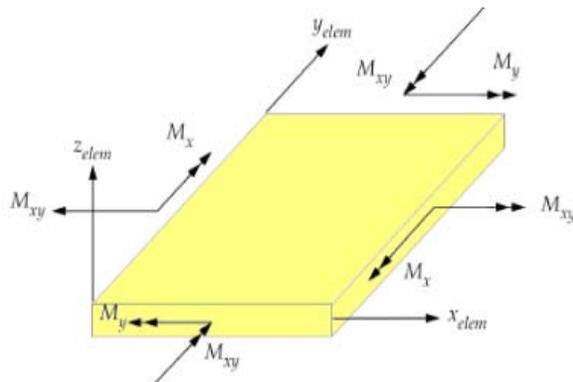


Figura 2. 29. Elemento Shell. [24]

- c) **Elementos bidimensionales:** También determinados elementos sólidos utilizados en análisis tridimensionales, sus nodos se ubican generalmente en los vértices aunque de requerirse se pueden ubicar nodos adicionales en las aristas o caras, los elementos más comunes de este grupo son:
- **Elementos tetraédricos:** Son elementos sólidos con tres grados de libertad en cada nodo, se puede decir que estos elementos son triángulos tridimensionales [19]. La figura 2.30 muestra un elemento tetraédrico.

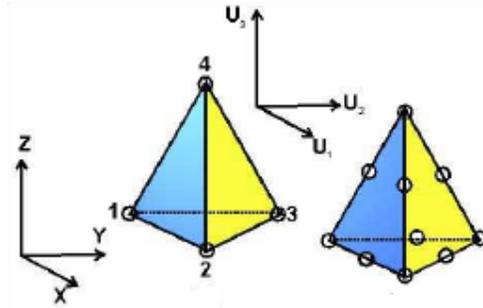


Figura 2. 30. Elemento tetraédrico. [19]

- **Elementos hexaédricos:** Son elementos sólidos con tres grados de libertad en cada nodo, su forma la de un cuadrilátero tridimensional [19]. La figura 2.31 muestra un elemento hexaédrico.

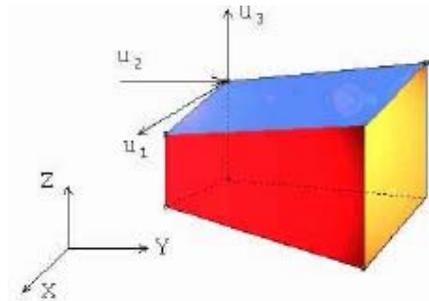


Figura 2. 31. Elemento hexaédrico. [19]

2.1.6.2. Selección del tipo de elementos y recomendaciones para mallado

Para la selección más adecuada del tipo de elementos que se van a utilizar es necesario saber exactamente qué es lo que se desea analizar y cuáles son los resultados esperados, para ello se debe realizar un modelo digital que permita reconocer discontinuidades, irregularidades, geometrías complejas y partes que puedan ser simplificadas o eliminadas.

Se debe considerar que el uso de elementos tridimensionales implica un mayor gasto computacional, por lo que de ser posible se deben utilizar elementos bidimensionales, los elementos Shell son una buena opción si se desea realizar un cálculo de esfuerzos y deformaciones, también se deben aprovechar las simetrías ya que en estos casos se puede reducir el modelo al analizar únicamente una sección de éste que sea equivalente a las demás.

De ser posible un modelo puede simplificarse aún más con el uso de elementos unidimensionales, tal es el caso de estructuras como pórticos y armaduras. [19]

Una vez definido el modelo que se va a analizar y se han elegido los elementos que se utilizarán para el mallado se pueden considerar las siguientes recomendaciones para obtener buenos resultados:

1. Ubicar los nodos en los lugares donde se tengan cargas, soportes o discontinuidades, es decir en aquellos lugares donde se desean obtener resultados.
2. Mantener la uniformidad en la malla siempre que sea posible, se debe considerar que esto no será posible en cambios bruscos de geometría, curvaturas, discontinuidades y contactos; en estos lugares es recomendable refinar la malla.
3. Usar preferentemente elementos cuadriláteros y hexaédricos a excepción de irregulares considerables y puntos de aplicación de cargas donde se requieran elementos triangulares y tetraédricos para una mejor adaptación.
4. Refinar la malla en aquellas zonas donde se requieran obtener resultados, se pueden realizar análisis progresivos con diferentes tamaños de malla hasta encontrar el punto de equilibrio adecuado entre el gasto computacional que se relaciona directamente con el número de elementos y la exactitud de los resultados.
5. Mantener una proporción entre el tamaño de los elementos, procurando que ésta sea 1 de ser posible, si se tienen cambios en el tamaño de los elementos éstos deben tener una proporción no mayor de 2 a 1.
6. Si se tienen discontinuidades geométricas como agujeros y curvaturas se debe realizar un refinamiento de la malla siempre y cuando los resultados en dichas zonas sean relevantes, se puede tener una mejor adaptación a estas formas con operaciones como mapeados.

2.1.6.3. Parámetros de evaluación de la calidad de mallado

Una vez generada una malla para análisis por elementos finitos es necesario conocer si ésta tiene una calidad aceptable que permita obtener buenos resultados, es por ello que existen varios parámetros de evaluación, los cuales se enfocan en la forma y uniformidad de cada elemento.

Cada parámetro toma como referencia a dos elementos básicos ideales, los cuales son un cuadrado y un triángulo equilátero perfecto, a partir de ellos se establece la calidad de los elementos en una malla considerando que tan próximos se encuentran éstos en su forma a los elementos ideales, de ahí que se pueden tener elementos de calidad ideal, aceptable o muy pobre, siendo este el parámetro de evaluación más simple. La figura 2.32 muestra varias configuraciones de calidad de elementos.

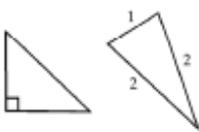
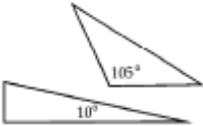
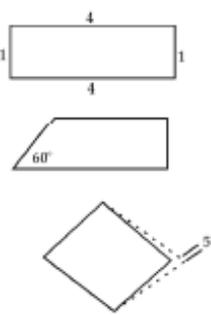
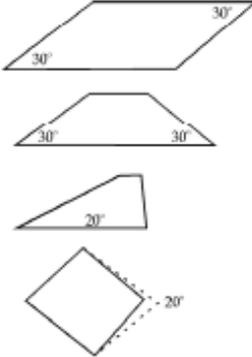
BEST	OK	VERY POOR
		
		

Figura 2. 32. Calidad de elementos triangulares y cuadriláteros. [25]

Dentro de los parámetros de evaluación de calidad de elementos en una malla se encuentran los siguientes:

- **Relación de aspecto (Aspect ratio):** Este es quizá el parámetro más utilizado para evaluar la calidad de elementos en una malla, en el caso de los elementos

bidimensionales se calcula dividiendo el lado de mayor longitud para el de menor longitud, en elementos tridimensionales se realiza esta operación en cada cara del elemento. Los valores recomendables para este parámetro varían del tipo de elemento, integración y análisis realizado, existen diferentes opiniones al respecto, tal es así que según [25] es recomendable tener relaciones de aspecto entre 1 y 5, sin embargo lo que debe procurarse es llegar lo más cerca posible al valor de 1 que representa un elemento ideal o por lo menos se debe evitar tener elementos con relaciones muy altas ya que se pueden obtener resultados poco confiables. La figura 2.33 muestra la relación de aspecto de un elemento bidimensional.

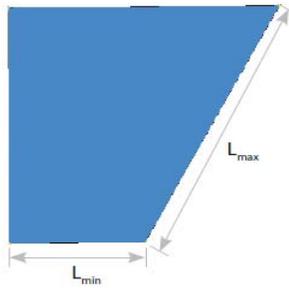


Figura 2. 33. Relación de aspecto de un elemento bidimensional. [25]

- **Jacobiano (Jacobian ratio):** Es la desviación existente entre un elemento determinado y un elemento ideal utilizado como patrón de comparación, esta comparación se realiza al transformar las coordenadas globales de un elemento en coordenadas locales. Los valores que se pueden obtener pueden ir de -1 a 1, siendo 1 el valor ideal, los valores recomendables van de 0.5 a 1 [25].
- **Oblicuidad (Skewness):** Es la diferencia entre un ángulo recto y el menor ángulo que se forma en la intersección de dos segmentos que cortan el elemento, en elementos triangulares la intersección se forma entre un segmento que va de un vértice al punto medio de su lado opuesto y un segmento que une los puntos medios de los lados adyacentes al vértice, deben evaluarse los tres vértices del elemento; en elementos cuadriláteros la intersección se forma entre dos segmentos que unen los puntos medios de los lados del elemento, en el caso de elementos tridimensionales se realiza este proceso en cada cara. Los valores recomendables de oblicuidad van de 0° a 45° siendo 0° el valor ideal [25]. La figura 2.34 muestra la oblicuidad de un elemento triangular y uno cuadrilátero.

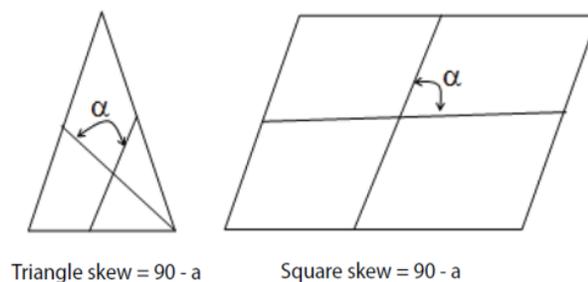


Figura 2. 34. Oblicuidad en elementos triangulares y cuadriláteros. [25]

- **Curvatura (Warpage):** Este parámetro se calcula al dividir un elemento cuadrilátero en dos triángulos por medio de una de sus diagonales y al medir el ángulo que forman los dos planos sobre los que se ubican los triángulos, luego se repite el proceso con la diagonal restante, la curvatura del elemento se determina por el mayor ángulo formado; en elementos triangulares no se puede aplicar este parámetro, mientras que en elementos tridimensionales se realiza el proceso en cada una de sus caras. Los valores recomendables de curvatura van de 0° a 30° , siendo 0° el valor ideal [25]. La figura 2.35 muestra la curvatura de un elemento cuadrilátero.

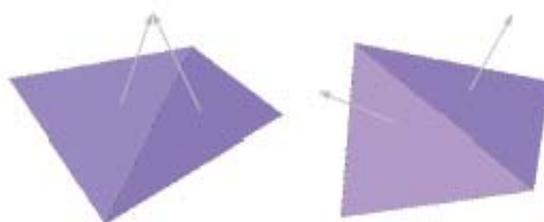


Figura 2. 35. Curvatura de un elemento cuadrilátero. [25]

Todos los descritos para la evaluación de calidad de malla son únicamente referencias ya que al tener modelos con geometrías complejas no será posible cumplir con todos los parámetros, por ello se debe buscar un mallado en el que la mayoría de elementos tengan una buena calidad o calidad aceptable.

En caso de tener elementos cuya calidad sea muy mala se pueden realizar operaciones de mejoramiento como refinamientos, mapeos o reubicación manual de nodos ya que los elementos de calidades muy bajas pueden ser concentradores de esfuerzos y producir resultados no deseados [25].

2.1.7. Hourglassing

Ya que los análisis dinámicos explícitos son usados en la solución de problemas que implican grandes cantidades de energía, altas velocidades y grandes deformaciones los elementos que conforman la malla de un modelo son más susceptibles a sufrir distorsiones en su forma, lo cual puede causar soluciones inexactas.

Estas distorsiones son producidas por los modos de hourglass o hourglass modes, los cuales se pueden definir como modos no físicos de deformación que no generan esfuerzos ni deformaciones [26], es decir producen deformaciones distorsionadas y no reales en los elementos, siendo lo más susceptibles a ellas los elementos con integración reducida, es decir los elementos Shell cuadriláteros y sólidos hexaédricos, ya que en elementos triangulares y tetraédricos no se genera este problema [27]. La figura 2.36 muestra las distorsiones que se pueden producir en un elemento hexaédrico.

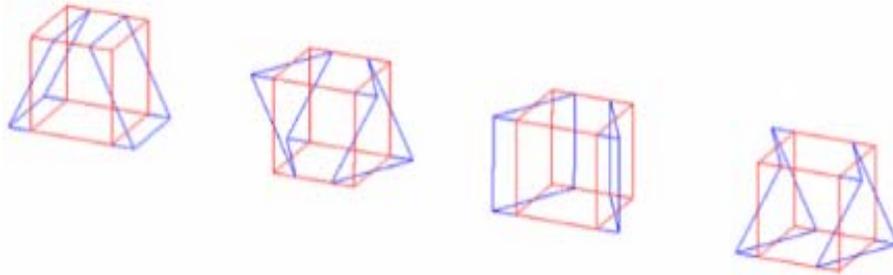


Figura 2. 36. Distorsión en la forma de un elemento debido a hourglassing. [27]

Debido a la distorsión en la forma de los elementos puede resultar fácil identificar el problema, y en tales casos se pueden aplicar diferentes opciones para solucionarlo, una de ellas es el uso de elementos completamente integrados, los cuales son usados preferentemente en problemas de solución implícita aunque se requerirá un mayor gasto computacional, también se pueden realizar refinamientos de malla en aquellas zonas donde se identifique el problema requiriendo también un mayor gasto computacional, otra forma de controlar este problema es mediante la aplicación de algoritmos que se incluyen en los programas para análisis por elementos finitos [27]. La figura 2.37 muestra un ejemplo de análisis cuyos resultados se ven afectados por el hourglassing.

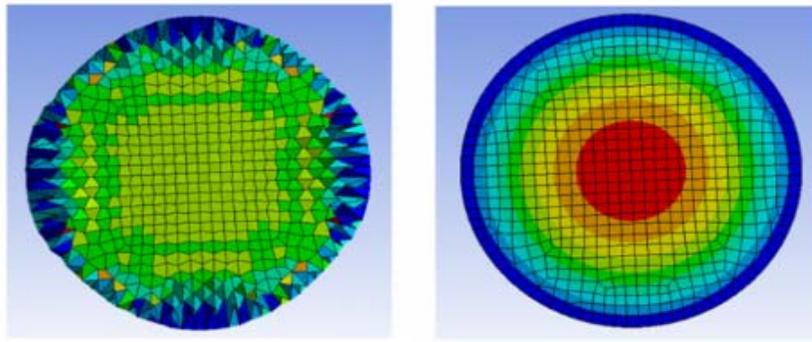


Figura 2. 37. Influencia del hourglassing en los resultados de un análisis. [28]

Como ya se había mencionado anteriormente existen algoritmos de control de hourglass, los cuales introducen fuerzas nodales adicionales en los elementos con el fin de contrarrestar las distorsiones, existen dos tipos de ellos:

- a) **Controles basados en la viscosidad:** Tienen como finalidad controlar las distorsiones al añadir amortiguación a los elementos por medio de fuerzas proporcionales a los componentes de las velocidades nodales, se recomiendan principalmente en problemas que involucren velocidades muy altas y deformaciones excesivas como explosiones e impactos balísticos [26].
- b) **Controles basados en la rigidez:** Este tipo de algoritmos añaden rigidez a los elementos por medio de fuerzas proporcionales a los componentes de los desplazamientos nodales, se recomiendan en problemas que no impliquen cantidades de energía excesivas como por ejemplo colisiones, se debe considerar que al utilizar estos algoritmos de control se pueden tener soluciones no adecuadas debido a la rigidización del modelo, para evitar esto se recomienda reducir el coeficiente de hourglass que por defecto es igual a 0.1 a valores entre 0.03 y 0.05 [26].

Aunque en muchos casos puede ser fácil detectar las distorsiones causadas por hourglassing, en otras ocasiones esto no resulta tan sencillo ya que las distorsiones no son tan aparentes, para ello se recomienda revisar la energía de hourglass, la cual se produce por las fuerzas añadidas en los elementos para evitar las distorsiones retirando energía del sistema [26].

Se debe procurar que esta energía sea lo más baja posible evitando que supere el 10 % de la energía interna del sistema, ya que si se supera este valor significa que se está retirando demasiada energía lo cual puede generar resultados inexactos, menores a los que en realidad se deberían obtener [28].

2.1.8. Mecánica de materiales

La mecánica de materiales se encarga del estudio del comportamiento de cuerpos deformables bajo la acción de cargas externas, permitiendo determinar sus esfuerzos, deformaciones unitarias y desplazamientos [29], es decir que se analizan las relaciones entre las cargas externas y sus efectos en el interior de los cuerpos, para ello es necesario conocer dos conceptos fundamentales en la mecánica de materiales: el esfuerzo y la deformación unitaria [30].

- **Esfuerzo:** Es la relación existente entre una fuerza normal de tracción o compresión aplicada en un área determinada, esto es:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.5)$$

Donde:

σ : Esfuerzo

P: Fuerza aplicada

A: Área sobre la que se aplica la fuerza

El esfuerzo se expresa en unidades de fuerza por unidad de área, las más comunes son los pascales (Pa) en el sistema internacional de unidades y libras por pulgada cuadrada (psi) en el sistema inglés:

$$Pa = \frac{N}{m^2}; psi = \frac{lb}{pulg^2}$$

- **Deformación unitaria:** Al aplicar una fuerza normal a un cuerpo éste sufrirá una deformación debido a la acción de la fuerza, pudiendo alargarse en caso de estar en tracción o comprimirse en caso de estar en compresión, la deformación

unitaria es la relación entre la longitud de la deformación producida y la longitud total inicial del cuerpo.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_o} \quad (2.6)$$

$$\delta = L_f - L_o \quad (2.7)$$

Donde:

ε : Deformación unitaria

δ : Longitud de la deformación

L_o : Longitud total inicial del cuerpo

L_f : Longitud final del cuerpo deformado

La deformación unitaria es una magnitud adimensional ya que se obtiene al dividir dos unidades de longitud.

2.1.8.1. Ensayo de tracción

Los procesos de ingeniería y diseño requieren una adecuada selección y aplicación de materiales ya que se debe garantizar que estos sean capaces de comportarse como se espera resistiendo a una determinada carga sin sufrir deformaciones excesivas [31]; para ello es necesario conocer su propiedades, mismas que se determinan por medio de ensayos realizados en laboratorios con equipos especializados bajo parámetros establecidos por reglamentos y normas [30].

El ensayo de tracción es el ensayo más común para determinar las propiedades mecánicas de un material, se realiza con especímenes normalizados que pueden ser sólidos redondos, planos o tubulares [31], la norma internacional más conocida para ensayos de tracción es la ASTM E8 en el caso de materiales metálicos, aunque cada país puede tener sus propias normativas, en el caso del Ecuador la norma aplicable para este ensayo es la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 109.

El ensayo de tracción se realiza en una máquina conocida como máquina universal ya que permite realizar diferentes ensayos de materiales, para el ensayo de tracción

dispone de dos mordazas, una fija y una móvil las cuales sujetan al espécimen de prueba, en el extremo móvil se aplican fuerzas de tracción que provocan el estiramiento del material hasta provocar su rotura, lo cual se logra por medio de la forma del espécimen con una sección mayor en sus extremos y una menor en su centro para facilitar la rotura. La figura 2.38 muestra una máquina para ensayos de tracción y la forma de un espécimen de material metálico realizado bajo la norma INEN 109.



Figura 2. 38. Máquina para ensayo de tracción y espécimen normalizado.

(Fuente: Autor)

Al iniciar el ensayo el espécimen tiene una longitud calibrada inicial y una sección transversal inicial, las cuales deben ser medidas apropiadamente porque los resultados se calcularán a partir de estos valores, se lo que se registra durante el ensayo son las fuerzas que se aplican y se convierten a esfuerzo utilizando la ecuación 2.5, paralelamente se mide el cambio de longitud calibrada inicial por medio de un extensómetro; todos los resultados obtenidos se representan en un diagrama denominado diagrama esfuerzo – deformación [32].

En un ensayo de tracción son fácilmente distinguibles varios cambios en el espécimen de prueba, éstos se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Inicio del ensayo sin carga
2. Estiramiento uniforme y reducción progresiva de la sección transversal
3. Continuación del estiramiento hasta llegar a la carga máxima
4. Formación de un estrangulamiento y disminución de la carga
5. Rotura en el estrangulamiento [32]

Se debe considerar que dependiendo de la forma del espécimen de prueba y del material evaluado no siempre se produce el estrangulamiento. La figura 2.39 muestra las fases de un ensayo de tracción.

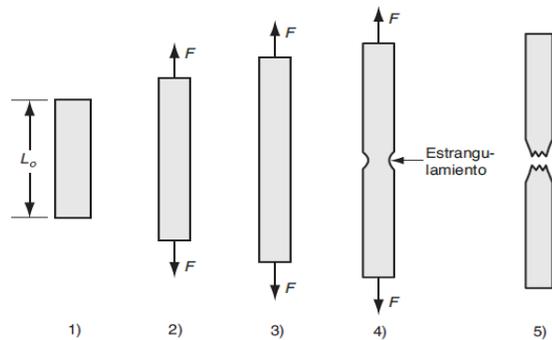


Figura 2. 39. Fases del ensayo de tracción. [32]

2.1.8.2. Diagrama esfuerzo – deformación

Una vez realizado el ensayo de tracción se obtiene como resultado un diagrama denominado diagrama esfuerzo – deformación el cual muestra el comportamiento del material evaluado, es decir su deformación al aplicarse una determinada carga, existen dos tipos de diagramas:

- a) **Diagrama esfuerzo – deformación ingenieril:** Este diagrama se construye en base a las ecuaciones 2.5 y 2.6 para calcular los esfuerzos y deformaciones respectivamente, en este diagrama la sección transversal se considera constante para el cálculo de esfuerzos, este diagrama es el que se utiliza para la caracterización de materiales, permitiendo distinguir el comportamiento de éstos, siendo las regiones y puntos más importantes del diagrama los siguientes:

- **Zona elástica:** En esta región el material tiene un comportamiento lineal cumpliendo con la ley de Hooke, es decir que la relación esfuerzo – deformación unitaria es constante, el resultado de esta relación se denomina módulo de elasticidad [32].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad del material

σ : Esfuerzo

ε : Deformación unitaria

- **Límite de proporcionalidad:** Es el límite superior de la zona elástica, a partir de él el material comienza a deformarse plásticamente aunque también se podría tener comportamiento elástico [29].
- **Límite de fluencia:** Se encuentra muy cercano al límite de proporcionalidad, sin embargo a partir de este punto el material presenta únicamente un comportamiento plástico, el esfuerzo en cual se ubica este punto se denomina esfuerzo de fluencia (S_y) y es una de las propiedades mecánicas más importantes de un material [29].
- **Zona de fluencia:** A partir del límite de fluencia el material experimenta un alargamiento considerable sin un gran incremento de fuerza, la curva tiene una forma lineal horizontal, lo cual muestra un comportamiento perfectamente plástico [30].
- **Endurecimiento por deformación:** Cuando el material deja la zona de fluencia empieza a endurecerse por deformación debido a cambios en su estructura cristalina, por ello se requiere el aumento de la fuerza para producir mayor elongación [29].
- **Esfuerzo último:** En este punto la fuerza aplicada llega a su valor máximo, el esfuerzo correspondiente a este punto define una importante propiedad mecánica del material llamada esfuerzo último a la tracción (S_{ut}) [29].

- **Zona de fractura:** Al superar el esfuerzo último se forma un estrangulamiento en el espécimen de prueba y el material experimenta una disminución fuerza aplicada [30].
- **Punto de rotura:** Al final de la zona de fractura el material sufre una rotura en el estrangulamiento [30]. La figura 2.40 muestra un diagrama de esfuerzo – deformación ingenieril con sus zonas y puntos más importantes

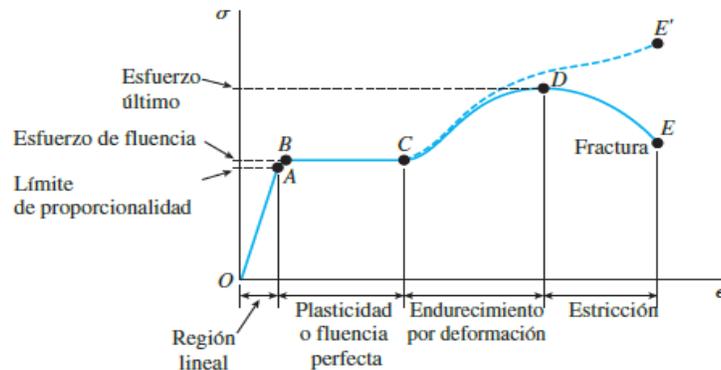


Figura 2. 40. Diagrama esfuerzo – deformación ingenieril. [30]

Muchas propiedades mecánicas importantes pueden definirse en el diagrama esfuerzo – deformación durante el ensayo, sin embargo una de ellas se define una vez concluido el ensayo, esta propiedad es la ductilidad, la cual es la capacidad de deformación plástica que el material puede soportar antes de que se produzca la falla [32], la cual puede determinarse en función de la elongación o de reducción del área, para su cálculo e utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\%EL = \frac{L_f - L_o}{L_o} * 100 \quad (2.9)$$

$$\%AR = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100 \quad (2.10)$$

Donde:

%EL: Porcentaje de elongación

L₀: Longitud inicial del espécimen

L_f: Longitud final

%AR: Porcentaje de reducción de área

A_0 : Área transversal inicial

A_f : Área transversal final

Usualmente se toma al acero para ilustrar un ensayo de tracción ya que su diagrama esfuerzo – deformación presenta todas las áreas y puntos importantes en forma clara, sin embargo otros materiales presentan comportamientos diferentes como es el caso de las aleaciones de aluminio que tienen una alta ductilidad en las cuales el límite de proporcionalidad y de fluencia no se encuentran bien definidos, en el caso de materiales hiperelásticos como el caucho pueden alargarse mucho alcanzando varias veces su longitud original pudiendo tener comportamientos casi lineales dependiendo de la composición del material, los materiales frágiles a su vez fallan a tensiones bajas y tienen elongaciones bajas por lo que se presenta una fluencia muy baja e incluso nula produciéndose la rotura cerca del límite de proporcionalidad. La figura 2.41 muestra los diagramas esfuerzo – deformación de diferentes tipos de materiales.

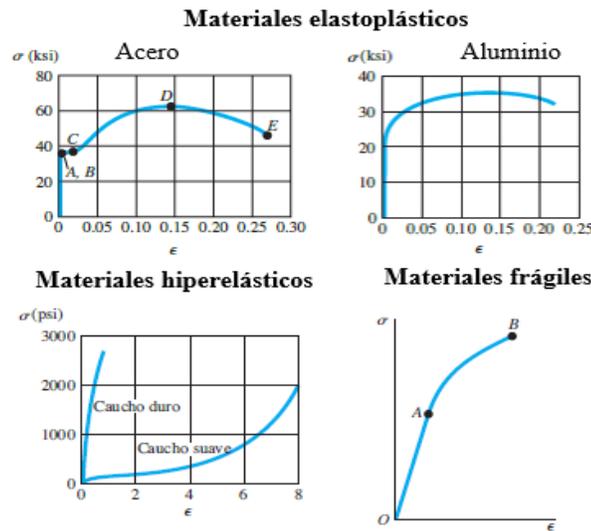


Figura 2. 41. Diagramas esfuerzo – deformación de diferentes tipos de materiales.

[30]

b) Diagrama esfuerzo – deformación real: A diferencia de un diagrama ingenieril, los diagramas reales consideran las variaciones en la sección transversal con cada carga aplicada para el cálculo del esfuerzo, por lo tanto en este diagrama los esfuerzos calculados serán mayores que los obtenidos en un

diagrama ingenieril ya que el área transversal se va reduciendo progresivamente [31]. La figura 2.42 muestra un diagrama esfuerzo – deformación real

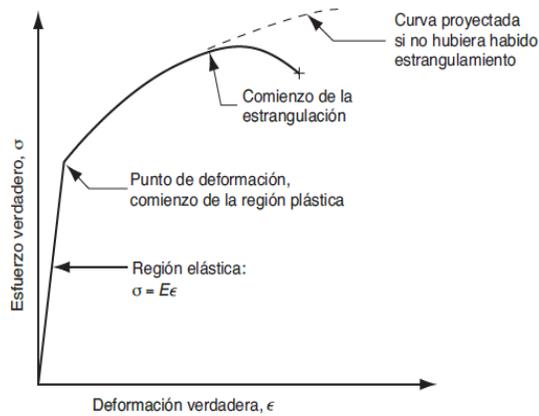


Figura 2. 42. Diagrama esfuerzo – deformación real. [32]

Las ecuaciones que permiten convertir un diagrama esfuerzo – deformación ingenieril en uno real son las siguientes:

$$\sigma_{real} = \sigma(1 + \epsilon) \quad (2.11)$$

$$\epsilon_{real} = \ln(1 + \epsilon) \quad (2.12)$$

Donde:

σ_{real} : Esfuerzo real

σ : Esfuerzo ingenieril

ϵ_{real} : Deformación unitaria real

ϵ : Deformación unitaria ingenieril

Estos diagramas a pesar de que no permitan distinguir tan claramente las propiedades mecánicas de un material como los diagramas ingenieriles permiten distinguir su comportamiento elástico y plástico de una manera más clara pudiendo tener los siguientes:

- **Perfectamente elástico:** En este caso el material tiene un comportamiento totalmente lineal elástico sin tener deformación plástica, produciéndose la rotura en la zona elástica, los materiales rígidos presentan este comportamiento [32].

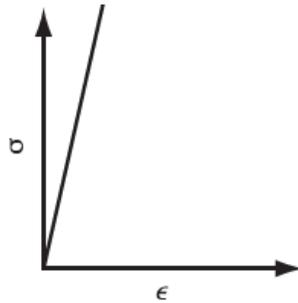


Figura 2. 43. Comportamiento perfectamente elástico de materiales. [32]

- **Elástico y perfectamente plástico:** Los materiales que presentan este comportamiento tienen deformaciones elástica y plástica, aunque al pasar a la zona plástica se producen deformaciones sin la necesidad de incrementar las fuerzas aplicadas manteniendo el esfuerzo constante, esto se producen en materiales que son conformados en caliente ya que debido a las altas temperaturas existe recristalización en lugar de endurecimiento por deformación [32].

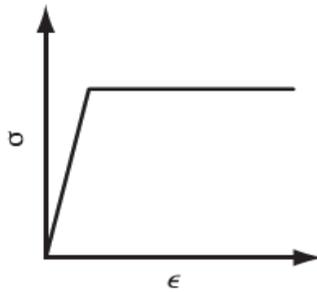


Figura 2. 44. Comportamiento elástico y perfectamente plástico de materiales. [32]

- **Elástico con endurecimiento por deformación:** Este comportamiento es usual en materiales dúctiles como los metales, los cuales presentan un comportamiento elástico hasta su límite de fluencia, a partir de ahí se presenta un comportamiento plástico lineal ascendente hasta llegar a la rotura [32].

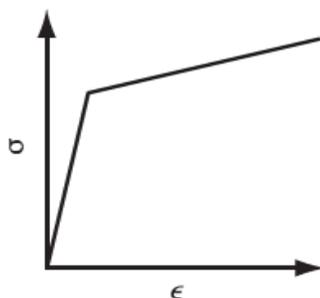


Figura 2. 45. Comportamiento elástico con endurecimiento por deformación de materiales. [32]

2.1.8.3. Ensayo de flexión de tres puntos

Se entiende como flexión a la deformación que presenta un elemento estructural en dirección perpendicular a su eje longitudinal, se produce sobre todo en elementos alargados, es decir en elementos cuya longitud sea significativamente mayor a sus otras dimensiones como es el caso de las vigas, placas y láminas que trabajan principalmente en flexión, un material sometido a flexión se comprime en su cara superior sobre la cual actúa una carga, mientras que se alarga en su cara inferior [33].

Este ensayo se realiza en máquinas especializadas que cuentan con tres puntos de apoyo, dos inferiores y uno superior entre los cuales se coloca el espécimen de prueba, generalmente los dos apoyos inferiores permanecen fijos mientras el soporte superior desciende aplicando una carga flectora aunque existen máquinas en las cuales el apoyo superior permanece fijo y los apoyos inferiores aplican la carga; la carga flectora debe ser aplicada en el centro del espécimen. La figura 2.46 muestra la configuración de un ensayo de flexión de tres puntos:

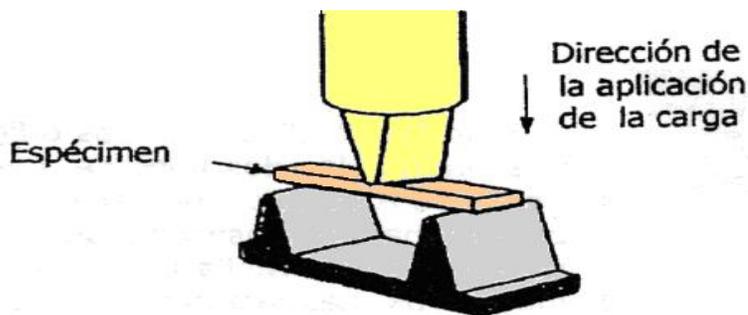


Figura 2. 46. Ensayo de flexión de tres puntos. [33]

2.2. Hipótesis

Hi: Los anclajes de cinturones de seguridad utilizados por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. en estructuras de asientos de autobús interprovincial soportan el ensayo de resistencia del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

Ho: Los anclajes de cinturones de seguridad utilizados por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. en estructuras de asientos de autobús interprovincial no soportan el ensayo de resistencia del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

2.3. Señalamiento de variables de la hipótesis

2.3.1. Variable independiente

Anclajes de cinturones de seguridad utilizados por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. en estructuras de asientos de autobús interprovincial.

2.3.2. Variable dependiente

Ensayo de resistencia del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Nivel o tipo de investigación

3.1.1. Bibliográfica

El estudio realizado es de tipo bibliográfico debido a que se hará uso de varias fuentes de información como libros, reglamentos internacionales, normas, artículos técnicos, trabajos de investigación y páginas web con la finalidad de obtener conceptos, parámetros y recomendaciones útiles en aspectos relacionados al tema de investigación.

3.1.2. Experimental

El trabajo de investigación es experimental ya que se deberán utilizar y optimizar diferentes parámetros y variables, que permitan obtener modelos digitales adecuados para la simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad que generen resultados válidos.

3.1.3. Descriptiva

La investigación tiene un nivel descriptivo porque se debe describir el comportamiento mecánico de los anclajes de cinturones de seguridad y la estructura del asiento al que se encuentran unidos durante y después del ensayo de resistencia al que serán sometidos.

3.1.4. Explicativa

La presente investigación tiene un nivel explicativo porque se deben explicar e interpretar de forma acertada los resultados obtenidos de la simulación, lo cual permitirá informar a MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. el estado actual de

resistencia de los anclajes de cinturones de seguridad de sus estructuras de asientos, además de posibles mejoras en estos productos.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población del presente trabajo de investigación está conformada por los diferentes tipos de estructuras de asientos de autobús destinadas a:

- Vehículos de transporte urbano
- Vehículos de transporte interprovincial
- Vehículos de transporte escolar

Fabricadas por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. en la ciudad de Ambato.

3.2.2. Muestra

En este trabajo se ha seleccionado como muestra a las estructuras de asientos utilizadas en vehículos de transporte interprovincial, las cuales cuentan con anclajes para cinturones de seguridad, se estudiarán las estructuras con dos y tres puntos de anclaje.

3.3. Operacionalización de variables

3.3.1. Variable independiente

Anclajes de cinturones de seguridad utilizados por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. en estructuras de asientos de autobús interprovincial.

Tabla 3. 1. Variable independiente

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Los puntos de anclaje son miembros estructurales o zonas específicas suficientemente resistentes ubicadas en la estructura de un asiento o el habitáculo de un vehículo que permiten la fijación de un cinturón de seguridad por medio de elementos de unión.	Resistencia de los materiales utilizados en la construcción de los anclajes	Límite de fluencia	250-450 MPa	Ensayos de tracción de materiales Fichas para toma de datos
		Resistencia última a la tracción	350 – 600 MPa	
		Porcentaje de elongación	≤ 20%	
	Calidad de malla	Relación de aspecto	De 1 a 5	Análisis por elementos finitos

(Fuente: Autor)

3.3.2. Variable dependiente

Ensayo de resistencia del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

Tabla 3. 2. Variable dependiente

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
El ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad establecido en el reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa consiste en la evaluación de su resistencia por medio de la aplicación de altas cargas de tracción durante un tiempo determinado.	Los anclajes deben resistir las cargas aplicadas durante 0.2 segundos sin sufrir rotura	Resiste	Los anclajes no sufren roturas al finalizar el ensayo	Fichas para toma de datos Análisis por elementos finitos y simulaciones conducidas por ordenador
		No resiste	Los anclajes sufren roturas al finalizar el ensayo	Fichas para toma de datos Análisis por elementos finitos y simulaciones conducidas por ordenador

(Fuente: Autor)

3.4. Plan de recolección de información

Se procederá a la recolección de información de fuentes bibliográficas como normas, reglamentos, libros, artículos técnicos, trabajos de investigación y páginas web para la obtención de conceptos y parámetros necesarios para la simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad.

Con una cuidadosa observación y medición de la estructura real del asiento que se va a analizar se registran sus dimensiones principales para realizar un adecuado modelo digital, el cual a su vez deberá ser optimizado y simplificado de ser necesario con la finalidad de reducir el gasto computacional durante la simulación.

A continuación deberán obtenerse las propiedades de los materiales utilizados en la construcción de la estructura, para lo cual se realizarán ensayos en el laboratorio de materiales de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Técnica de Ambato y en el Centro de Fomento Carrocero y Metalmecánico del Gobierno Provincial de Tungurahua, los resultados obtenidos se registrarán en tablas y diagramas para posteriormente ser adecuadamente organizados, validados e interpretados.

En base a estos resultados deberán efectuarse simulaciones digitales de los ensayos con la finalidad de verificar los modelos digitales de materiales que se utilizarán, para realizar la comparación de resultados se organizará la información obtenida de los ensayos en tablas y diagramas similares a las de los ensayos reales.

Una vez determinados todos los parámetros necesarios para la simulación de resistencia de anclajes se construirá un modelo digital óptimo en el cual se incluya toda la información obtenida, los resultados de esta simulación deben ser observados, registrados e interpretados adecuadamente para determinar si éstos se encuentra dentro de los criterios de aceptación del Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

3.5. Plan de procesamiento y análisis

El diagrama de flujo mostrado a continuación describe el proceso que se utilizará para la obtención y análisis de resultados:

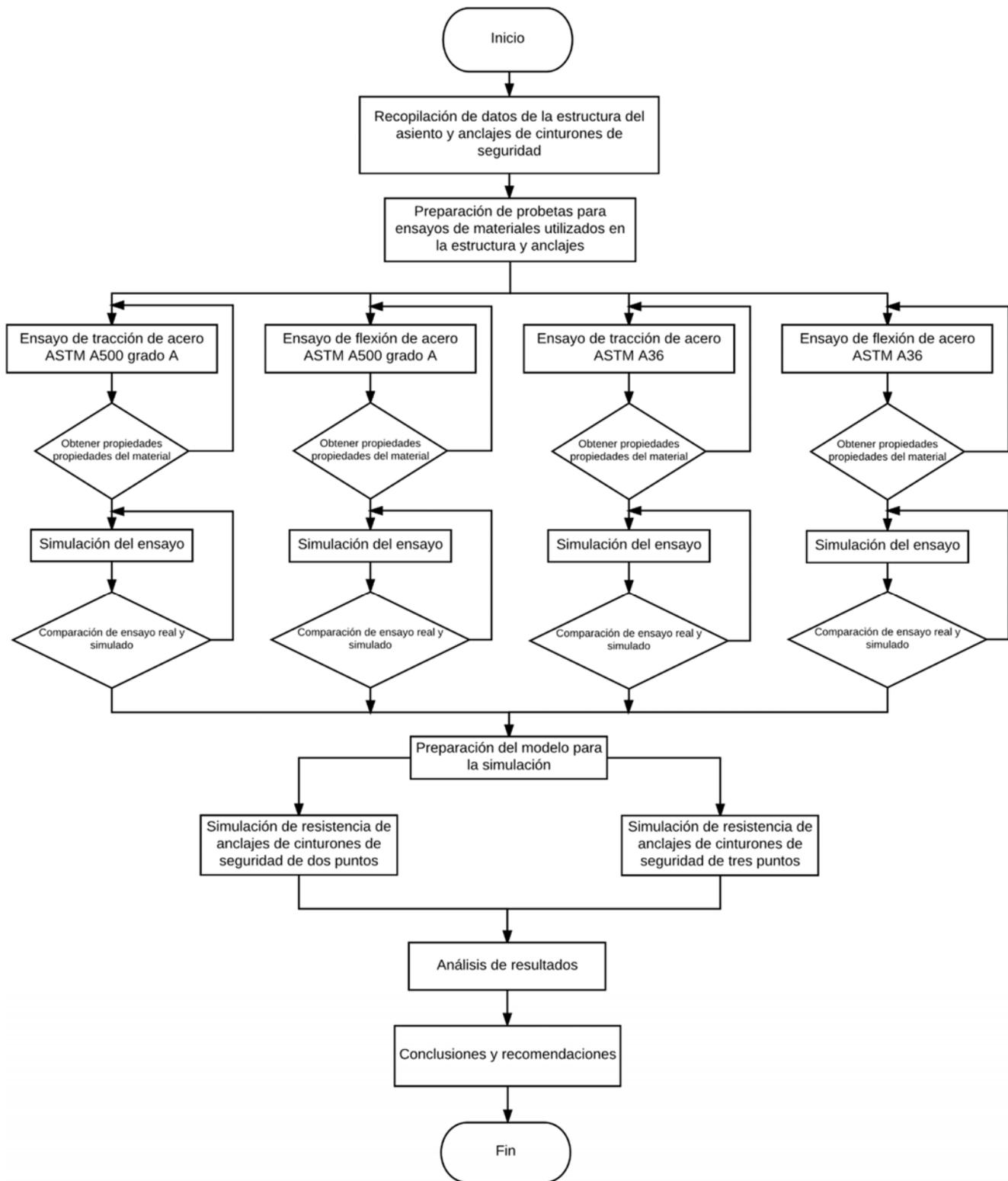


Figura 3. 1. Diagrama de flujo para recolección y análisis de información.
(Fuente: Autor)

3.5.1. Recolección de información preliminar

En esta etapa se describen todos los datos y parámetros iniciales que deben conocerse para la realización del estudio.

3.5.1.1. Condiciones de entorno para el ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad

A continuación se muestran los parámetros establecidos en el Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704 (Anexo3) bajo los cuales se evalúa la resistencia de los anclajes de cinturones de seguridad en autobuses.

Tabla 3. 3. Parámetros de evaluación según el Reglamento 14 CEPE

	Categoría del vehículo	Carga aplicada en el bloque pélvico	Carga aplicada en el bloque torácico	Carga de inercia	Ángulo de aplicación de la carga	Tiempo de aplicación de la carga
Cinturón de seguridad de dos puntos	M3	7400 N	N/A	6,6 * Peso del asiento	10°	0,2 segundos
Cinturón de seguridad de tres puntos	M3	4500 N	4500 N	6,6 * Peso del asiento	10°	0,2 segundos

(Fuente: Autor)

En este reglamento las cargas aplicadas están en función de la categoría del vehículo al cual corresponde el asiento a evaluarse, además se debe incluir una carga de inercia dependiente del peso del asiento en cada bloque pélvico ya que éstos se encuentran más cercanos al centro de gravedad del asiento.

3.5.1.1.1. Determinación de la categoría del vehículo

La categoría del vehículo se determina a partir de su peso total, la tabla 3.4 muestra los pesos de varios modelos de autobuses interprovinciales existentes en el país.

Tabla 3. 4. Peso de diferentes modelos de autobús interprovincial disponibles en el país. [34]

<i>Chasis</i>	<i>Potencia (Hp)</i>	<i>Peso chasis (Kg)</i>	<i>Peso Bruto Vehicular (Kg)</i>
Hino AK	260	4715	15700
Mercedes Benz OF-1730	305	4890	18100
Isuzu LV150	360	5550	16000
Volkswagen 17-210	206	4940	16800
Volkswagen 18-310	303	5290	18000
Scania K310	310	5825	19500
Scania K380	380	6013	19500

Una vez conocido el peso del vehículo, se puede determinar su categoría en base a la clasificación dada por el Reglamento 678 de la Comisión Económica para Europa, la tabla 3.5 muestra dicha clasificación.

Tabla 3. 5. Categorías de vehículos para transporte de pasajeros. [35]

Categorías por Criterios de Homologación	Descripción	Clasificación por criterios de construcción. Anexo II R.G.V.
Categoría M	Vehículos de motor concebidos y fabricados principalmente para el transporte de personas y su equipaje (Reglamento UE 678/2011)	
Categoría M ₁	Vehículos de la categoría M que tengan, como máximo, ocho plazas de asiento además de la del conductor. No dispondrán de ningún espacio para viajeros de pie. El número de plazas podrá limitarse a una (es decir la del conductor).	10
Categoría M ₂	Vehículos de la categoría M que tengan más de ocho plazas de asiento además de la del conductor y cuya masa máxima no sea superior a 5 toneladas. Los vehículos pertenecientes a la categoría M ₂ podrán tener, además de las plazas de asiento, espacio para viajeros de pie.	11, 12, 13, 14
Categoría M ₃	Vehículos de la categoría M que tengan más de ocho plazas de asiento además de la del conductor y cuya masa máxima sea superior a 5 toneladas. Los vehículos pertenecientes a la categoría M ₃ podrán tener espacio para viajeros de pie.	12, 13, 14, 16

Como valor de comparación se tomará el peso promedio de los autobuses mostrados en la tabla 3.4, de acuerdo a esta clasificación el vehículo corresponde a la categoría M₃ ya que su peso es superior a 5 toneladas.

$$\text{Peso vehículo promedio} = 17500 \text{ kg} = 17,5 \text{ toneladas}$$

$$\text{Peso vehículo} > 5 \text{ toneladas}$$

Categoría M₃

3.5.1.1.2. Determinación de la carga de inercia

La carga de inercia que debe adicionarse a las cargas aplicadas en cada bloque pélvico depende del peso del asiento a evaluarse y de la categoría del vehículo al que pertenece, en este caso el vehículo corresponde a la categoría M3, por lo que bajo estas condiciones la carga de inercia es igual a 6.6 veces el peso del asiento.

El peso del asiento se obtuvo al pesarlo empleando una balanza digital, el peso obtenido fue de 65 libras, lo que equivale a 29.5 kg.



Figura 3. 2. Peso del asiento a evaluarse. (Fuente: Autor)

Una vez conocido el peso del asiento, se determina la carga de inercia con la siguiente expresión:

$$\text{Carga de inercia} = 6.6 * \text{Peso}_{\text{asiento}} \quad (3.1)$$

$$\text{Carga de inercia} = 6.6 * (29.5 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$\text{Carga de inercia} = 1908.612 \text{ N}$$

3.5.1.1.3. Determinación de las cargas totales

Para conocer las cargas totales que se aplicarán a cada uno de los bloques pélvicos de prueba, es necesario adicionar la carga de inercia a los valores establecidos en el reglamento, la tabla 3.6 muestra los valores totales de carga que se aplicarán a cada uno de los bloques.

Tabla 3. 6. Cargas totales aplicadas según el Reglamento 14 CEPE

	Carga aplicada en el bloque pélvico	Carga aplicada en el bloque torácico	Carga de inercia	Carga total en cada bloque pélvico	Carga total en cada bloque torácico
Cinturón de seguridad de dos puntos	7400 N	N/A	1908,612 N	9308.612 N	N/A
Cinturón de seguridad de tres puntos	4500 N	4500 N	1908,612 N	6408.612 N	4500 N

(Fuente: Autor)

Las cargas totales deben aplicarse a los bloques de pruebas cuyas dimensiones se muestran en las figuras 2.14 y 2.15, dichos bloques se considerarán como rígidos colocados en el asiento en una posición totalmente fija.

3.5.1.1.4. Criterio de aceptación y rechazo

Según [7], los anclajes de cinturones de seguridad del asiento evaluado deben ser capaces de soportar las cargas aplicadas durante el tiempo establecido, solamente se podrá admitir una rotura parcial o total una vez transcurrido el tiempo del ensayo.

3.5.1.2. Descripción de la estructura del asiento

Las estructuras de asientos de autobús interprovincial fabricadas por MIVILTECH Soluciones Industriales muestran la siguiente configuración:



Figura 3. 3. Estructura de asiento de autobús interprovincial fabricada por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. (Fuente: Autor)

3.5.1.2.1. Identificación de materiales de la estructura

La estructura del asiento está fabricada con los siguientes materiales:

Tabla 3. 7. Materiales utilizados en la estructura del asiento

PARTE	MATERIAL	DIEMENSIONES DEL PERFIL ESTRUCTURAL
Espaldares	Tubo estructural redondo ASTM A500 Grado A	D = 1 pulg, e = 2 mm
	Tubo estructural redondo ASTM A500 Grado A	D = 5/8 pulg, e = 2 mm
Asientos	Tubo estructural redondo ASTM A500 Grado A	D = 1 pulg, e = 2 mm
	T estructural ASTM A36	20 x 20 x 3 mm
	Ángulo ASTM A36	25 x 25 x 4 mm
Base	Tubo estructural redondo ASTM A500 Grado A	D = 1 pulg, e = 2 mm
	Tubo estructural cuadrado ASTM A500 Grado A	25 x 25 x 2 mm
Pata	Ángulo ASTM A36	30 x 30 x 4 mm
	Tubo estructural ovalado ASTM A 500 Grado A	50 x 40 x 2 mm
Anclaje zócalo	Ángulo ASTM A36	30 x 30 x 4 mm

(Fuente: Autor)

En la figura 3.4 se identifican las partes de la estructura del asiento

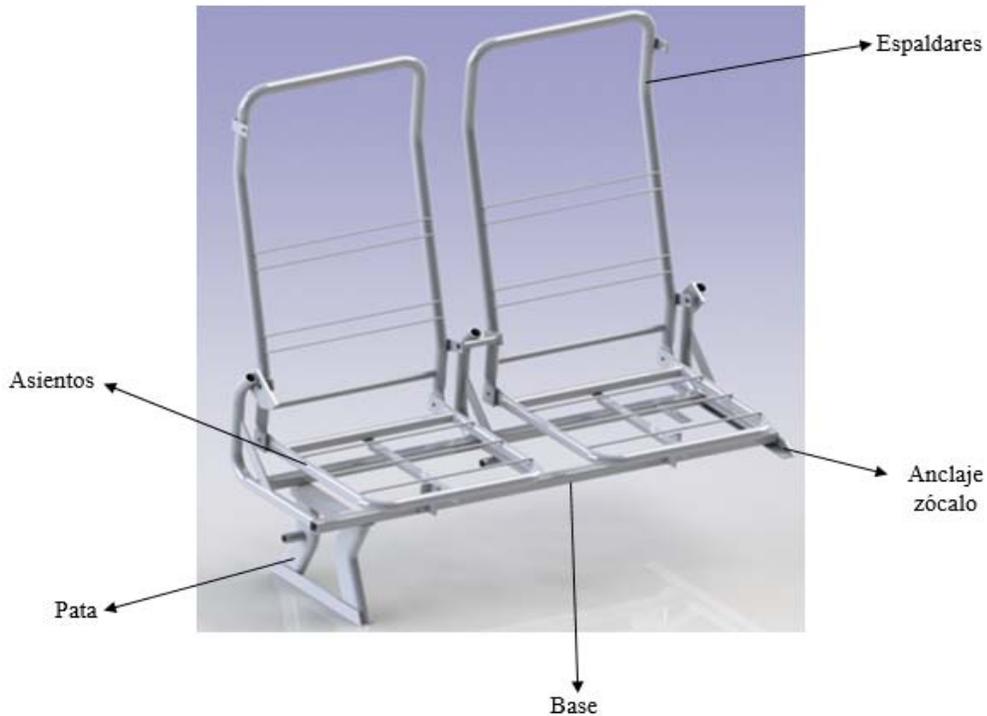


Figura 3. 4. Partes de la estructura del asiento. (Fuente: Autor)

3.5.1.3. Anclajes de cinturones de seguridad

La estructura del asiento para autobús interprovincial cuenta con varios puntos de anclaje para cinturones de seguridad, pudiendo ser de dos o tres puntos de anclaje dependiendo de la ubicación del asiento en el autobús ya que los asientos con cinturones de tres puntos se ubicarán en la primera fila, mientras que el resto de asientos contarán únicamente con cinturones de dos puntos, figura 3.5 y la tabla 3.8 describen la ubicación de los puntos de anclaje en la estructura del asiento.

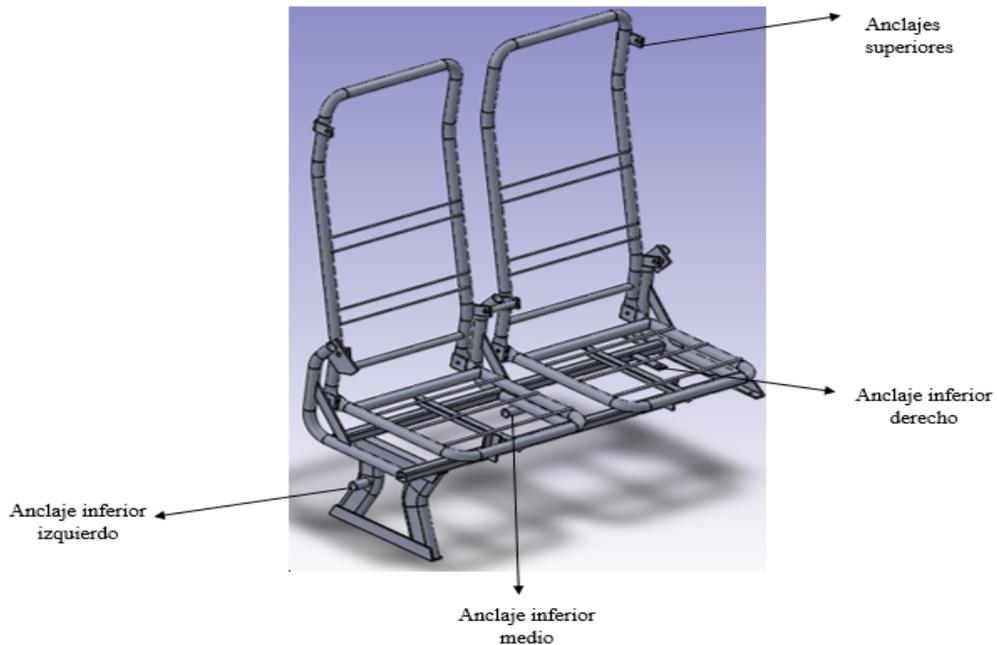


Figura 3. 5. Ubicación de los puntos de anclaje en la estructura del asiento.

(Fuente: Autor)

Tabla 3. 8. Ubicación de los anclajes en la estructura

DESCRIPCIÓN	UBICACIÓN EN LA ESTRUCTURA
Anclaje inferior izquierdo	Pata
Anclaje inferior medio	Base
Anclaje inferior derecho	Base
Anclajes superiores (cinturones de tres puntos)	Espaldares

(Fuente: Autor)

3.5.1.3.1. Identificación de materiales de los anclajes y cinturones

Los materiales utilizados en los puntos de anclaje para cinturones de seguridad se detallan a continuación:

Tabla 3. 9. Materiales de los anclajes y cinturones de seguridad

PARTE	MATERIAL	DIEMENSIONES
Anclaje inferior izquierdo	Tubo estructural redondo ASTM A500 Grado A	D = 7/8 pulg, e = 2 mm
Anclaje inferior medio	Tubo estructural redondo ASTM A500 Grado A	D = 7/8 pulg, e = 2 mm
Anclaje inferior derecho	Pletina ASTM A36	30 x 4 mm
Anclajes superiores	Pletina ASTM A36	30 x 4 mm
Elementos de unión	Pernos grado ISO 8.8 tropicalizados	M 12
Cinturón de seguridad	Poliéster	40 x 1.3 mm

(Fuente: Autor)

3.5.2. Modelo digital

Una vez realizada la identificación y medición de la estructura completa y sus componentes se debe realizar un modelo digital CAD que reproduzca lo más fielmente posible la estructura real ya que a partir de él se podrá realizar una adecuada simulación, para la construcción de este modelo deben considerarse las dimensiones de los perfiles reales utilizados (Anexos 4,5,6). La figura 3.6 muestra el modelo digital completo de la estructura del asiento.



Figura 3. 6. Modelo digital de la estructura del asiento. (Fuente: Autor)

3.5.3. Ensayos de materiales

Una vez determinados los materiales de los elementos que conforman la estructura es necesario identificar sus propiedades mecánicas con el fin obtener modelos de materiales válidos para las simulaciones.

Tanto en la estructura como en los anclajes se tienen dos materiales predominantes, los cuales son acero estructural ASTM A36 y acero estructural ASTM A500 grado A, por lo que fue necesario realizar varios tipos de ensayos.

3.5.3.1. Ensayo de tracción de acero ASTM A36

Este ensayo se realizó de acuerdo a las especificaciones de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 109:2009 (Anexo 2), se ensayaron cinco probetas tomadas de una pletina de 30 mm de ancho y 4 mm de espesor, misma que es utilizada para la construcción de los anclajes (Anexo4).

La figura 3.7 muestra el ensayo realizado y las probetas utilizadas.



Figura 3. 7. Ensayo de tracción de acero ASTM A36. (Fuente: Autor)

3.5.3.2. Ensayo de flexión de acero ASTM A36

Para tener una completa caracterización del material además del ensayo de tracción se realizó un ensayo de flexión de tres puntos en cinco probetas de 160 mm de longitud, 30 mm de ancho y 4 mm de espesor tomadas de una pletina, las cargas de ensayo se aplicó en el centro de la probeta.

La figura 3.8 muestra el ensayo realizado y las probetas utilizadas.



Figura 3. 8. Ensayo de flexión de acero ASTM A36. (Fuente: Autor)

3.5.3.3. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A

De igual manera que en el ensayo de tracción del acero A36, se utilizaron las especificaciones de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 109: 2009 para ensayos de tracción de materiales metálicos, se ensayaron cinco probetas tomadas de un tubo estructural de sección transversal rectangular de 40 x 20 mm y espesor de 2 mm.

La figura 3.9 muestra el ensayo y las probetas realizadas.



Figura 3. 9. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A. (Fuente: Autor)

3.5.3.4. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A

Se realizó un ensayo de flexión de tres puntos en cinco probetas de 600 mm de longitud, sección transversal cuadrada de 25 x 25 mm y espesor de 2 mm, mismo que es utilizado en la construcción de la estructura del asiento (Anexo 5).

La figura 3.10 muestra el ensayo y las probetas utilizadas.

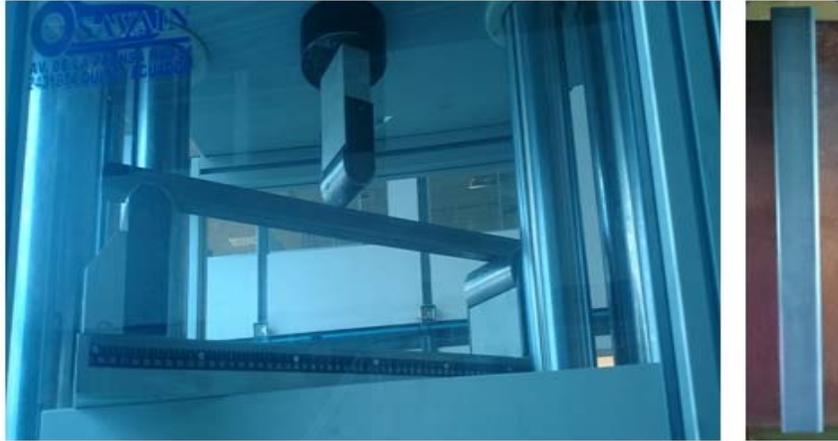


Figura 3. 10. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A. (Fuente: Autor)

3.5.4. Simulaciones de los ensayos de materiales

Luego de organizar los resultados obtenidos de los ensayos reales de materiales, es necesario obtener un modelo digital de material cuyo comportamiento se asemeje a la realidad; para ello se simularán los ensayos reales en los cuales se deberán ir variando diferentes parámetros y condiciones hasta obtener un modelo de material válido con resultados cercanos a los ensayos físicos.

3.5.5. Simplificación y optimización del modelo digital de la estructura

Con todos los parámetros necesarios para la simulación de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad ya definidos es necesario tener un modelo digital adecuado, que mantenga la geometría y propiedades de un modelo real pero que a su vez permita disminuir el gasto computacional.

Esto se logra por medio de la optimización y simplificación del modelo, en el cual se eliminan los elementos que no sean necesarios, se reparan errores de geometría y se simplifican las secciones que presenten una geometría demasiado compleja. La figura 3.11 muestra el modelo simplificado de la estructura del asiento.



Figura 3. 11. Modelo simplificado de la estructura del asiento. (Fuente: Autor)

3.5.6. Modelos de materiales utilizados

Con la estructura del asiento debidamente optimizada, se deben asignar adecuadamente los modelos de materiales a cada uno de los componentes, en este caso se utilizarán tres modelos de materiales, los cuales son:

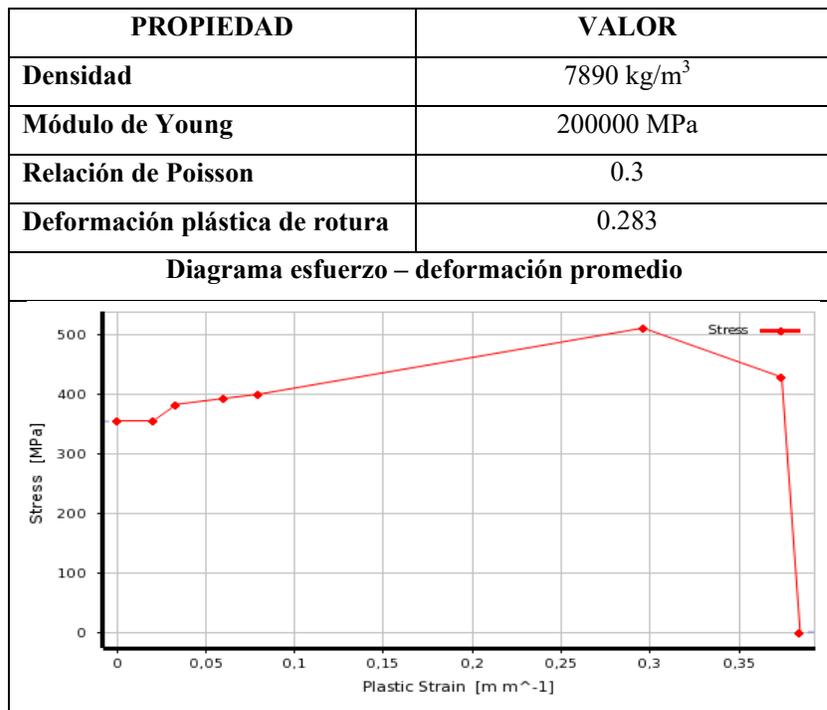
- a) **Acero estructural ASTM A 36:** Este material se aplica a elementos estructurales como ángulos, pletinas, placas, T estructurales, etc. para su caracterización se utiliza un modelo de material elasto – plástico con rotura, para lo cual se han definido varias de sus propiedades básicas así como también varios puntos de su diagrama esfuerzo – deformación unitaria real promedio obtenido de los ensayos reales de materiales, mientras que para la rotura se utiliza la deformación plástica de rotura, obtenida también de los ensayos de

materiales. La figura 3.12 y la tabla 3.10 muestran las propiedades del modelo digital del material.

Properties of Outline Row 3: ASTM A36				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7890	kg m ⁻³	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's M...		
5	Young's Modulus	2E+05	MPa	
6	Poisson's Ratio	0,3		
7	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
8	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
9	Field Variables			
10	Temperature	No		
11	Shear Angle	No		
12	Degradation Factor	No		
13	Plastic Strain Failure			
14	Maximum Equivalent Plastic Strain EPS	0,283		
15	Cowper Symonds Piecewise Linear Hardening			
16	Piecewise Linear Hardening			
17	Strain Rate Correction	Scale Yie...		
18	Initial Yield Stress A	356	MPa	
19	Strain Rate Constant C	40		
20	Strain Rate Constant P	5		
21	Effective Stress	Tabular		
22	Scale	1		
23	Offset	0	Pa	

Figura 3. 12. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 36. (Fuente: Autor)

Tabla 3. 10. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 36



(Fuente: Autor)

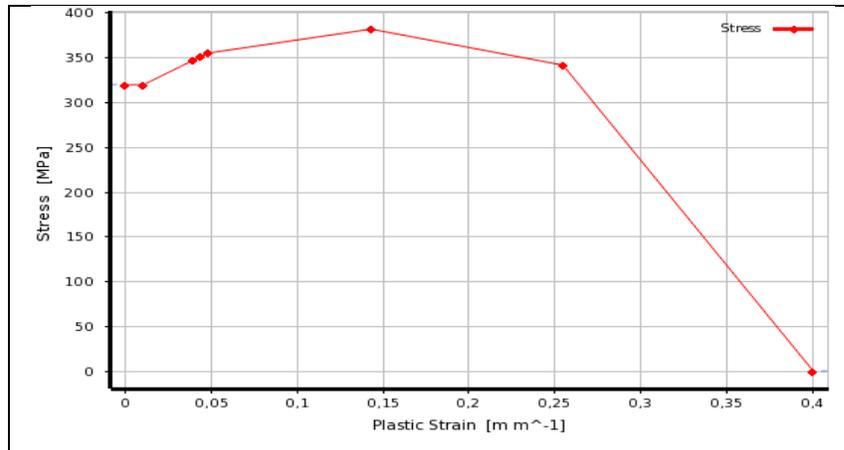
b) **Acero estructural ASTM A 500 grado A:** Este material se aplica principalmente en tubería estructural redonda, cuadrada y ovalada en el caso de la pata del asiento; para su caracterización se utiliza un modelo de material elasto – plástico con rotura similar al anterior en el cual se utilizan las mismas propiedades principales obtenidas de los ensayos de materiales. La figura 3.13 y la tabla 3.11 muestran las propiedades del modelo digital del material.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7890	kg m ⁻³		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's M...			
5	Young's Modulus	2E+11	Pa		
6	Poisson's Ratio	0,3			
7	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
8	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
9	Field Variables				
10	Temperature	No			
11	Shear Angle	No			
12	Degradation Factor	No			
13	Plastic Strain Failure				
14	Maximum Equivalent Plastic Strain EPS	0,37			
15	Cowper Symonds Piecewise Linear Hardening				
16	Piecewise Linear Hardening				
17	Strain Rate Correction	Scale Yie...			
18	Initial Yield Stress A	3,2E+08	Pa		
19	Strain Rate Constant C	40			
20	Strain Rate Constant P	5			
21	Effective Stress	Tabular			
22	Scale	1			
23	Offset	0	Pa		

Figura 3. 13. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 500 grado A. (Fuente: Autor)

Tabla 3. 11. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 500 grado A (Fuente: Autor)

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	7890 kg/m ³
Módulo de Young	200000 MPa
Relación de Poisson	0.3
Deformación plástica de rotura	0.37
Diagrama esfuerzo – deformación promedio	



(Fuente: Autor)

c) **Poliéster:** Este material se utiliza en los cinturones de seguridad; para su caracterización se utiliza un modelo de material elástico isotrópico. La figura 3.14 y la tabla 3.12 muestran las propiedades del modelo digital del material.

Properties of Outline Row 5: Poliéster				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1390	kg m ⁻³	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's M...		
5	Young's Modulus	11000	MPa	
6	Poisson's Ratio	0,39		
7	Bulk Modulus	1,6667E+10	Pa	
8	Shear Modulus	3,9568E+09	Pa	
9	Field Variables			
10	Temperature	Yes		
11	Shear Angle	No		
12	Degradation Factor	No		

Figura 3. 14. Propiedades del modelo de material del poliéster. (Fuente: Autor)

Tabla 3. 12. Propiedades del modelo de material del poliéster. [36]

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	1390 kg/m ³
Módulo de Young	11000 MPa
Relación de Poisson	0.39

3.5.7. Condiciones de frontera para las simulaciones

Para todas las simulaciones de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad se consideran básicamente tres condiciones de borde, las cuales son:

- a) **Cuerpos rígidos:** Se consideran como cuerpos totalmente rígidos a los bloques de tracción pélvicos y torácicos con el fin de ahorrar gasto computacional ya que en este estudio no son importantes los esfuerzos y deformaciones producidos en ellos.



Figura 3. 15. Cuerpos totalmente rígidos en los bloques de tracción. (Fuente: Autor)

- b) **Restricciones de movimiento:** Se consideran como totalmente fijos a los extremos inferiores de los perfiles estructurales que representan el piso del autobús ubicados bajo la pata del asiento y el anclaje al zócalo respectivamente, mientras que los demás componentes del sistema tienen completa libertad de movimiento.

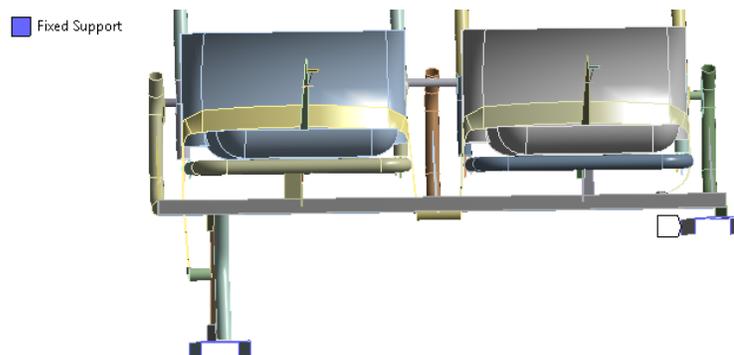


Figura 3. 16. Elementos del modelo totalmente fijos. (Fuente: Autor)

c) **Orientación de las cargas:** Las cargas aplicadas a los bloques de tracción se aplican sobre el plano YZ del sistema con un ángulo de inclinación de 10° con respecto al eje Z, los valores de las cargas se especifican en la tabla 3.6 para las simulaciones con cinturones de dos y tres puntos de anclaje.

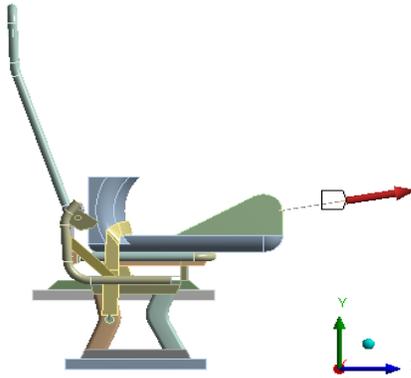


Figura 3. 17. Orientación de las cargas aplicadas para las simulaciones. (Fuente: Autor)

3.5.8. Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad

Contando con un modelo debidamente optimizado, se aplican todas las condiciones de borde y materiales descritas anteriormente para llevar a cabo las simulaciones resistencia de anclajes de cinturones de seguridad según el Reglamento N° 14 CEPE referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704, se realizarán dos simulaciones, la primera para un asiento con cinturones de seguridad de tres puntos de anclaje y la segunda para un asiento con cinturones de dos puntos de anclaje.

3.5.9. Análisis e interpretación de resultados

Una vez realizadas las simulaciones se analizarán e interpretarán los resultados obtenidos, organizándolos en forma adecuada por medio de tablas y gráficas que permitan entender de una mejor manera el comportamiento mecánico de los anclajes durante el ensayo de resistencia para de esta manera conocer si éstos han sido capaces de soportarlo satisfactoriamente o no, en caso de no hacerlo se modificará la estructura original con el fin de obtener una estructura que sea capaz de soportar el ensayo de manera satisfactoria.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Recolección de datos

Se han recogido y organizado los datos obtenidos de los ensayos reales de materiales presentándolos de una manera más simplificada y fácil de comprender en las tablas presentadas a continuación.

En la sección 4.1.1 se muestran las condiciones iniciales y resultados más importantes de los ensayos de tracción del acero ASTM A 36, siendo éstos el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo máximo, el porcentaje de elongación, la carga máxima aplicada y los diagramas esfuerzo – deformación unitaria en cada una de las probetas ensayadas.

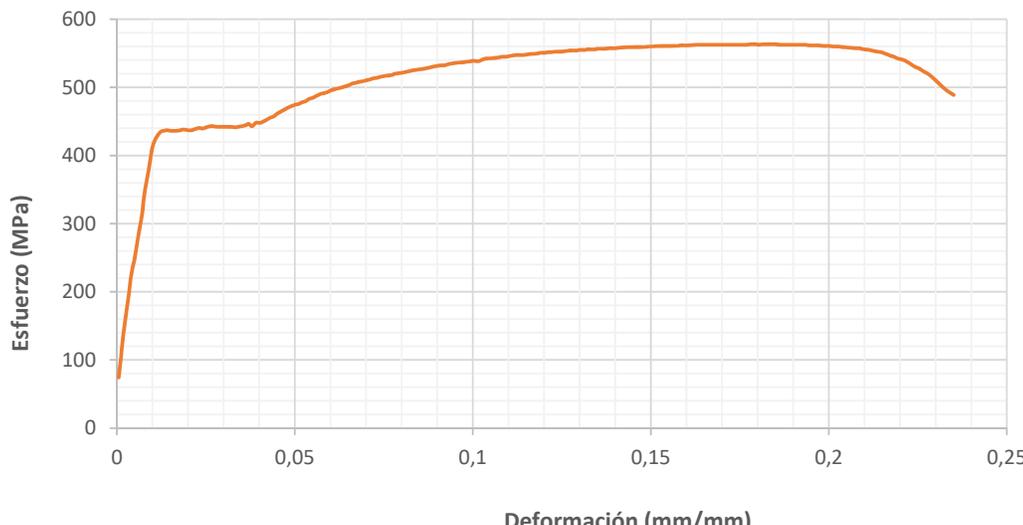
La sección 4.1.2 muestra las condiciones iniciales y los resultados más importantes de los ensayos de flexión del acero ASTM A36, siendo éstos la carga de fluencia, la carga máxima, las deflexiones producidas en tales cargas y los diagramas carga – flecha o deflexión en cada una de las probetas ensayadas.

En la sección 4.1.3 se presentan las condiciones iniciales y los resultados más importantes de los ensayos de tracción del acero ASTM A 500 grado A, de los cuales se han obtenidos los mismos resultados que en los ensayos de tracción del acero ASTM A 36.

En la sección 4.1.4 se muestran los resultados más importantes y condiciones iniciales de los ensayos de flexión del acero ASTM A 500 grado A, obteniendo los mismos resultados que en los ensayos del acero ASTM A 36.

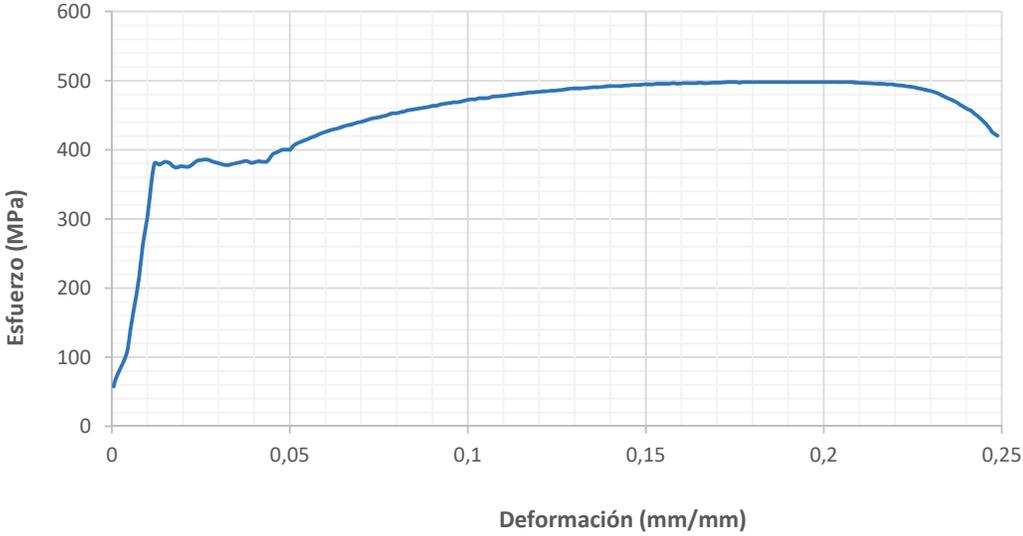
4.1.1. Ensayo de tracción de acero ASTM A36

Tabla 4. 1. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 01

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
ENSAYO DE TRACCIÓN			
Probeta N°	01	Muestra:	Pletina 30x4 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Lugar de ensayo	Laboratorio de resistencia de materiales, Carrera de Ingeniería Civil, FICM-UTA		
Fecha de Ejecución:	12/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	4 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A36
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga máxima:	45063.637 N	Longitud inicial:	80 mm
Longitud final:	115.95 mm	Deformación última:	35.95 mm
Área inicial:	80 mm ²		
RESULTADOS CALCULADOS			
Resistencia última a la tracción (Sut):	563.295 MPa	Límite de fluencia:	429.57 MPa
Porcentaje de elongación:	44.93 %	Módulo de elasticidad:	200000 MPa

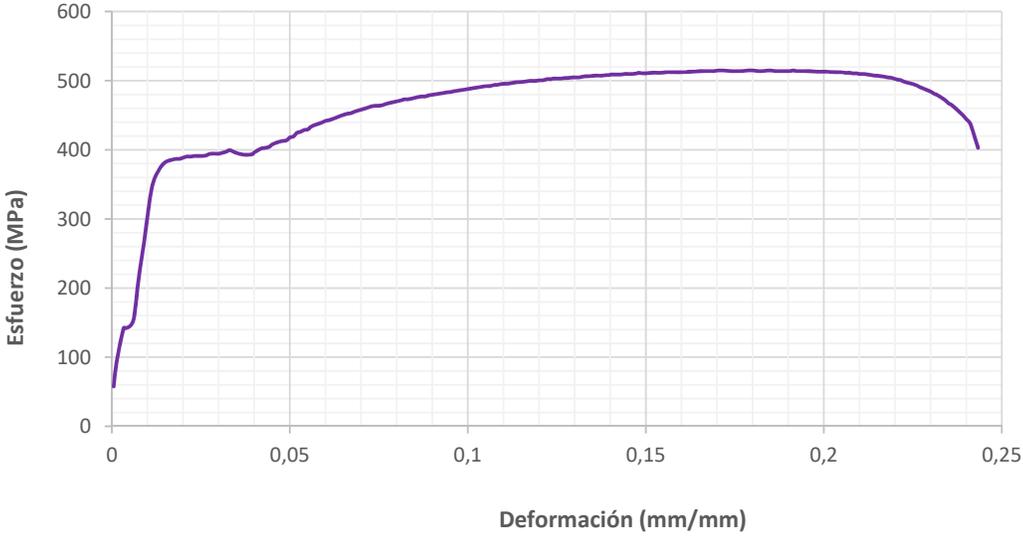
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 2. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 02

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
ENSAYO DE TRACCIÓN			
Probeta N°	02	Muestra:	Pletina 30x4 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Lugar de ensayo	Laboratorio de resistencia de materiales, Carrera de Ingeniería Civil, FICM-UTA		
Fecha de Ejecución:	12/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	4 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A36
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga máxima:	39848.560 N	Longitud inicial:	80 mm
Longitud final:	118.04 mm	Deformación última:	38.04 mm
Área inicial:	80 mm ²		
RESULTADOS CALCULADOS			
Resistencia última a la tracción (Sut):	498.107 MPa	Límite de fluencia:	378.594 MPa
Porcentaje de elongación:	47.55 %	Módulo de elasticidad:	200000 MPa

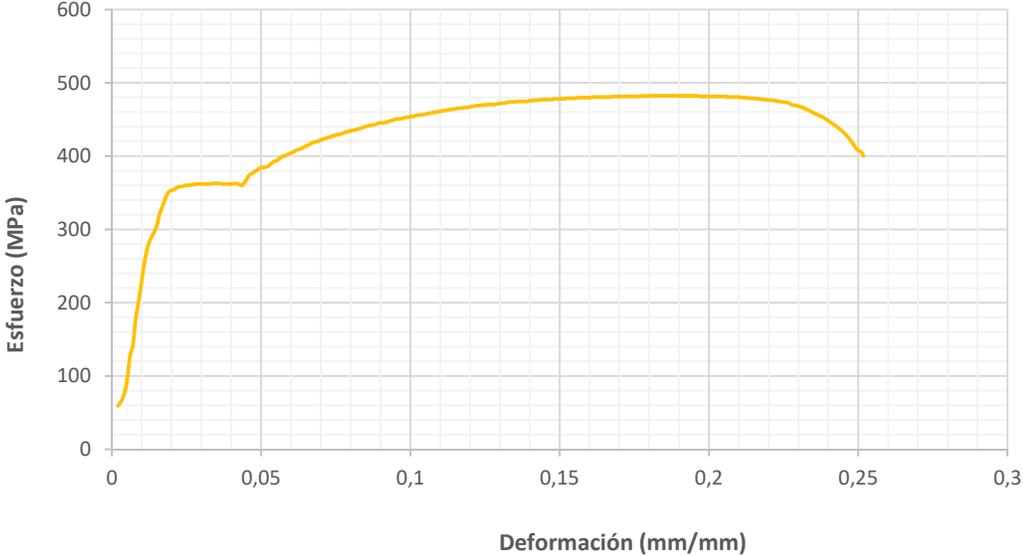
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 3. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 03

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
ENSAYO DE TRACCIÓN			
Probeta N°	03	Muestra:	Pletina 30x4 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Lugar de ensayo	Laboratorio de resistencia de materiales, Carrera de Ingeniería Civil, FICM-UTA		
Fecha de Ejecución:	12/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	4 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A36
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga máxima:	41185.760 N	Longitud inicial:	80 mm
Longitud final:	117 mm	Deformación última:	37 mm
Área inicial:	80 mm ²		
RESULTADOS CALCULADOS			
Resistencia última a la tracción (Sut):	514.822 MPa	Límite de fluencia:	381.102 MPa
Porcentaje de elongación:	46.25 %	Módulo de elasticidad:	200000 MPa

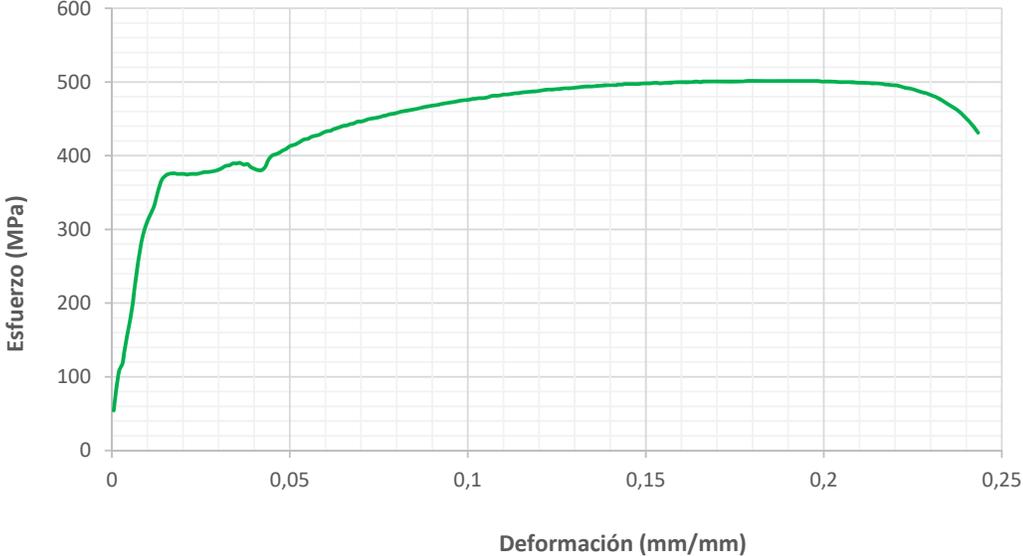
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 4. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 04

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 			
ENSAYO DE TRACCIÓN			
Probeta N°	04	Muestra:	Pletina 30x4 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Lugar de ensayo	Laboratorio de resistencia de materiales, Carrera de Ingeniería Civil, FICM-UTA		
Fecha de Ejecución:	12/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	4 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A36
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga máxima:	38578.220 N	Longitud inicial:	80 mm
Longitud final:	118.22 mm	Deformación última:	38.22 mm
Área inicial:	80 mm ²		
RESULTADOS CALCULADOS			
Resistencia última a la tracción (Sut):	482.227 MPa	Límite de fluencia:	353.52 MPa
Porcentaje de elongación:	47.77 %	Módulo de elasticidad:	200000 MPa

(Fuente: Autor)

Tabla 4. 5. Ensayo de tracción de acero ASTM A36, probeta 05

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
ENSAYO DE TRACCIÓN			
Probeta N°	05	Muestra:	Pletina 30x4 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Lugar de ensayo	Laboratorio de resistencia de materiales, Carrera de Ingeniería Civil, FICM-UTA		
Fecha de Ejecución:	12/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	4 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A36
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga máxima:	40115.997 N	Longitud inicial:	80 mm
Longitud final:	117.44 mm	Deformación última:	37.44 mm
Área inicial:	80 mm ²		
RESULTADOS CALCULADOS			
Resistencia última a la tracción (Sut):	501,449 MPa	Límite de fluencia:	376.087 MPa
Porcentaje de elongación:	46.8 %	Módulo de elasticidad:	200000 MPa

(Fuente: Autor)

La figura 4.1 muestra la convergencia de los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos de tracción del acero ASTM A36.

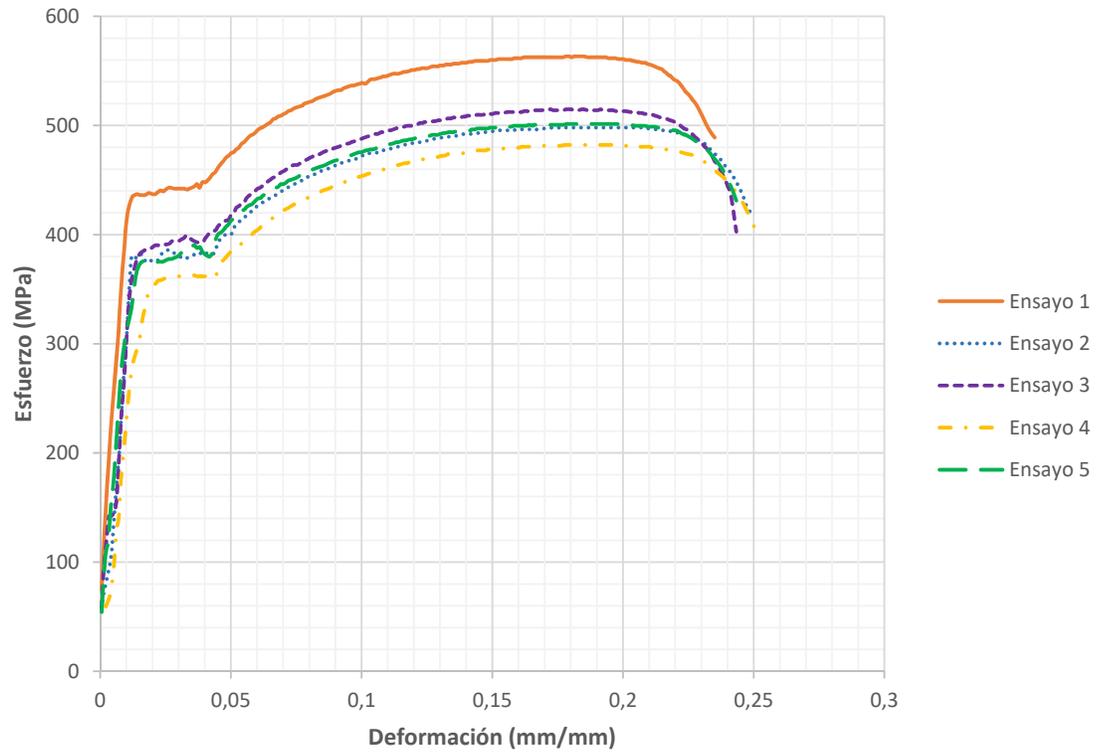
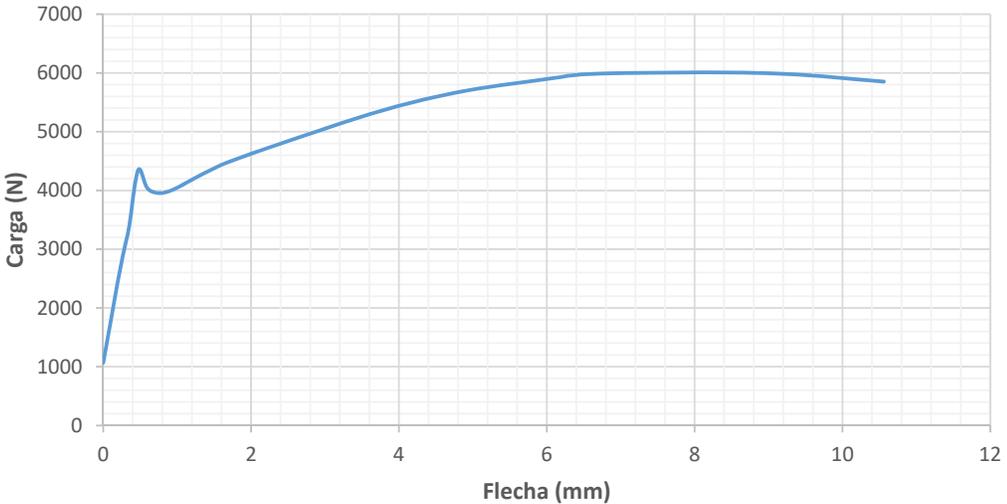


Figura 4. 1. Convergencia de resultados de los ensayos de tracción del acero ASTM A36. (Fuente: Autor)

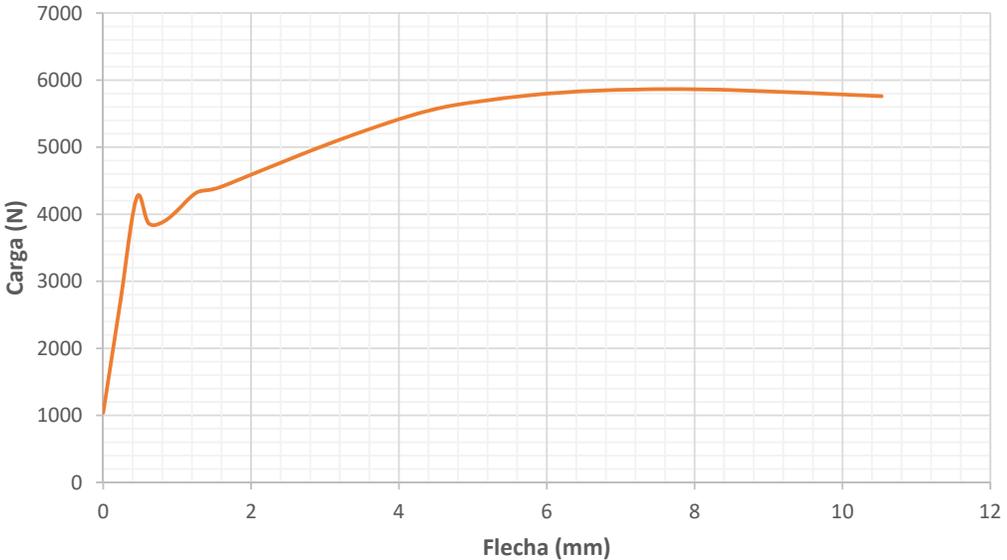
4.1.2. Ensayo de flexión de acero ASTM A36

Tabla 4. 6. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 01

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 7)					
Probeta N°	01	Muestra:	Pletina 30x4 mm		
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez		
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez		
Espesor:	4 mm	Longitud entre apoyos:	34 mm		
Longitud de la probeta:	160 mm	Sección transversal:	Rectangular 30x4 mm		
Material:		Acero ASTM A36			
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga de fluencia:	5572.814 N	Deformación a la carga de fluencia:	0.4715 mm		
Carga máxima:	6011.44 N	Deformación a la carga máxima:	7.988 mm		

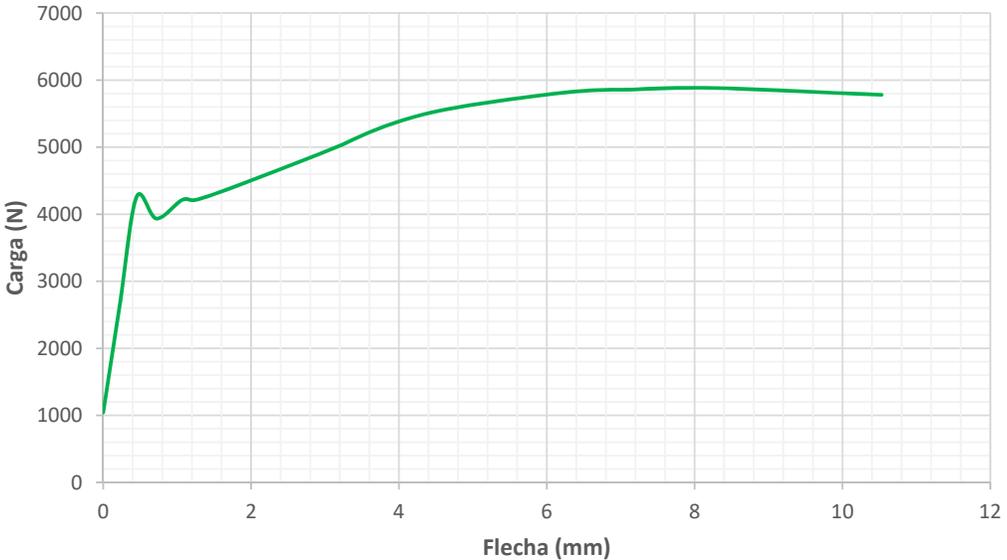
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 7. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 02

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 7)					
Probeta N°	02		Muestra:	Pletina 30x4 mm	
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016		Realizado por:	Luis Martínez	
			Revisado por:	Ing. Diego Núñez	
Espesor:	4 mm		Longitud entre apoyos:	34 mm	
Longitud de la probeta:	160 mm		Sección transversal:	Rectangular 30x4 mm	
Material:			Acero ASTM A36		
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga de fluencia:	5416.61 N		Deformación a la carga de fluencia:	0.422 mm	
Carga máxima:	5867.66 N		Deformación a la carga máxima:	7.671 mm	

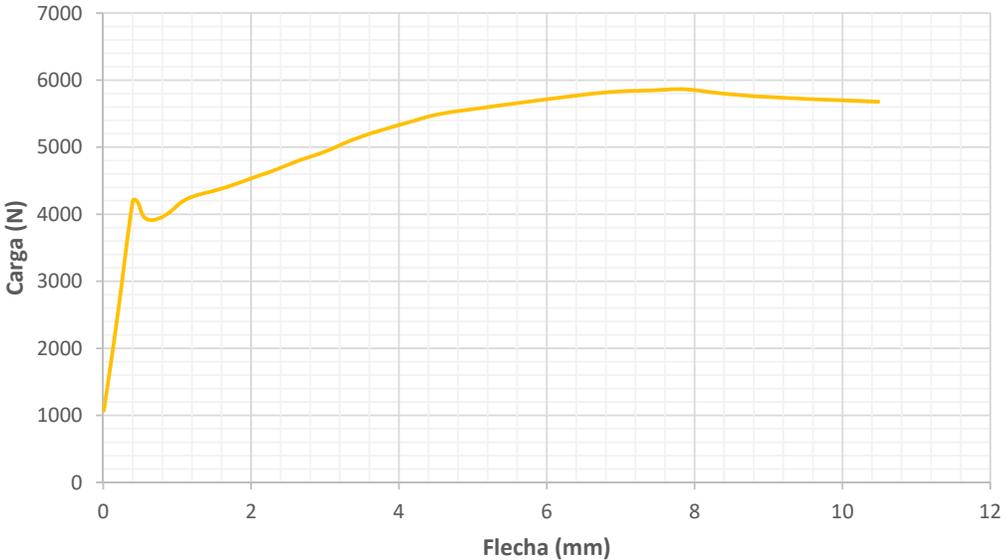
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 8. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 03

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 7)					
Probeta N°	03		Muestra:	Pletina 30x4 mm	
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016		Realizado por:	Luis Martínez	
			Revisado por:	Ing. Diego Núñez	
Espesor:	4 mm		Longitud entre apoyos:	34 mm	
Longitud de la probeta:	160 mm		Sección transversal:	Rectangular 30x4 mm	
Material:			Acero ASTM A36		
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga de fluencia:	5415.03 N		Deformación a la carga de fluencia:	0.439 mm	
Carga máxima:	5888.38 N		Deformación a la carga máxima:	8.017 mm	

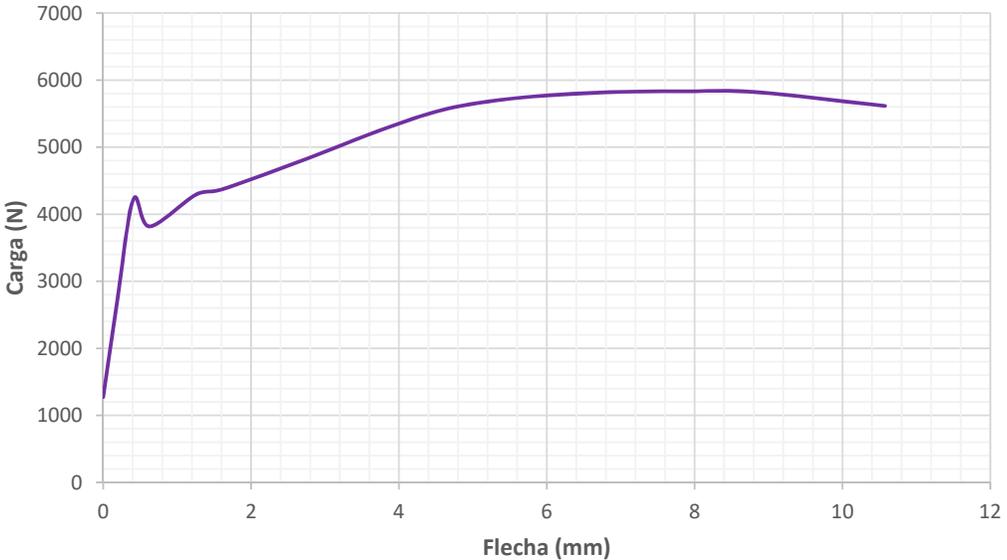
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 9. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 04

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 7)					
Probeta N°	04	Muestra:	Pletina 30x4 mm		
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez		
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez		
Espesor:	4 mm	Longitud entre apoyos:	34 mm		
Longitud de la probeta:	160 mm	Sección transversal:	Rectangular 30x4 mm		
Material:		Acero ASTM A36			
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga de fluencia:	5392.94 N	Deformación a la carga de fluencia:	0.52 mm		
Carga máxima:	5864.71 N	Deformación a la carga máxima:	7.550 mm		

(Fuente: Autor)

Tabla 4. 10. Ensayo de flexión de acero ASTM A36, probeta 05

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 7)					
Probeta N°	05		Muestra:	Pletina 30x4 mm	
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016		Realizado por:	Luis Martínez	
			Revisado por:	Ing. Diego Núñez	
Espesor:	4 mm		Longitud entre apoyos:	34 mm	
Longitud de la probeta:	160 mm		Sección transversal:	Rectangular 30x4 mm	
Material:			Acero ASTM A36		
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga de fluencia:	5415.03 N		Deformación a la carga de fluencia:	0.411 mm	
Carga máxima:	5833.15 N		Deformación a la carga máxima:	7.906 mm	

(Fuente: Autor)

La figura 4.2 muestra la convergencia de los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos de flexión del acero ASTM A36.

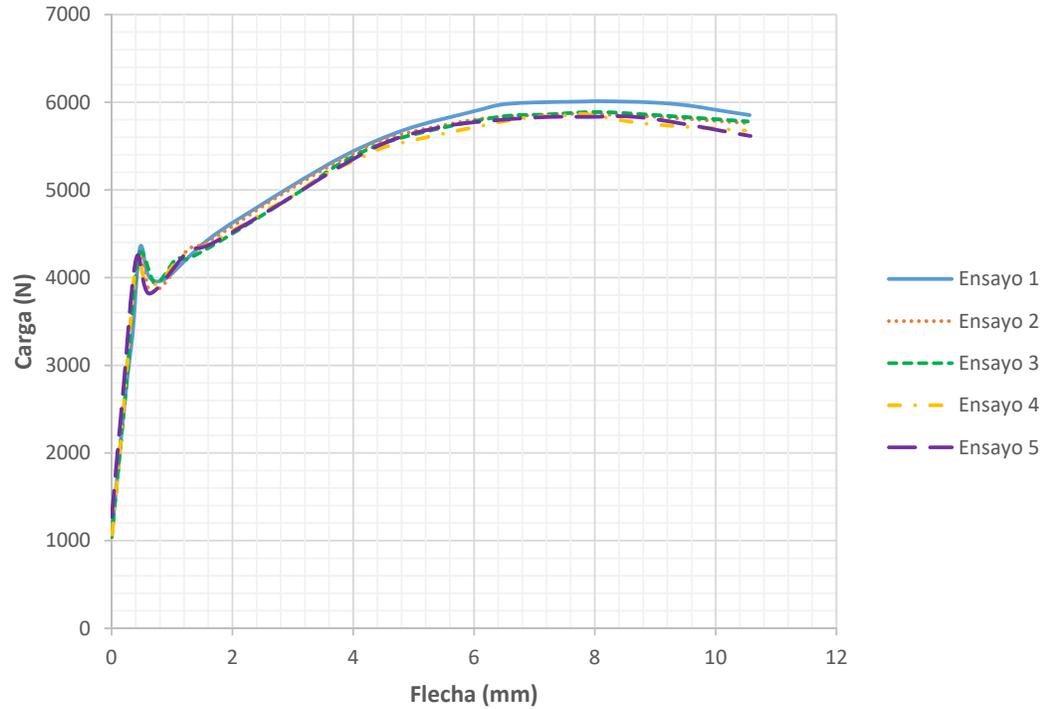
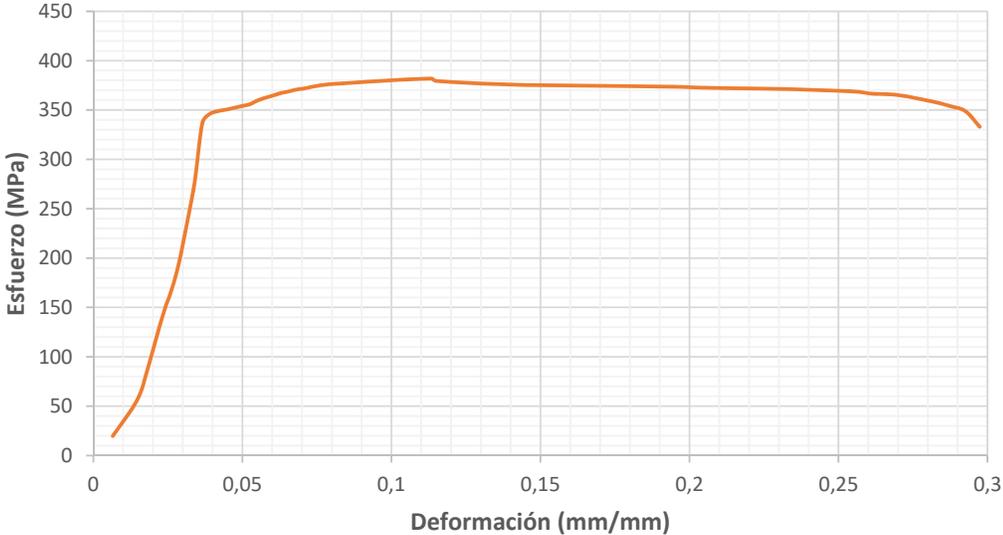


Figura 4. 2. Convergencia de resultados de los ensayos de flexión del acero ASTM A36. (Fuente: Autor)

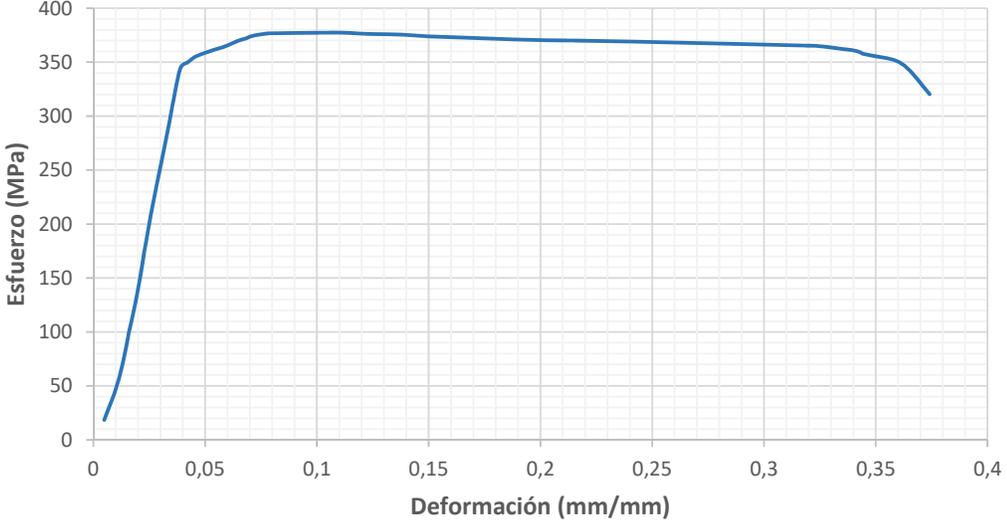
4.1.3. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A

Tabla 4. 11. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 01

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
ENSAYO DE TRACCIÓN (ANEXO 8)			
Probeta N°	01	Muestra:	Tubo 40x20x2 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua		
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	2 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A500
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga máxima:	15273.17 N	Longitud inicial:	80 mm
Longitud final:	103.79 mm	Deformación última:	23.79 mm
Área inicial:	40 mm ²		
RESULTADOS CALCULADOS			
Resistencia última a la tracción (Sut):	381.83 MPa	Límite de fluencia:	346.13 MPa
Porcentaje de elongación:	29.74%	Módulo de elasticidad:	200000 MPa

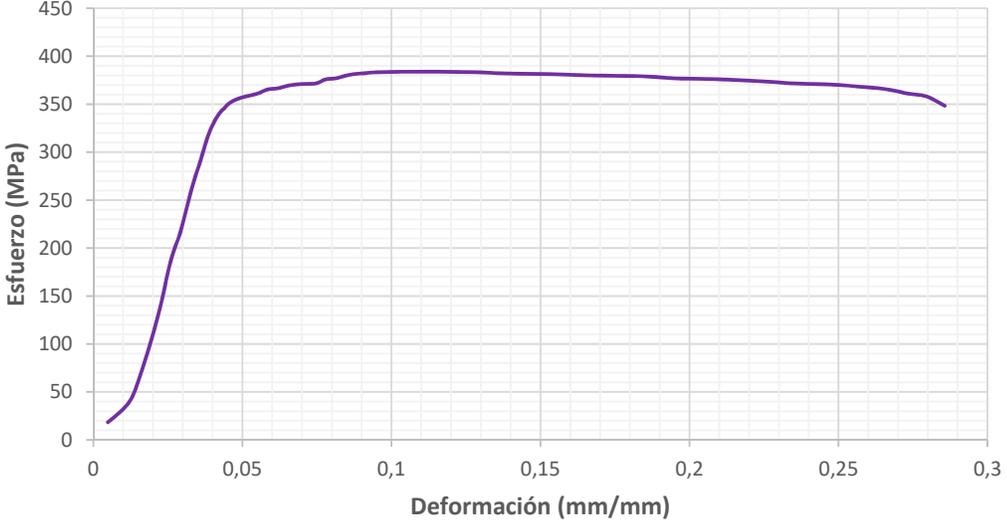
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 12. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 02

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
ENSAYO DE TRACCIÓN (ANEXO 8)			
Probeta N°	02	Muestra:	Tubo 40x20x2 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua		
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	2 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A500
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga máxima:	15096.46 N	Longitud inicial:	80 mm
Longitud final:	109.929 mm	Deformación última:	29.929 mm
Área inicial:	40 mm ²		
RESULTADOS CALCULADOS			
Resistencia última a la tracción (Sut):	377.41 MPa	Límite de fluencia:	344.04 MPa
Porcentaje de elongación:	37.41 %	Módulo de elasticidad:	200000 MPa

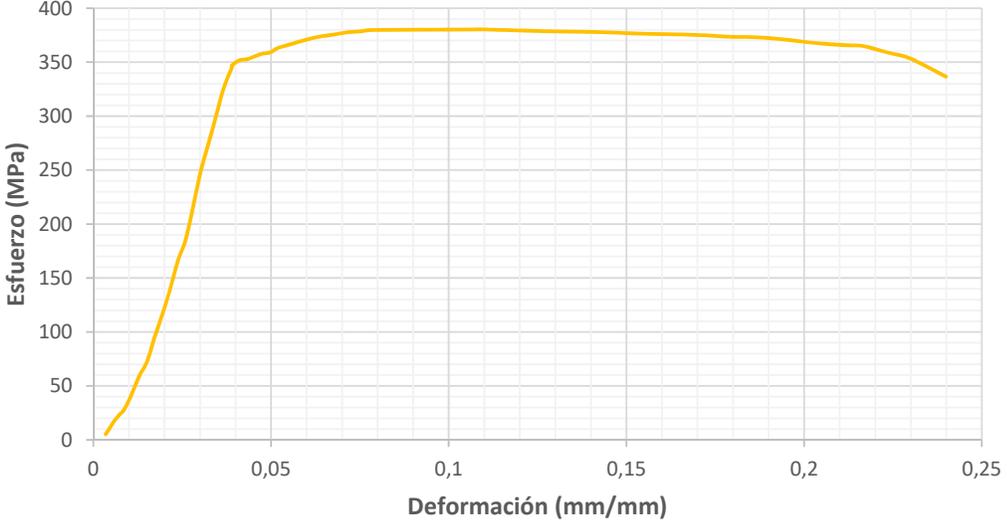
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 13. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 03

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE TRACCIÓN (ANEXO 8)					
Probeta N°	03	Muestra:	Tubo 40x20x2 mm		
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009				
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez		
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez		
Espesor:	2 mm	Longitud calibrada:	80 mm		
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A500		
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga máxima:	15356.79 N	Longitud inicial:	80 mm		
Longitud final:	102.852 mm	Deformación última:	22.852 mm		
Área inicial:	40 mm ²				
RESULTADOS CALCULADOS					
Resistencia última a la tracción (Sut):	383.92 MPa	Límite de fluencia:	347.16 MPa		
Porcentaje de elongación:	28.57 %	Módulo de elasticidad:	200000 MPa		

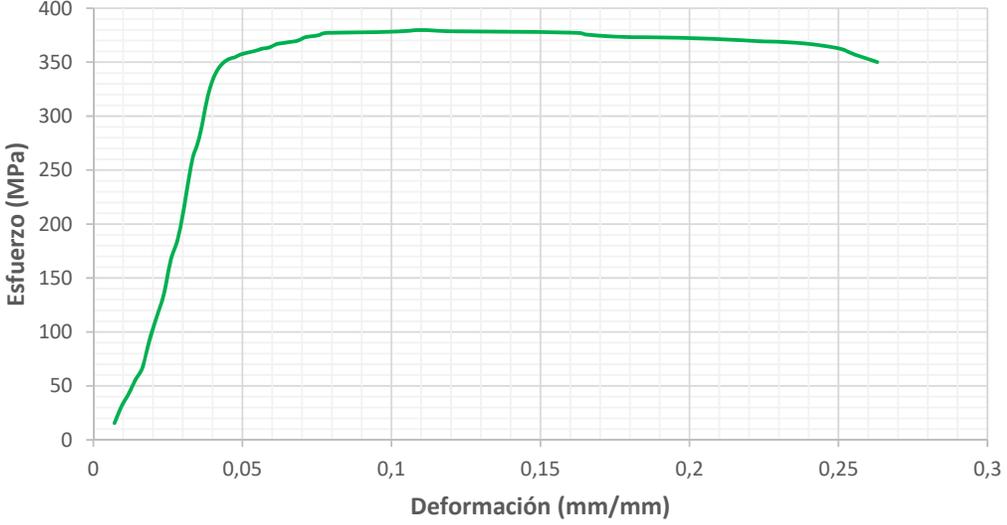
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 14. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 04

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE TRACCIÓN (ANEXO 8)					
Probeta N°	04	Muestra:	Tubo 40x20x2 mm		
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009				
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez		
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez		
Espesor:	2 mm	Longitud calibrada:	80 mm		
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A500		
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga máxima:	15219.52 N	Longitud inicial:	80 mm		
Longitud final:	99.193 mm	Deformación última:	19.193 mm		
Área inicial:	40 mm ²				
RESULTADOS CALCULADOS					
Resistencia última a la tracción (Sut):	380.49 MPa	Límite de fluencia:	346.96 MPa		
Porcentaje de elongación:	23.99 %	Módulo de elasticidad:	200000 MPa		

(Fuente: Autor)

Tabla 4. 15. Ensayo de tracción de acero ASTM A500 grado A, probeta 05

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
ENSAYO DE TRACCIÓN (ANEXO 8)			
Probeta N°	05	Muestra:	Tubo 40x20x2 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua		
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	2 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Ancho:	30 mm	Material:	Acero ASTM A500
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga máxima:	15195.86 N	Longitud inicial:	80 mm
Longitud final:	101.039 mm	Deformación última:	21.039 mm
Área inicial:	40 mm ²		
RESULTADOS CALCULADOS			
Resistencia última a la tracción (Sut):	379.90 MPa	Límite de fluencia:	347.95 MPa
Porcentaje de elongación:	26.30 %	Módulo de elasticidad:	200000 MPa

(Fuente: Autor)

La figura 4.3 muestra la convergencia de los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos de tracción del acero ASTM A500 grado A.

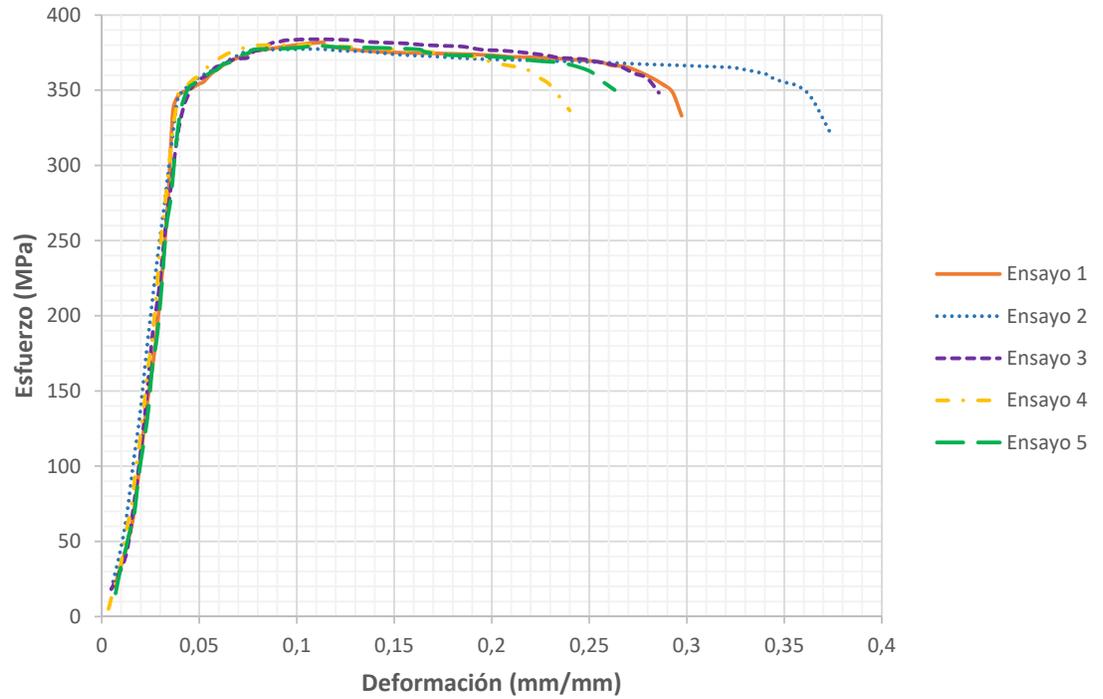
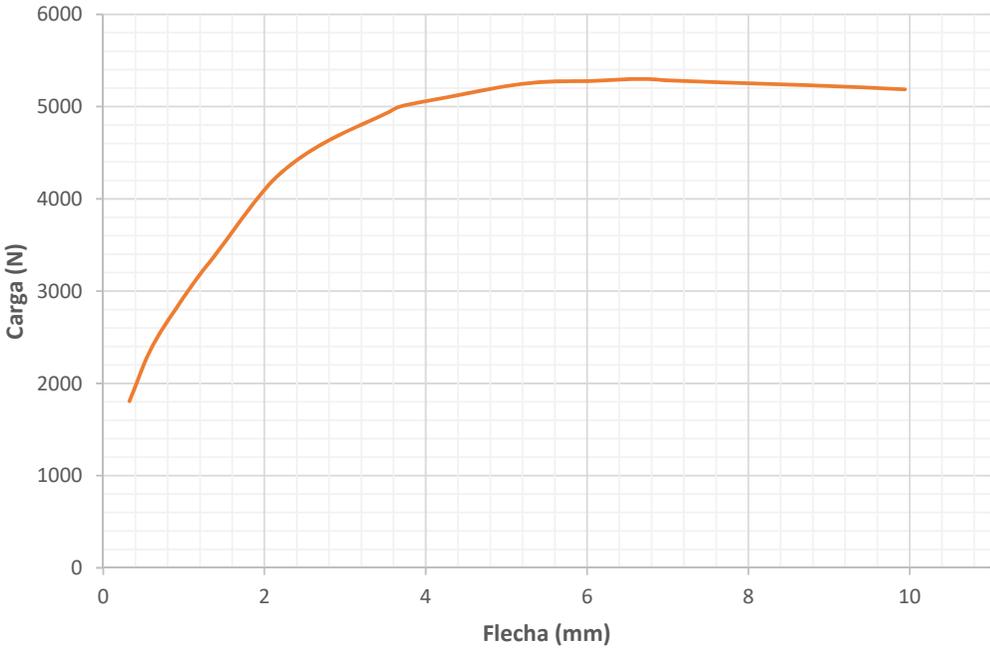


Figura 4. 3. Convergencia de resultados de los ensayos de tracción del acero ASTM A500 grado A. (Fuente: Autor)

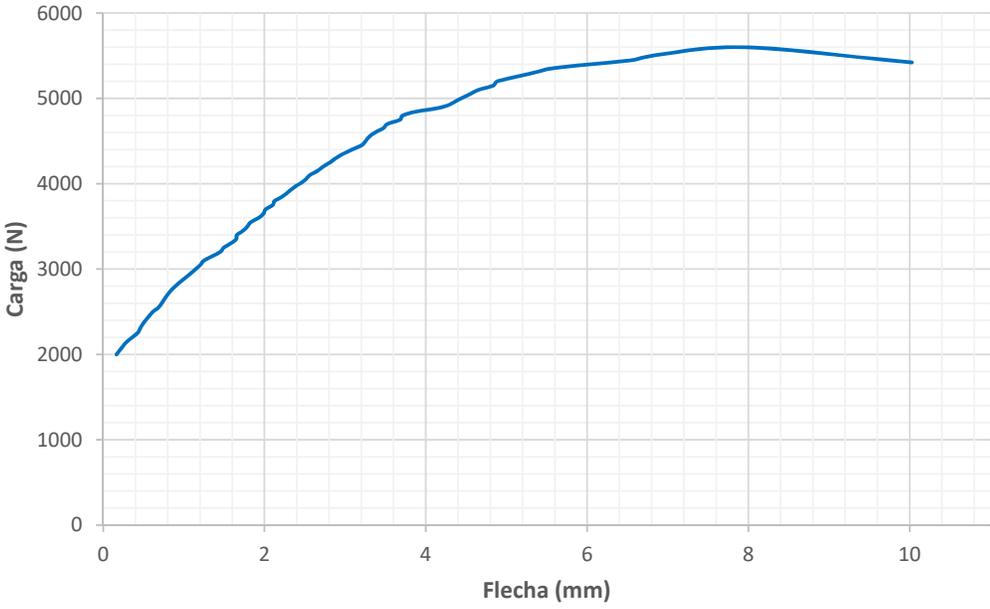
4.1.4. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A

Tabla 4. 16. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 01

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 9)					
Probeta N°	01	Muestra:	Tubo 25x25x2 mm		
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez		
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez		
Espesor:	2 mm	Longitud entre apoyos:	500 mm		
Longitud de la probeta:	600 mm	Sección transversal:	Cuadrada 25x25x2 mm		
Material:		Acero ASTM A500			
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga de fluencia:	5050 N	Deformación a la carga de fluencia:	1.632 mm		
Carga máxima:	5300 N	Deformación a la carga máxima:	6.727 mm		

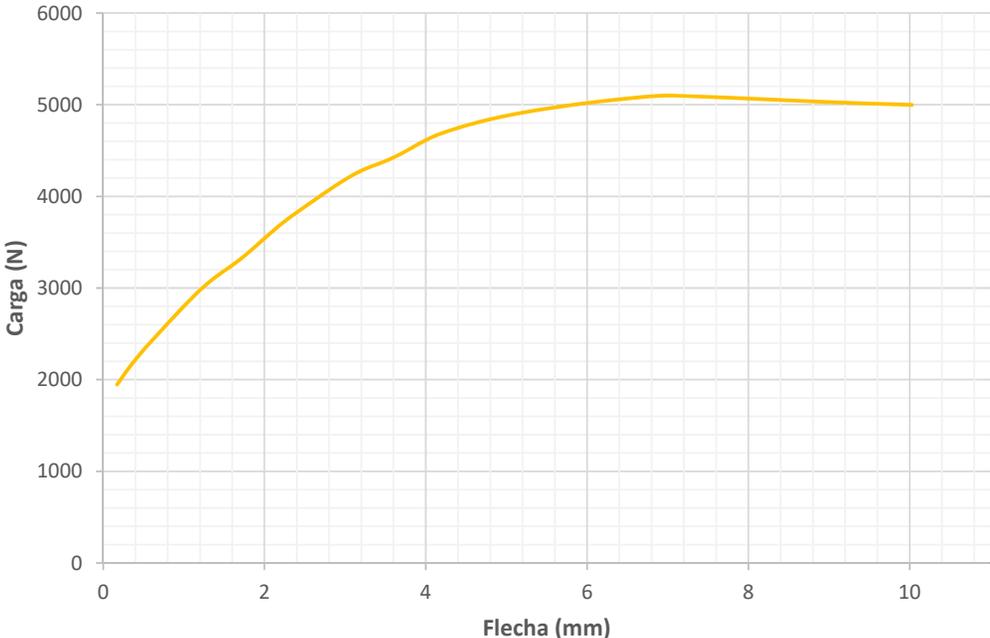
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 17. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 02

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 9)			
Probeta N°	02	Muestra:	Tubo 25x25x2 mm
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua		
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	2 mm	Longitud entre apoyos:	500 mm
Longitud de la probeta:	600 mm	Sección transversal:	Cuadrada 25x25x2 mm
Material:		Acero ASTM A500	
RESULTADO DEL ENSAYO			
 <p>The graph plots Load (N) on the y-axis (0 to 6000) against Deflection (mm) on the x-axis (0 to 10). The curve shows an initial linear elastic region, followed by a yield point at 5050 N and 3.16 mm, a strain hardening region reaching a maximum load of 5600 N at 7.951 mm, and a final region of slight load reduction.</p>			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga de fluencia:	5050 N	Deformación a la carga de fluencia:	3.16 mm
Carga máxima:	5600 N	Deformación a la carga máxima:	7.951 mm

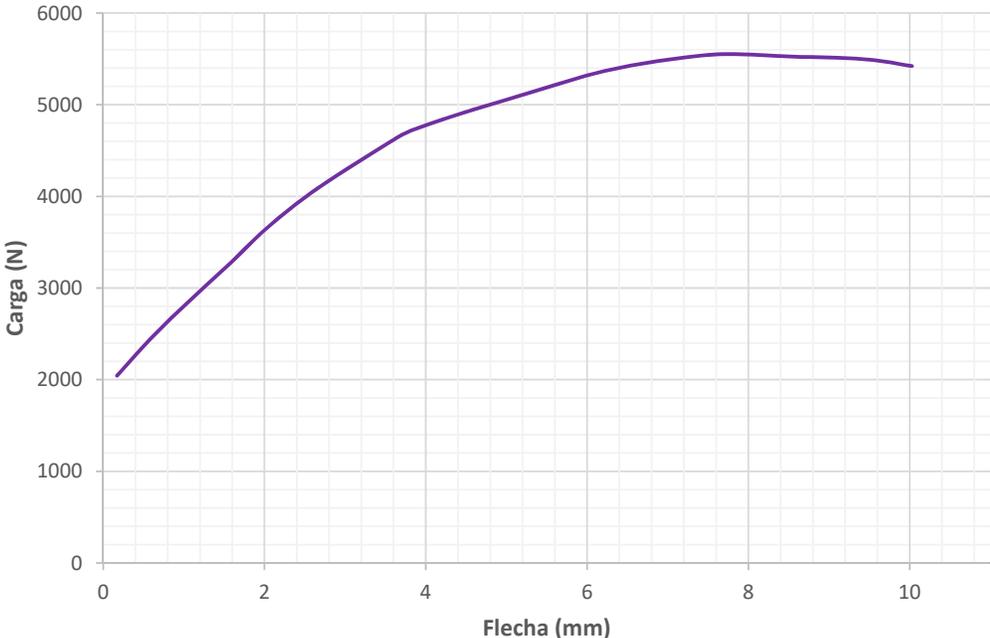
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 18. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 03

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 9)					
Probeta N°	03		Muestra:	Tubo 25x25x2 mm	
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016		Realizado por:	Luis Martínez	
			Revisado por:	Ing. Diego Núñez	
Espesor:	2 mm		Longitud entre apoyos:	500 mm	
Longitud de la probeta:	600 mm		Sección transversal:	Cuadrada 25x25x2 mm	
Material:			Acero ASTM A500		
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga de fluencia:	4650 N		Deformación a la carga de fluencia:	1.754 mm	
Carga máxima:	5100 N		Deformación a la carga máxima:	7.066 mm	

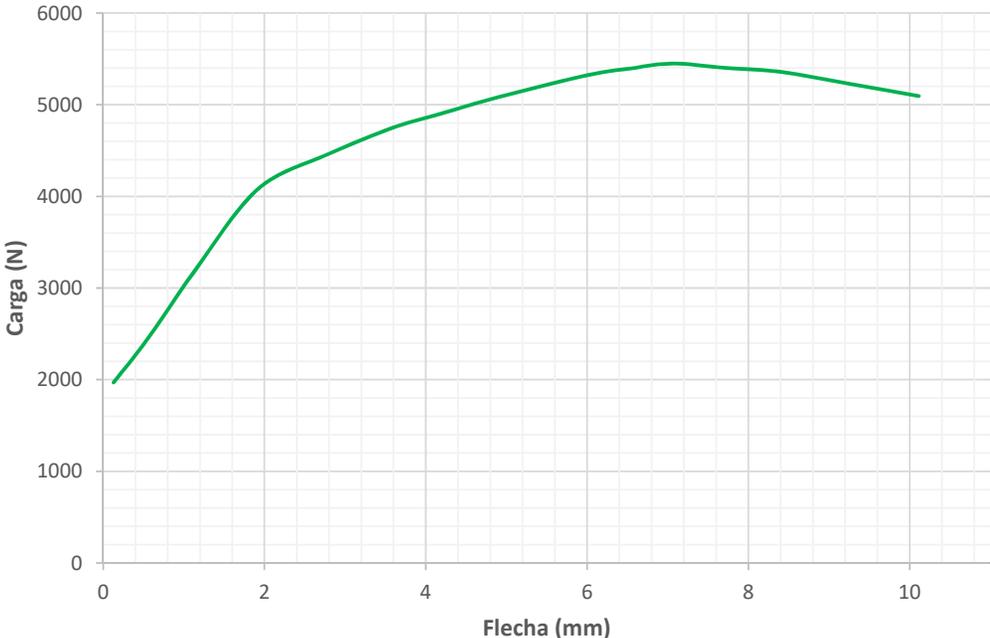
(Fuente: Autor)

Tabla 4. 19. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 04

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 9)					
Probeta N°	04	Muestra:	Tubo 25x25x2 mm		
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016	Realizado por:	Luis Martínez		
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez		
Espesor:	2 mm	Longitud entre apoyos:	500 mm		
Longitud de la probeta:	600 mm	Sección transversal:	Cuadrada 25x25x2 mm		
Material:		Acero ASTM A500			
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga de fluencia:	5050 N	Deformación a la carga de fluencia:	2.231 mm		
Carga máxima:	5550 N	Deformación a la carga máxima:	7.613 mm		

(Fuente: Autor)

Tabla 4. 20. Ensayo de flexión de acero ASTM A500 grado A, probeta 05

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE FLEXIÓN (ANEXO 9)					
Probeta N°	05		Muestra:	Tubo 25x25x2 mm	
Lugar de ensayo	Centro de Fomento Carrocero Metalmecánico, H. Gobierno Provincial de Tungurahua				
Fecha de Ejecución:	16/08/2016		Realizado por:	Luis Martínez	
			Revisado por:	Ing. Diego Núñez	
Espesor:	2 mm		Longitud entre apoyos:	500 mm	
Longitud de la probeta:	600 mm		Sección transversal:	Cuadrada 25x25x2 mm	
Material:			Acero ASTM A500		
RESULTADO DEL ENSAYO					
					
RESULTADOS OBTENIDOS					
Carga de fluencia:	5000 N		Deformación a la carga de fluencia:	1.962 mm	
Carga máxima:	5450 N		Deformación a la carga máxima:	7.040 mm	

(Fuente: Autor)

La figura 4.4 muestra la convergencia de los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos de flexión del acero ASTM A500 grado A.

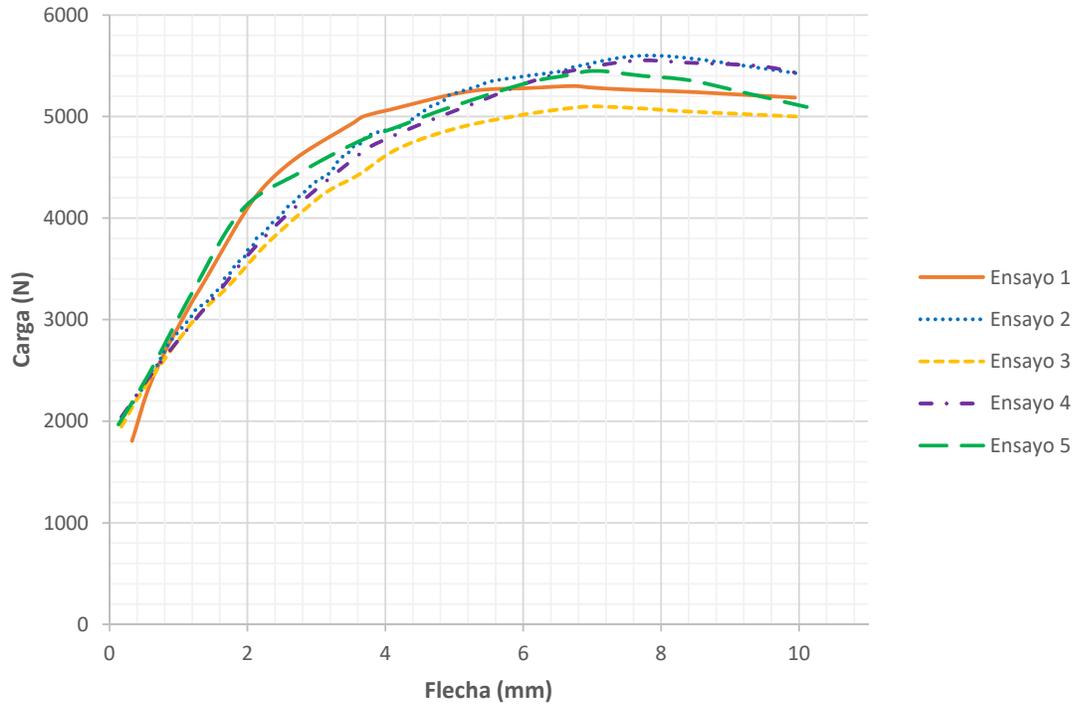


Figura 4. 4. Convergencia de resultados de los ensayos de flexión del acero ASTM A500 grado A. (Fuente: Autor)

4.2. Análisis de los resultados

4.2.1. Simulaciones de los ensayos de materiales

Los análisis por elementos finitos requieren de la definición de modelos de materiales, por lo tanto es necesario utilizar los parámetros obtenidos en ensayos reales, sin embargo, al existir varios modelos de materiales disponibles en los programas para análisis por elementos finitos.

Es por ello que para asegurar que los modelos de materiales que se utilizarán tienen un comportamiento cercano al de los materiales reales se han realizado las simulaciones de los ensayos reales.

4.2.1.1. Simulación del ensayo de tracción del acero ASTM A36

Para la simulación de este ensayo se ha realizado un modelo digital con las mismas dimensiones de las probetas reales y con las mismas condiciones de entorno del ensayo real, esto es un extremo fijo y el otro móvil en el cual se aplican las cargas de tracción. La figura 4.5 muestra el modelo digital utilizado en la simulación del ensayo.



Figura 4. 5. Modelo digital para el ensayo de tracción de acero ASTM A36.

(Fuente: Autor)

4.2.1.1.1. Verificación de la calidad de la malla

El modelo fue mallado con elementos *cuadriláteros de tipo shell*, los cuales permiten obtener un buen desempeño de la simulación reduciendo el gasto computacional que se tendría al emplear elementos sólidos.

La malla está compuesta por 612 elementos y 721 nodos, la calidad de la malla se ha evaluado en base a la *relación de aspecto* de los elementos, teniendo una relación mínima de 1.03 y máxima de 1.54, las cuales se encuentran dentro de los valores recomendados de calidad de malla, teniendo valores muy cercanos al valor ideal de relación de aspecto que es 1. La figura 4.6 muestra la malla del modelo.

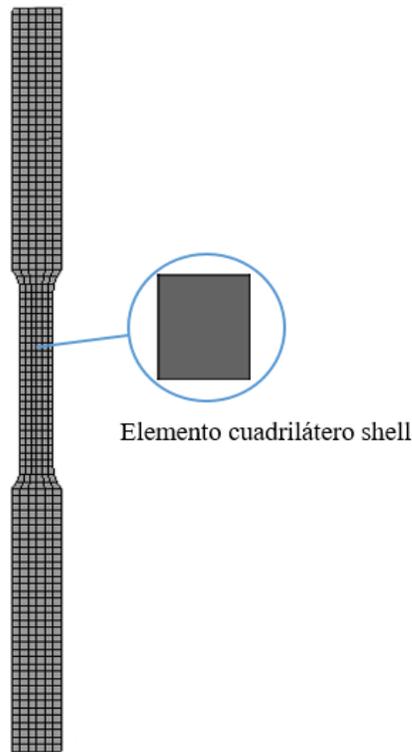


Figura 4. 6. Malla del modelo digital con elementos cuadriláteros tipo shell
(Fuente: Autor)

A continuación se muestran las relaciones de aspecto de los elementos de la malla:

Tabla 4. 21. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla

Relación de aspecto	Número de elementos
1.03	436
1.09	4
1.26	4
1.37	8
1.43	4
1.48	144
1.54	12

(Fuente: Autor)

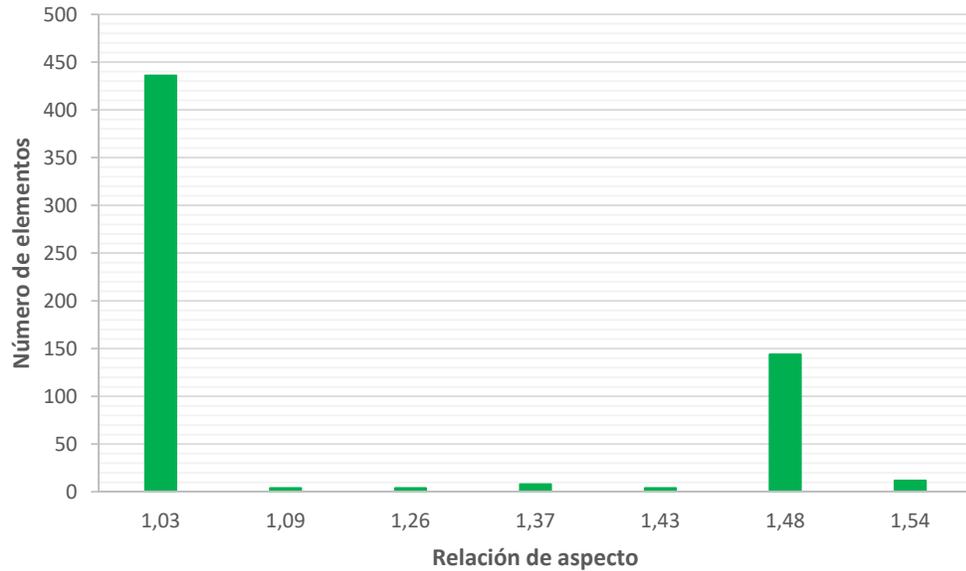
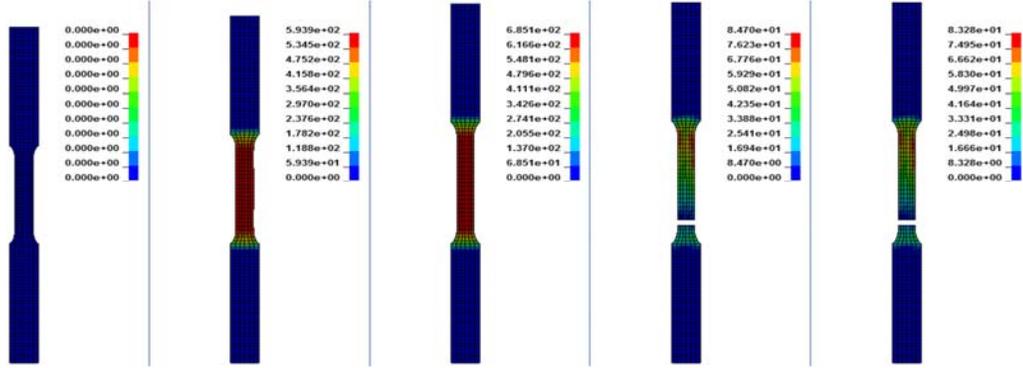
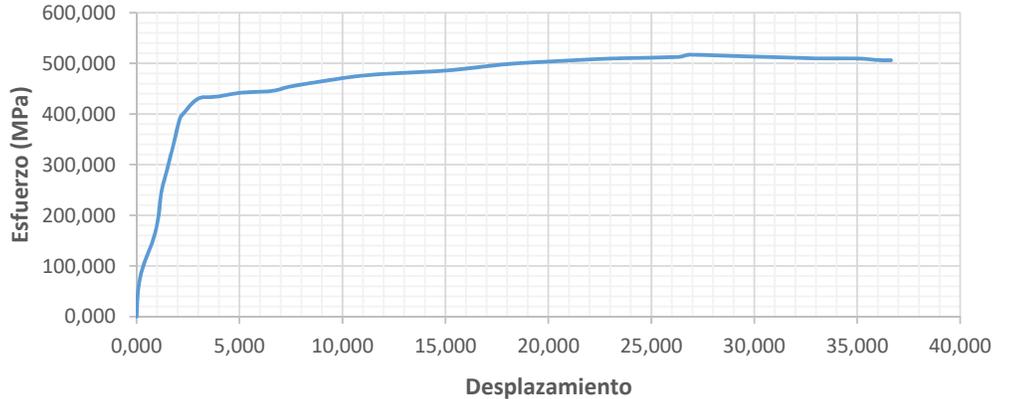


Figura 4. 7. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla. (Fuente: Autor)

4.2.1.1.2. Resultados de la simulación

Para la ejecución de la simulación se aplicaron desplazamientos al extremo móvil de la probeta, mientras que los esfuerzos resultantes obtenidos son equivalentes a la relación entre la fuerza de reacción total en el extremo fijo y la sección transversal de la probeta. La tabla 4.22 muestra los resultados obtenidos de la simulación del ensayo.

Tabla 4. 22. Simulación del ensayo de tracción del acero ASTM A36

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
SIMULACIÓN DE ENSAYO DE TRACCIÓN			
Probeta N°	01	Muestra:	Pletina 30x4 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Fecha de Ejecución:	19/09/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	4 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Relación de aspecto mínima:	1.0003	Relación de aspecto máxima:	1.5682
Número de elementos:	612	Número de nodos:	721
Tiempo de procesamiento:	3 horas 47 minutos	Número de procesadores:	8
Modelo de material:	Fig. 3.12; Tabla 3.10	Condiciones de borde:	Secc. 4.2.1.1 y 4.2.1.1.2
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Esfuerzo mínimo:	0 MPa	Deformación inicial:	0 mm
Esfuerzo máximo:	516.950 MPa	Deformación última:	36.640 mm

(Fuente: Autor)

4.2.1.1.3. Comparación del ensayo real y simulado

Para demostrar la validez del modelo de material utilizado es necesario comparar los resultados obtenidos en el ensayo simulado con los del ensayo real, determinando el error existente entre ellos. La tabla 4.23 muestra los resultados de los ensayos reales y simulados con sus respectivos porcentajes de error.

Tabla 4. 23. Comparación de los resultados del ensayo real y simulado.

ENSAYO REAL PROMEDIO		ENSAYO SIMULADO		ERROR (%)
Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000%
0.080	58.670	0.080	52.699	11.330%
0.304	104.970	0.304	97.958	7.159%
0.768	159.963	0.768	147.025	8.800%
1.060	216.794	1.060	196.013	10.602%
1.200	253.901	1.200	244.975	3.644%
1.508	313.406	1.508	293.925	6.628%
1.808	356.698	1.808	342.838	4.043%
2.104	371.240	2.104	391.313	5.407%
2.264	375.920	2.264	400.225	6.465%
2.736	383.776	2.736	422.475	10.084%
3.168	386.451	3.168	432.650	11.955%
3.936	391.800	3.936	434.200	10.822%
4.996	393.805	4.996	441.738	12.172%
6.608	400.491	6.608	445.563	11.254%
7.660	419.546	7.660	455.775	8.635%
11.268	461.668	11.268	476.938	3.307%
14.872	485.069	14.872	485.138	0.014%
18.176	498.776	18.176	499.138	0.073%
21.024	505.963	21.024	505.563	0.079%
22.832	508.972	22.832	509.163	0.037%
26.336	511.312	26.336	512.750	0.281%
26.864	511.980	26.864	516.950	0.971%
30.028	510.810	30.028	513.163	0.460%
31.508	508.470	31.508	511.763	0.647%
33.024	501.784	33.024	509.738	1.585%
35.010	476.377	35.010	509.525	6.958%
36.027	450.191	36.027	506.413	12.488%
36.640	429.500	36.640	506.025	17.817%
ERROR PROMEDIO (%)				5.99%

(Fuente: Autor)

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo del porcentaje de error utilizando los esfuerzos máximos obtenidos en el ensayo real y en el ensayo simulado:

$$\mathbf{Error\ (\%)} = \frac{\mathbf{Esfuerzo\ máximo - Esfuerzo\ mínimo}}{\mathbf{Esfuerzo\ mínimo}} * \mathbf{100} \quad (4.1)$$

$$Error\ (\%) = \frac{516.950\ MPa - 511.980\ MPa}{511.980\ MPa} * 100$$

$$\mathbf{Error\ (\%)} = \mathbf{0.971\ \%}$$

De la comparación de resultados se obtiene un error promedio de 5.99 %, el cual es un valor lo suficientemente bajo como para dar por válido el modelo de material utilizado en la simulación. La figura 4.8 muestra la comparación de las curvas de esfuerzo – desplazamiento ingenieril del ensayo real y simulado.

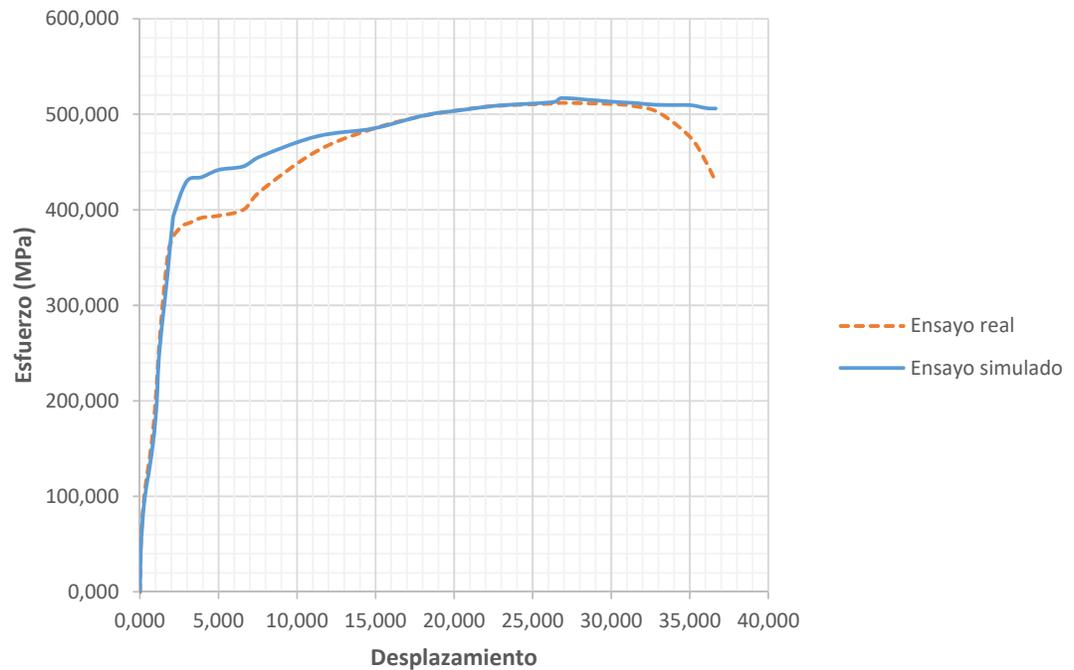


Figura 4. 8. Curvas esfuerzo – desplazamiento ingenieril del ensayo real y simulado. (Fuente: Autor)

4.2.1.2. Simulación del ensayo de flexión del acero ASTM A36

Para la simulación de este ensayo se ha realizado un modelo digital con las mismas dimensiones de las probetas reales, puntos de apoyo y su ubicación, aunque para estos últimos se ha realizado una simplificación con el fin de reducir el gasto computacional, en este ensayo los dos apoyos inferiores permanecen fijos mientras que el apoyo superior es móvil y aplica las cargas de flexión en el centro de la probeta. La figura 4.9 muestra el modelo digital utilizado en la simulación del ensayo.

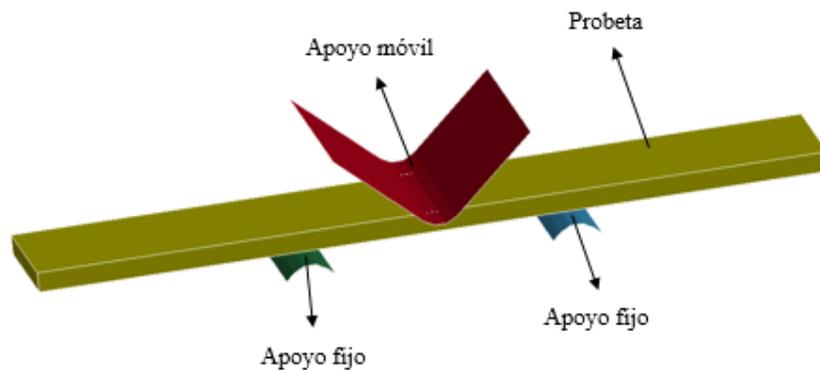


Figura 4. 9. Modelo digital para el ensayo de flexión de acero ASTM A36.

(Fuente: Autor)

4.2.1.2.1. Verificación de la calidad de la malla

El modelo fue mallado con *elementos cuadriláteros de tipo shell* en los apoyos y con *elementos sólidos hexaédricos* en la probeta, en este caso no se pueden utilizar elementos Shell en la probeta porque se tendrían interferencias debido a la geometría del modelo.

La malla está compuesta por 2932 elementos y 4508 nodos teniendo 2402 elementos sólidos y 530 elementos shell, la calidad de la malla se ha evaluado en base a la *relación de aspecto* de los elementos, teniendo una relación mínima de 1.04 y máxima de 1.77, las cuales se encuentran dentro de los valores recomendados de calidad de malla, teniendo valores muy cercanos al valor ideal de relación de aspecto que es 1. La figura 4.10 muestra la malla del modelo.

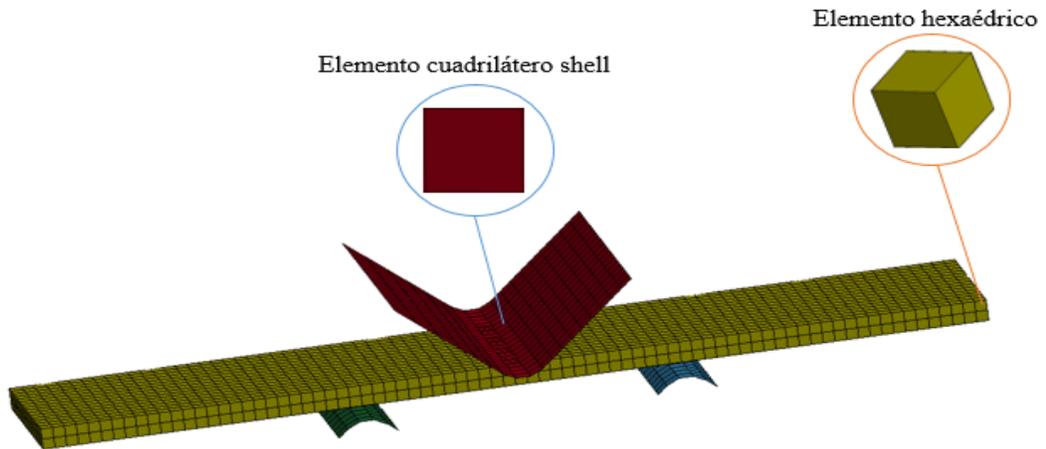


Figura 4. 10. Malla del modelo digital con elementos cuadriláteros shell y elementos hexaédricos. (Fuente: Autor)

A continuación se muestran las relaciones de aspecto de los elementos de la malla:

Tabla 4. 24. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla

Relación de aspecto	Número de elementos
1.04	2402
1.04	263
1.12	140
1.2	43
1.28	18
1.37	5
1.45	4
1.61	13
1.69	6
1.77	38

(Fuente: Autor)

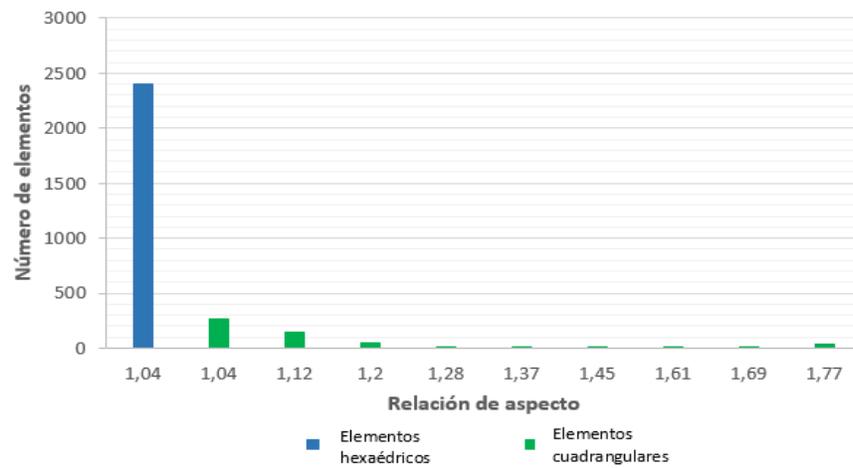
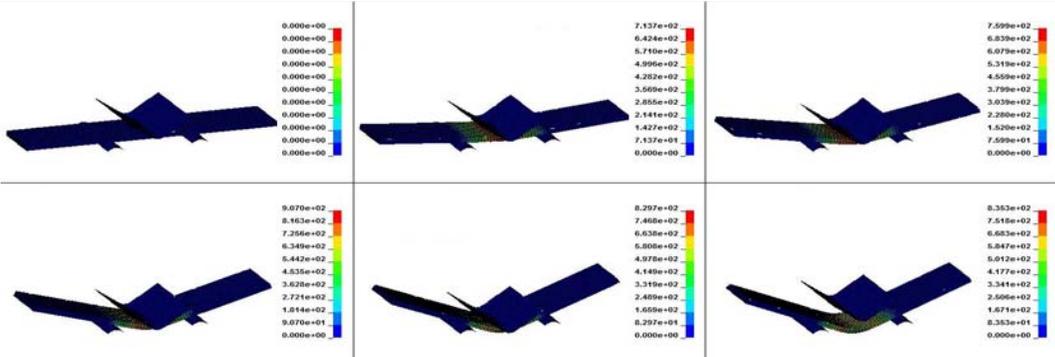
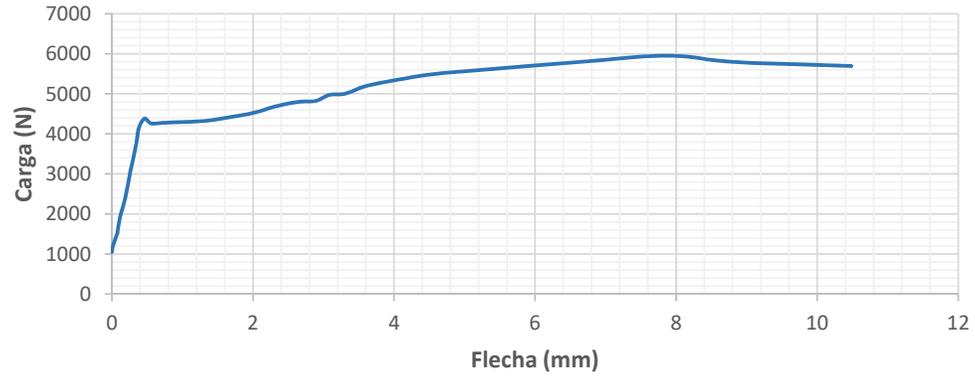


Figura 4. 11. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla. (Fuente: Autor)

4.2.1.2.2. Resultados de la simulación

Para la ejecución de la simulación se aplicaron desplazamientos en el apoyo móvil o punzón en contacto con la probeta, mientras las cargas resultantes obtenidas son equivalentes a la sumatoria de las fuerzas de reacción en los apoyos fijos en contacto con la probeta. La tabla 4.25 muestra los resultados obtenidos de la simulación del ensayo

Tabla 4. 25. Simulación del ensayo de flexión del acero ASTM A36

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
SIMULACIÓN DE ENSAYO DE FLEXIÓN			
Probeta N°	01	Muestra:	Pletina 30x4 mm
Fecha de Ejecución:	20/09/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	4 mm	Longitud entre apoyos:	34 mm
Longitud de la probeta:	160 mm	Sección transversal:	Rectangular 30x4 mm
Relación de aspecto mínima:	1	Relación de aspecto máxima:	1.8139
Número de elementos:	2932	Número de nodos:	4508
Tiempo de procesamiento:	3 horas 56 minutos	Número de procesadores:	8
Modelo de material:	Fig. 3.12; Tabla 3.10	Condiciones de borde:	Secc. 4.2.1.2 y 4.2.1.2.2
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga mínima:	1051.467 N	Deformación inicial:	0 mm
Carga máxima:	5954.223 N	Deformación última:	10.485 mm

(Fuente: Autor)

4.2.1.2.3. Comparación del ensayo real y simulado

La tabla 4.26 muestra los resultados de los ensayos reales y simulados con sus respectivos porcentajes de error.

Tabla 4. 26. Comparación de los resultados del ensayo real y simulado

ENSAYO REAL PROMEDIO		ENSAYO SIMULADO		ERROR (%)
Flecha (mm)	Carga (N)	Flecha (mm)	Carga (N)	
0	1071	0	1051.467	1.86%
0.013	1101	0.013	1191.792	8.25%
0.071	1530	0.071	1490.81	2.63%
0.079	1590	0.079	1517.851	4.75%
0.082	1618	0.082	1618.1748	0.01%
0.098	1734	0.098	1746.922	0.75%
0.114	1850	0.114	1916.771	3.61%
0.133	2003	0.133	2038.018	1.75%
0.16	2218	0.16	2200.57	0.79%
0.199	2530	0.199	2481.811	1.94%
0.265	3086	0.265	3094.132	0.26%
0.28	3220	0.28	3215.69	0.13%
0.3	3393	0.3	3349.444	1.30%
0.319	3562	0.319	3530.417	0.89%
0.35	3824	0.35	3801.309	0.60%
0.373	4012	0.373	4092.06	2.00%
0.405	4211	0.405	4246.608	0.85%
0.467	4181	0.467	4384.9275	4.88%
0.552	3958	0.552	4264.314	7.74%
0.691	3916	0.691	4272.17	9.10%
0.873	4009	0.873	4288.921	6.98%
1.106	4214	1.106	4301.419	2.07%
1.35	4308	1.35	4329.752	0.50%
1.498	4350	1.498	4364.435	0.33%
1.699	4414	1.699	4425.103	0.25%
2.033	4547	2.033	4532.845	0.31%
2.304	4651	2.304	4679.389	0.61%
2.629	4794	2.629	4796.991	0.06%
2.89	4889	2.89	4823.531	1.36%
3.083	4970	3.083	4974.564	0.09%
3.312	5082	3.312	5005.427	1.53%
3.626	5208	3.626	5205.817	0.04%
4.212	5396	4.212	5399.929	0.07%
4.615	5508	4.615	5504.672	0.06%
6.631	5800	6.631	5795.427	0.08%

7.872	5864	7.872	5954.223	1.539%
8.82	5758.128	8.82	5795.29	0.65%
10.485	5678.154	10.485	5694.874	0.29%
			ERROR PROMEDIO (%)	1.87%

(Fuente: Autor)

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo del porcentaje de error utilizando las cargas máximas aplicadas en el ensayo real y en el ensayo simulado:

$$\mathbf{Error\ (\%) = \frac{Carga\ máxima - Carga\ mínima}{Carga\ mínima} * 100} \quad (4.2)$$

$$Error\ (\%) = \frac{5954.223\ N - 5864\ N}{5954.223\ N} * 100$$

$$\mathbf{Error\ (\%) = 1.539\ \%}$$

De la comparación de resultados se obtiene un error promedio de 1.87 %, el cual es un valor lo suficientemente bajo como para dar por válido el modelo de material utilizado en la simulación. La figura 4.12 muestra la comparación de las curvas de carga – flecha del ensayo real y simulado.

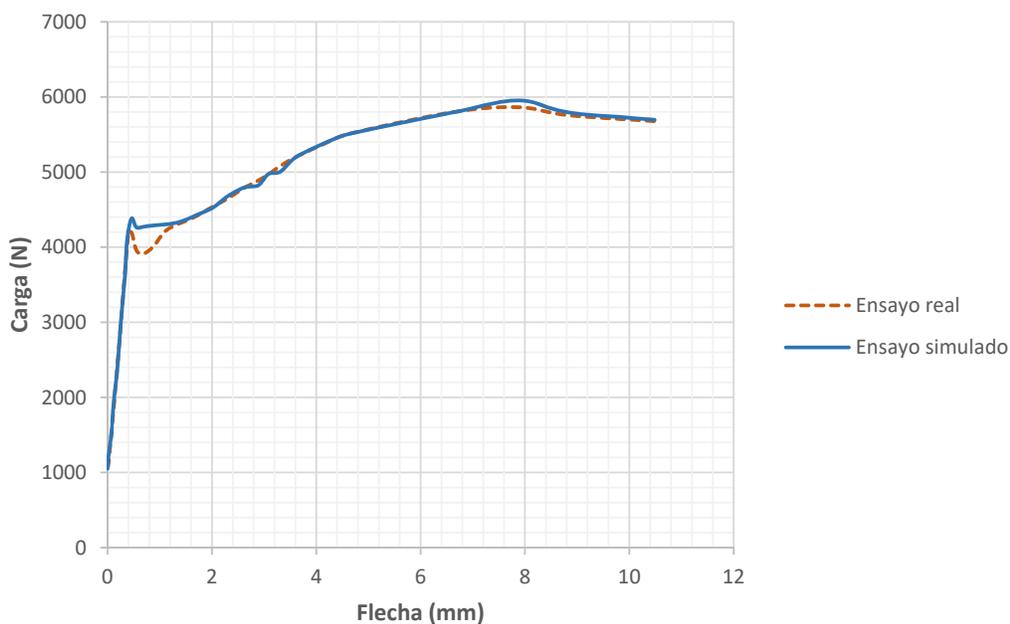


Figura 4. 12. Curvas carga – flecha del ensayo real y simulado. (Fuente: Autor)

4.2.1.3. Simulación del ensayo de tracción del acero ASTM A500 grado A

Para la simulación de este ensayo se ha realizado un modelo digital con las mismas dimensiones de las probetas reales y con las mismas condiciones de entorno del ensayo real, esto es un extremo fijo y el otro móvil en el cual se aplican las cargas de tracción. La figura 4.13 muestra el modelo digital utilizado en la simulación del ensayo.



Figura 4. 13. Modelo digital para el ensayo de tracción de acero ASTM A500.

(Fuente: Autor)

4.2.1.3.1. Verificación de la calidad de la malla

El modelo fue mallado con *elementos cuadriláteros de tipo shell*, teniendo 612 elementos y 721 nodos, la calidad de la malla se ha evaluado en base a la *relación de aspecto* de los elementos, teniendo una relación mínima de 1.03 y máxima de 1.54, las cuales se encuentran dentro de los valores recomendados de calidad de malla, teniendo valores muy cercanos al valor ideal de relación de aspecto que es 1. La figura 4.14 muestra la malla del modelo.

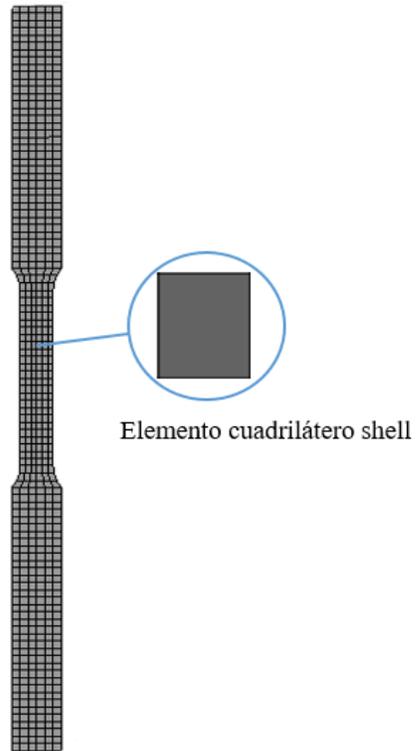


Figura 4. 14. Malla del modelo digital con elementos cuadriláteros tipo shell.

(Fuente: Autor)

A continuación se muestran las relaciones de aspecto de los elementos de la malla:

Tabla 4. 27. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla

Relación de aspecto	Número de elementos
1.03	436
1.09	4
1.26	4
1.37	8
1.43	4
1.48	144
1.54	12

(Fuente: Autor)

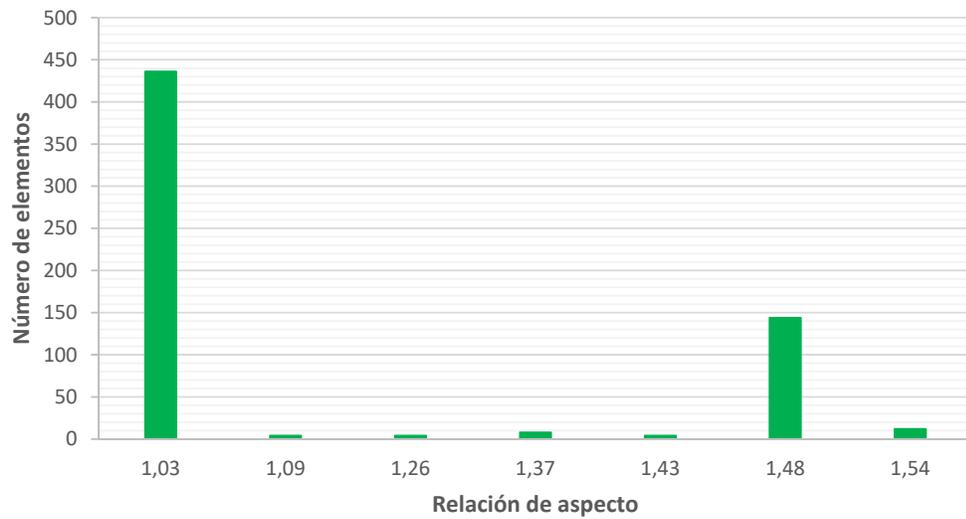
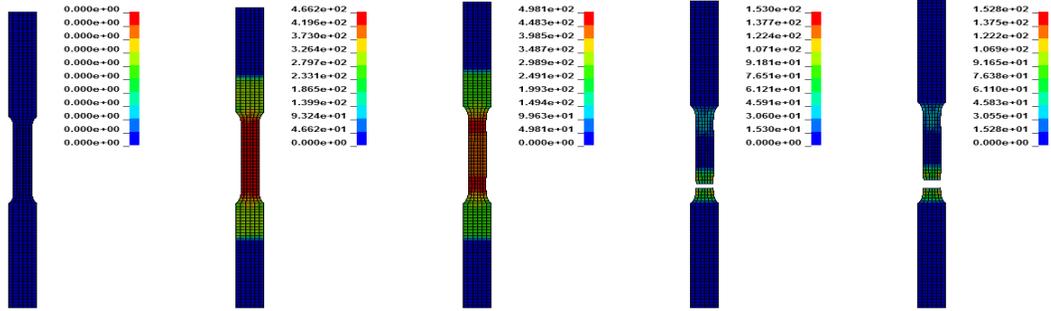
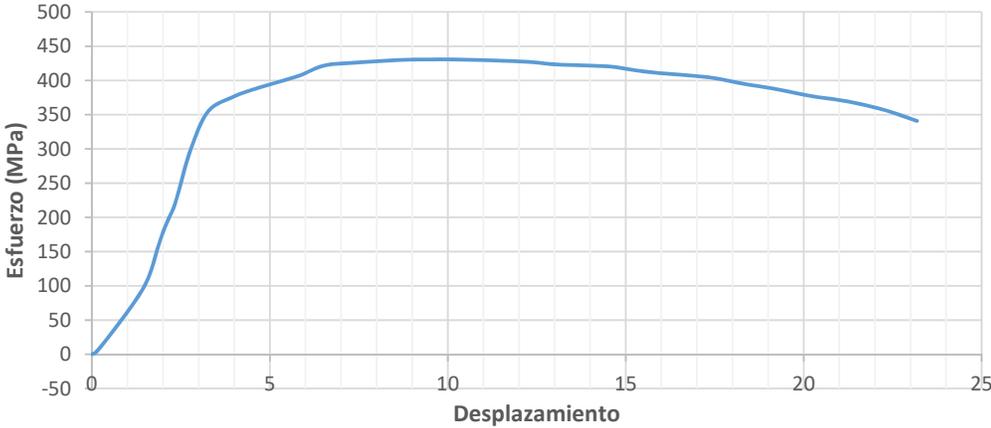


Figura 4. 15. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla. (Fuente: Autor)

4.2.1.3.2. Resultados de la simulación

Para la ejecución de la simulación se aplicaron desplazamientos al extremo móvil de la probeta, mientras que los esfuerzos resultantes obtenidos son equivalentes a la relación entre la fuerza de reacción total en el extremo fijo y la sección transversal de la probeta. La tabla 4.28 muestra los resultados obtenidos de la simulación del ensayo.

Tabla 4. 28. Simulación del ensayo de tracción del acero ASTM A500 grado A

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
SIMULACIÓN DE ENSAYO DE TRACCIÓN			
Probeta N°	01	Muestra:	Tubo 40x20x2 mm
Norma aplicable:	NTE INEN 109:2009		
Fecha de Ejecución:	16/09/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	2 mm	Longitud calibrada:	80 mm
Relación de aspecto mínima:	1.0003	Relación de aspecto máxima:	1.5682
Número de elementos:	612	Número de nodos:	721
Tiempo de procesamiento:	11 horas 8 minutos	Número de procesadores:	8
Modelo de material:	Fig. 3.13; Tabla 3.11	Condiciones de borde:	Secc. 4.2.1.3 y 4.2.1.3.2
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Esfuerzo mínimo:	0 MPa	Deformación inicial:	0 mm
Esfuerzo máximo:	430.625 MPa	Deformación última:	23.185 mm

(Fuente: Autor)

4.2.1.3.3. Comparación del ensayo real y simulado

La tabla 4.29 muestra los resultados de los ensayos reales y simulados con sus respectivos porcentajes de error.

Tabla 4. 29. Comparación de los resultados del ensayo real y simulado

ENSAYO REAL PROMEDIO		ENSAYO SIMULADO		ERROR (%)
Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)	
0	0	0	0	0.00%
0.154	4.75	0.154	5	5.26%
1.056	57.511	1.056	66.2075	15.12%
1.574	115.89	1.574	110.34	5.03%
1.981	173.2825	1.981	176.48	1.85%
2.342	229.885	2.342	220.5775	4.22%
2.696	286	2.696	286.675	0.24%
3.231	347.155	3.231	352.425	1.52%
3.948	355.2825	3.948	375.5	5.69%
4.761	364.71	4.761	390.5	7.07%
5.799	374.255	5.799	406.5	8.62%
6.516	378.6725	6.516	421.675	11.36%
7.362	381.7875	7.362	425.825	11.53%
8.668	383.6425	8.668	429.925	12.06%
9.482	383.6425	9.482	430.625	12.25%
10.413	383.2875	10.413	430.5	12.32%
11.569	382.5375	11.569	428.625	12.05%
12.308	382.065	12.308	427.025	11.77%
13.047	381.5125	13.047	423.375	10.97%
14.525	380.53	14.525	420.4	10.48%
15.222	380.0575	15.222	415.15	9.23%
15.918	379.3825	15.918	410.9	8.31%
17.354	378.16	17.354	404.4	6.94%
18.276	377.2125	18.276	395.4	4.82%
19.165	375.69	19.165	387.9	3.25%
20.258	372.2825	20.258	376.725	1.19%
21.083	367.865	21.083	370.725	0.78%
22.187	357.49	22.187	358.075	0.16%
23.185	341.91	23.185	340.9	0.30%
ERROR PROMEDIO (%)				6.70%

(Fuente: Autor)

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo del porcentaje de error utilizando los esfuerzos máximos obtenidos en el ensayo real y en el ensayo simulado:

$$\text{Error (\%)} = \frac{\text{Esfuerzo máximo} - \text{Esfuerzo mínimo}}{\text{Esfuerzo mínimo}} * 100 \quad (4.1)$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{430.625 \text{ MPa} - 383.6425 \text{ MPa}}{383.6425 \text{ MPa}} * 100$$

$$\text{Error (\%)} = 12.25 \%$$

De la comparación de resultados se obtiene un error promedio de 6.70 %, el cual es un valor lo suficientemente bajo como para dar por válido el modelo de material utilizado en la simulación. La figura 4.16 muestra la comparación de las curvas de esfuerzo – desplazamiento ingenieril del ensayo real y simulado.

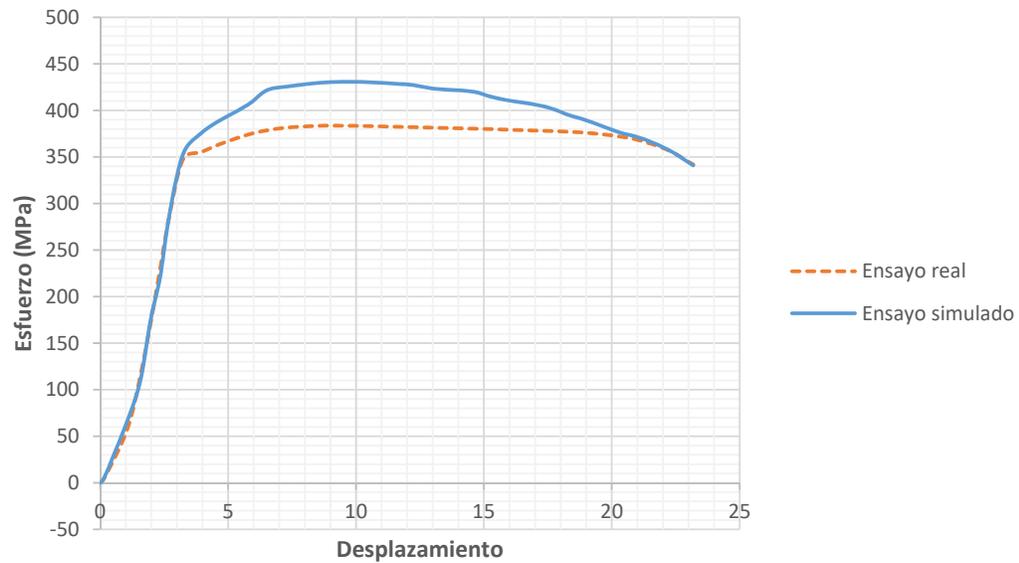


Figura 4. 16. Curvas esfuerzo – desplazamiento ingenieril del ensayo real y simulado. (Fuente: Autor)

4.2.1.4. Simulación del ensayo de flexión del acero ASTM A500 grado A

Para la simulación de este ensayo se ha realizado un modelo digital con las mismas dimensiones de las probetas reales, puntos de apoyo y su ubicación, en este ensayo los dos apoyos inferiores permanecen fijos mientras que el apoyo superior es móvil

y aplica las cargas de flexión en el centro de la probeta. La figura 4.17 muestra el modelo digital utilizado en la simulación del ensayo.

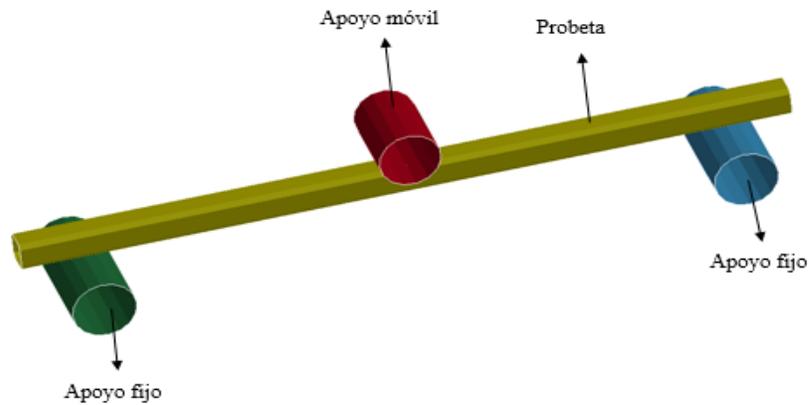


Figura 4. 17. Modelo digital para el ensayo de flexión de acero ASTM A500.

(Fuente: Autor)

4.2.1.4.1. Verificación de la calidad de la malla

El modelo fue mallado con *elementos cuadriláteros de tipo shell* teniendo 2264 elementos y 2327 nodos, la calidad de la malla se ha evaluado en base a la *relación de aspecto* de los elementos, teniendo una relación mínima de 1.02 y máxima de 1.11, las cuales se encuentran dentro de los valores recomendados de calidad de malla, teniendo valores muy cercanos al valor ideal de relación de aspecto que es 1. La figura 4.18 muestra la malla del modelo.

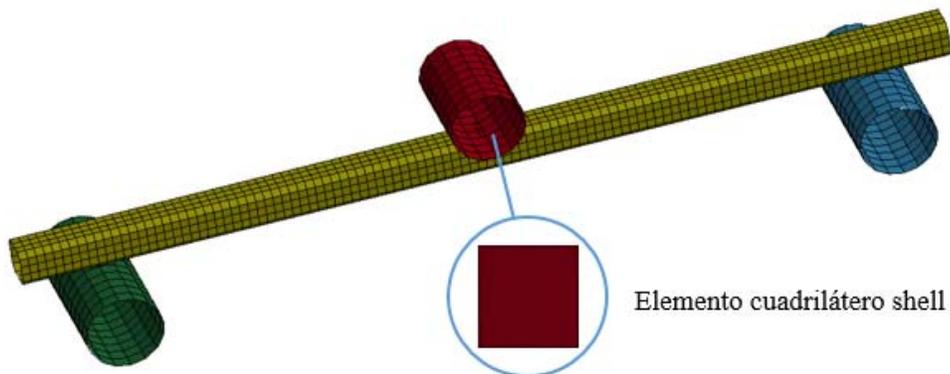


Figura 4. 18. Malla del modelo digital con elementos cuadriláteros tipo shell.

(Fuente: Autor)

A continuación se muestran las relaciones de aspecto de los elementos de la malla:

Tabla 4. 30. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla

Relación de aspecto	Número de elementos
1.02	816
1.03	24
1.04	452
1.05	16
1.06	460
1.09	464
1.1	8
1.11	24

(Fuente: Autor)

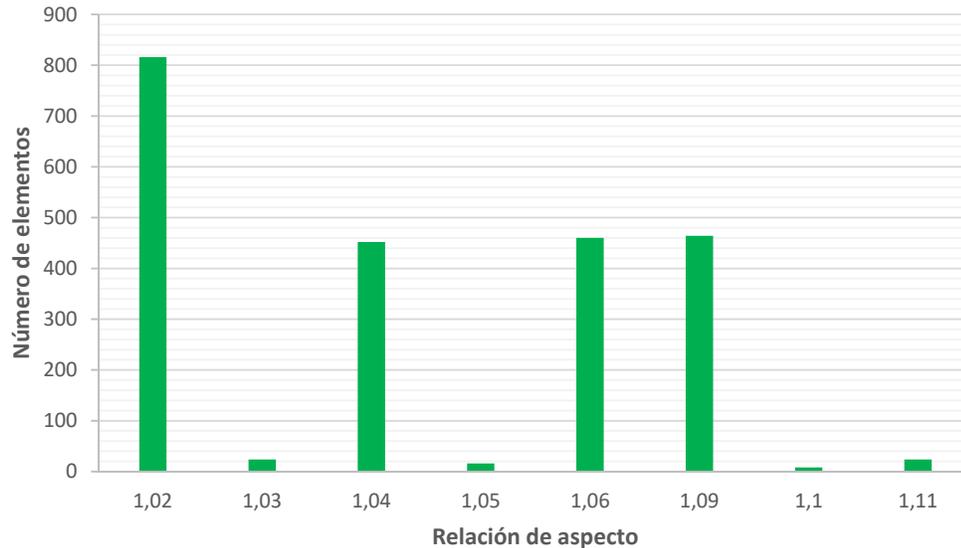
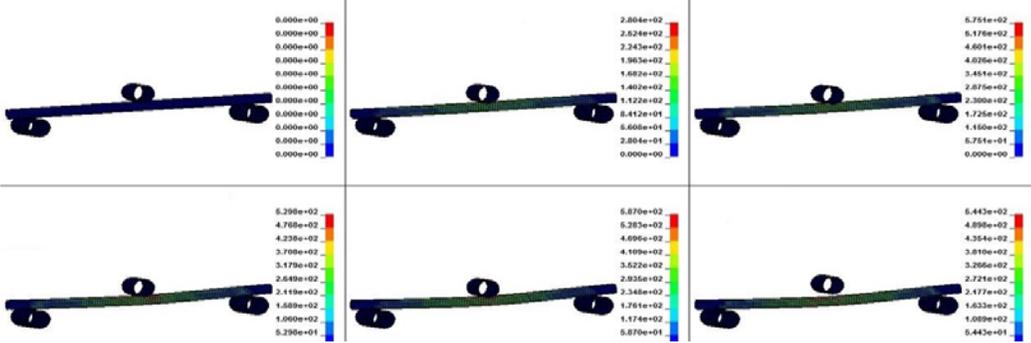
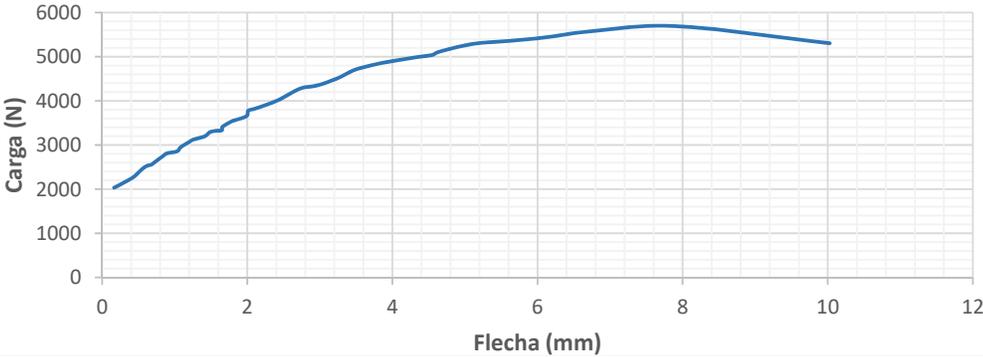


Figura 4. 19. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla. (Fuente: Autor)

4.2.1.4.2. Resultados de la simulación

Para la ejecución de la simulación se aplicaron desplazamientos en el apoyo móvil o punzón en contacto con la probeta, mientras las cargas resultantes obtenidas son equivalentes a la sumatoria de las fuerzas de reacción en los apoyos fijos en contacto con la probeta. La tabla 4.31 muestra los resultados obtenidos de la simulación del ensayo.

Tabla 4. 31. Simulación del ensayo de flexión del acero ASTM A500 grado A

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
SIMULACIÓN DE ENSAYO DE FLEXIÓN			
Probeta N°	01	Muestra:	Tubo 25x25x2 mm
Fecha de Ejecución:	17/09/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Espesor:	2 mm	Longitud entre apoyos:	500 mm
Longitud de la probeta:	600 mm	Sección transversal:	Cuadrada 25x25x2 mm
Relación de aspecto mínima:	1.0099	Relación de aspecto máxima:	1.1161
Número de elementos:	2264	Número de nodos:	2327
Tiempo de procesamiento:	1 hora 24 minutos	Número de procesadores:	8
Modelo de material:	Fig. 3.13; Tabla 3.11	Condiciones de borde:	Secc. 4.2.1.4 y 4.2.1.4.2
RESULTADO DEL ENSAYO			
			
			
RESULTADOS OBTENIDOS			
Carga mínima:	2031.99 N	Deformación inicial:	0 mm
Carga máxima:	5688.161 N	Deformación última:	10.0269 mm

(Fuente: Autor)

4.2.1.4.3. Comparación del ensayo real y simulado

La tabla 4.32 muestra los resultados de los ensayos reales y simulados con sus respectivos porcentajes de error.

Tabla 4. 32. Comparación de los resultados del ensayo real y simulado

ENSAYO REAL PROMEDIO		ENSAYO SIMULADO		ERROR (%)
Flecha (mm)	Carga (N)	Flecha (mm)	Carga (N)	
0	2000	0.165	0	1.60%
0.295	2150	0.295	2144.539	0.25%
0.425	2250	0.425	2264.919	0.66%
0.486	2350	0.486	2355.197	0.22%
0.555	2450	0.555	2461.649	0.48%
0.616	2500	0.616	2528.427	1.14%
0.686	2550	0.686	2564.117	0.55%
0.798	2700	0.798	2702.958	0.11%
0.842	2750	0.842	2754.266	0.16%
0.894	2800	0.894	2811.631	0.42%
1.033	2850	1.033	2858.223	0.29%
1.085	2950	1.085	2954.147	0.14%
1.206	3050	1.206	3075.138	0.82%
1.25	3100	1.25	3118.405	0.59%
1.415	3150	1.415	3196.713	1.48%
1.45	3200	1.45	3239.554	1.24%
1.493	3250	1.493	3297.22	1.45%
1.58	3300	1.58	3322.781	0.69%
1.649	3350	1.649	3333.499	0.50%
1.658	3400	1.658	3411.223	0.33%
1.736	3450	1.736	3491.249	1.20%
1.788	3500	1.788	3538.507	1.10%
1.988	3650	1.988	3651.795	0.05%
2.014	3700	2.014	3777.292	2.09%
2.127	3800	2.127	3830.436	0.80%
2.292	3900	2.292	3929.572	0.76%
2.439	4000	2.439	4024.443	0.61%
2.726	4200	2.726	4275.685	1.80%
2.969	4350	2.969	4350.502	0.01%
3.253	4500	3.253	4517.997	0.40%
3.472	4650	3.472	4696.539	1.00%
3.68	4750	3.68	4790.88	0.86%
3.906	4850	3.906	4873.207	0.48%
4.34	4950	4.34	4989.253	0.79%
4.548	5050	4.548	5038.779	0.22%
4.653	5100	4.653	5115.615	0.31%

5.104	5250	5.104	5287.252	0.71%
5.547	5350	5.547	5349.785	0.004%
6.042	5400	6.042	5421.995	0.41%
6.805	5500	6.805	5587.03	1.58%
7.951	5600	7.951	5688.161	1.57%
10.0269	5421.816	10.0269	5303.633	2.23%
			ERROR PROMEDIO (%)	0.76%

(Fuente: Autor)

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo del porcentaje de error utilizando las cargas máximas aplicadas en el ensayo real y en el ensayo simulado:

$$\text{Error} (\%) = \frac{\text{Carga máxima} - \text{Carga mínima}}{\text{Carga mínima}} * 100 \quad (4.2)$$

$$\text{Error} (\%) = \frac{5688.161 \text{ N} - 5600 \text{ N}}{5600 \text{ N}} * 100$$

$$\text{Error} (\%) = 1.57 \%$$

De la comparación de resultados se obtiene un error promedio de 0.76 %, el cual es un valor lo suficientemente bajo como para dar por válido el modelo de material utilizado en la simulación. La figura 4.20 muestra la comparación de las curvas de carga – flecha del ensayo real y simulado.

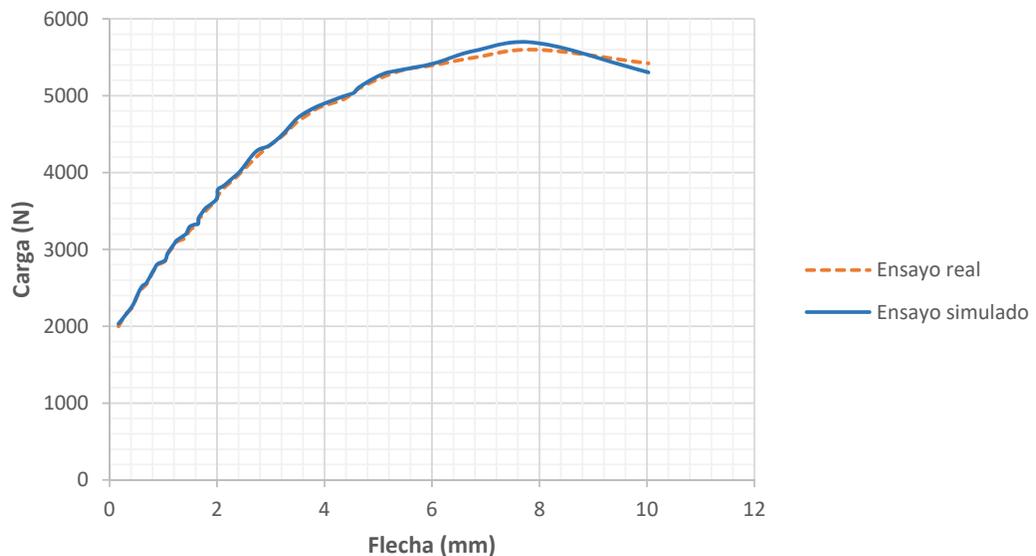


Figura 4. 20. Curvas carga – flecha del ensayo real y simulado. (Fuente: Autor)

4.2.2. Simulaciones de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad

Se ha analizado la resistencia de los anclajes de cinturones de seguridad de dos y tres puntos en la estructura de un asiento de autobús interprovincial mediante los parámetros de evaluación establecidos en los numerales 6.3 y 6.4 del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa (Anexo 3), el cual es referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

4.2.2.1. Simulación en un asiento con cinturones de seguridad de dos puntos

Para esta simulación se han utilizado bloques pélvicos normalizados que se emplean para aplicar fuerzas de tracción de 9308.612 N en cada uno de ellos durante un tiempo de 0.2 segundos; estas condiciones de ensayo se aplican específicamente para asientos de autobuses. La figura 4.21 muestra el modelo digital utilizado y las condiciones para la simulación.

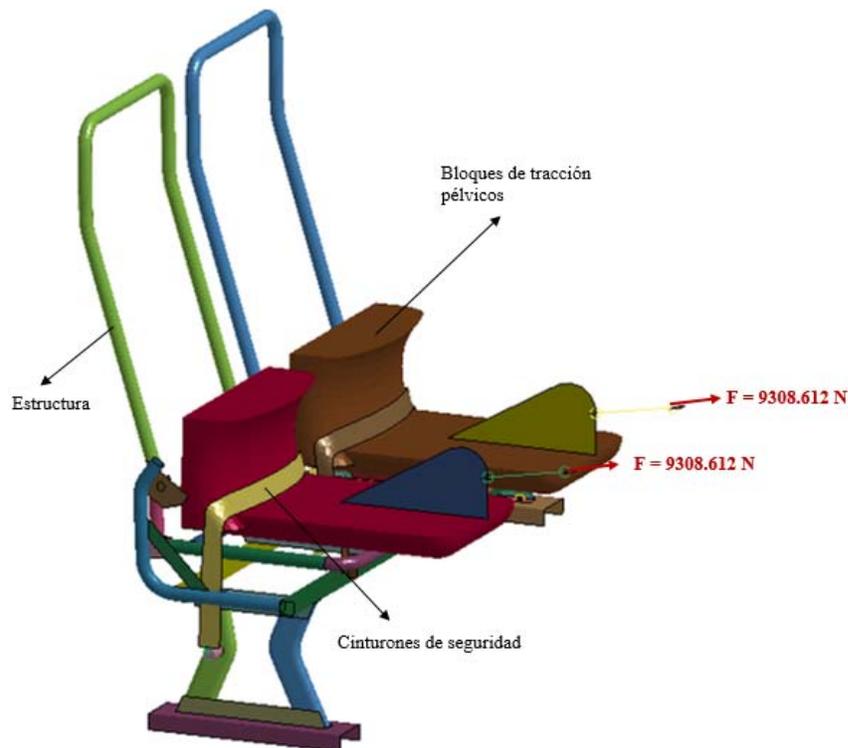


Figura 4. 21. Modelo y condiciones para la simulación. (Fuente: Autor)

4.2.2.1.1. Verificación de la calidad de la malla

El modelo fue mallado con *elementos cuadriláteros de tipo shell* en la estructura y bloques de tracción, mientras que en los cinturones de seguridad se utilizaron *elementos triangulares tipo shell*.

La malla está compuesta por 54310 elementos y 54094 nodos teniendo 52625 elementos cuadriláteros y 1685 elementos triangulares, la calidad de la malla se ha evaluado en base a la *relación de aspecto* de los elementos, teniendo una relación mínima de 1.32 y máxima de 7.03, los cuales son valores adecuados de calidad de malla en la que la mayoría de elementos se encuentran en los valores mínimos de relación de aspecto y muy pocos se encuentran en los valores máximos. A continuación se muestra la malla del modelo y su calidad:

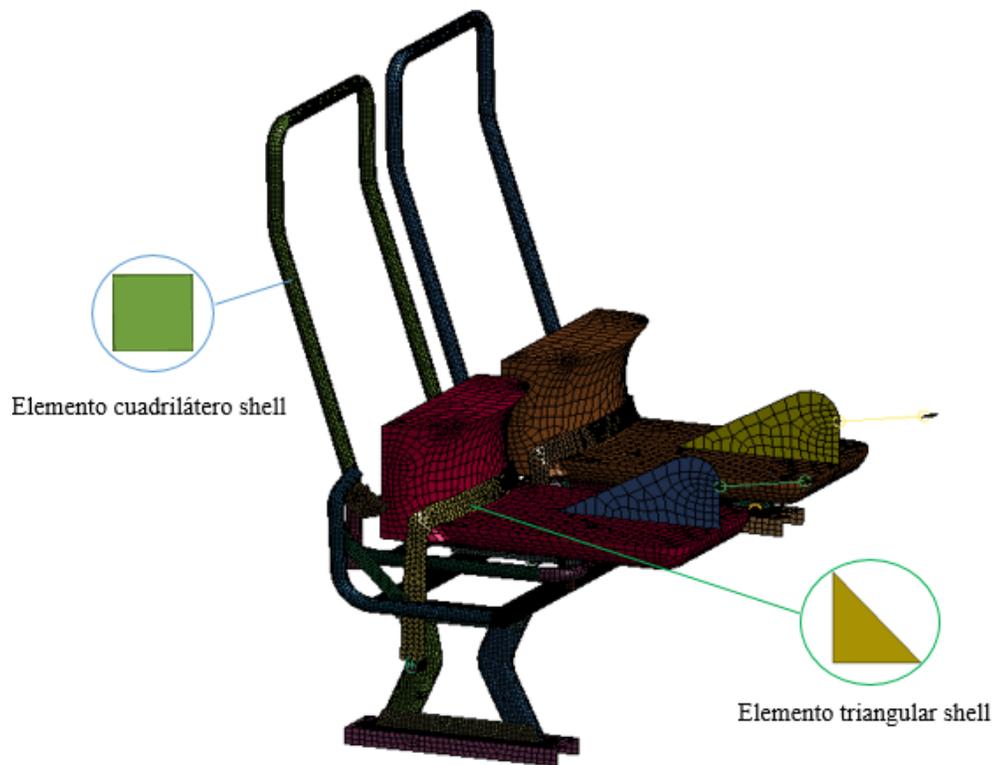


Figura 4. 22. Malla del modelo digital con elementos shell. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 33. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla

ELEMENTOS CUADRILÁTEROS		ELEMENTOS TRIANGULARES	
Relación de aspecto	Número de elementos	Relación de aspecto	Número de elementos
1,32	49984	1,32	1560
1,95	1940	1,95	54
2,59	668	2,59	13
3,22	22	3,22	2
3,86	7	3,86	6
4,49	1	4,49	4
5,13	3	5,13	29
5,76	0	5,76	14
6,4	0	6,4	2
7,03	0	7,03	1

(Fuente: Autor)

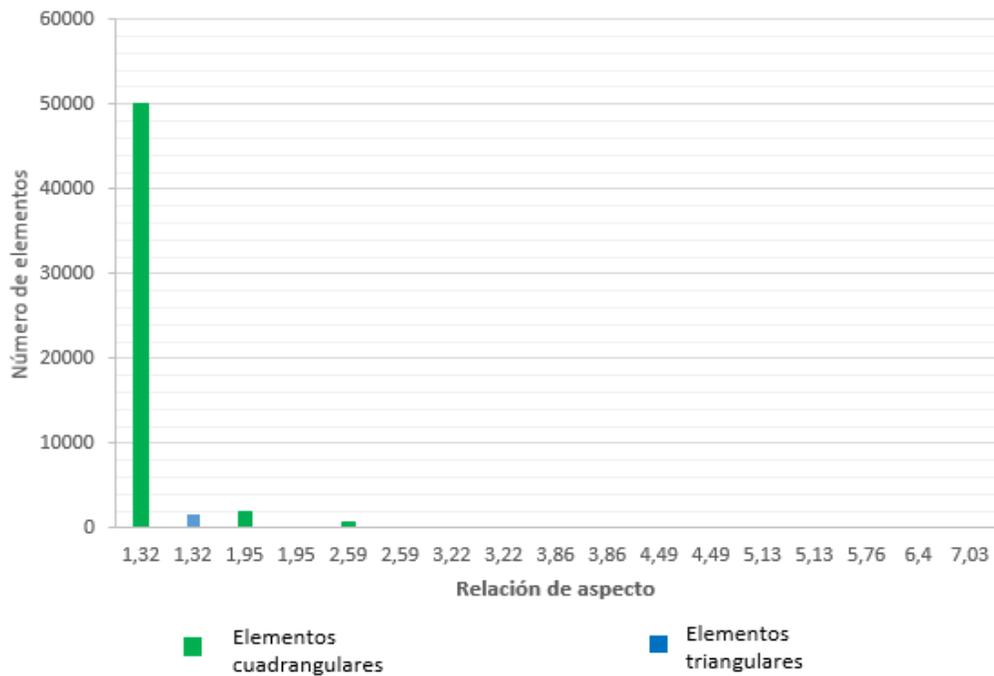
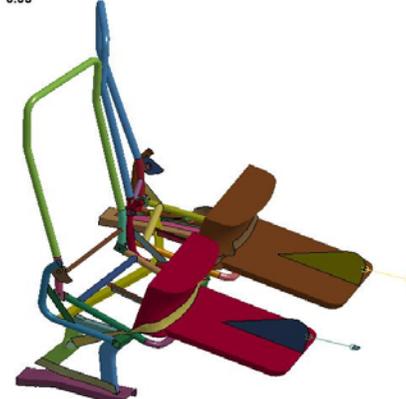
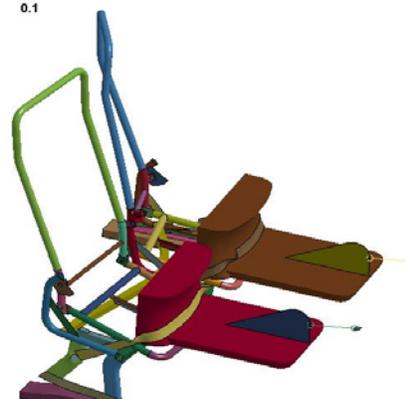
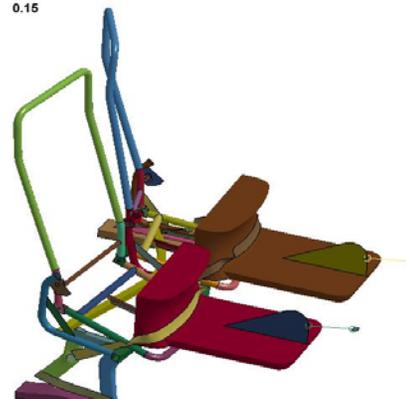


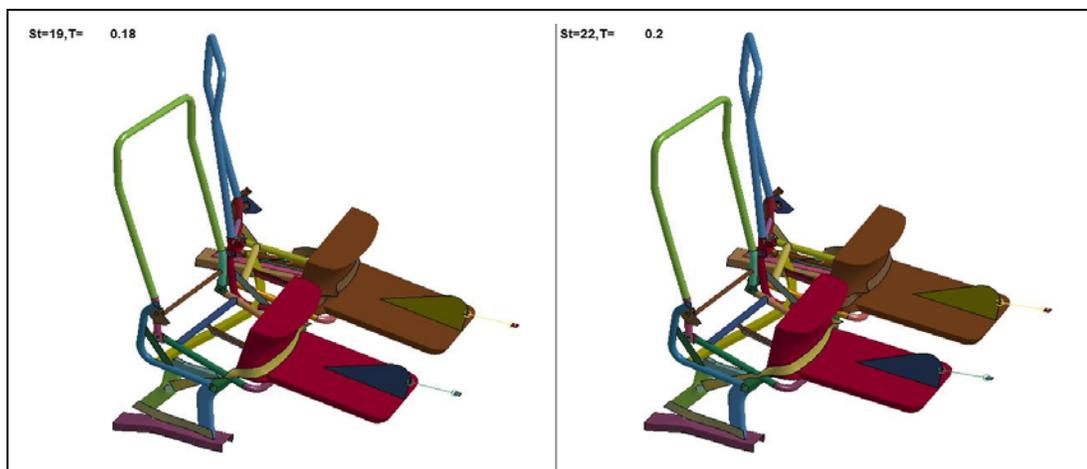
Figura 4. 23. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla. (Fuente: Autor)

4.2.2.1.2. Resultados de la simulación

La tabla 4.34 muestra los resultados obtenidos de la simulación del ensayo, para la cual se utilizaron los modelos de materiales y condiciones descritas en las secciones 3.5.6 y 3.5.7 respectivamente.

Tabla 4. 34. Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un asiento con cinturones de dos puntos

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
SIMULACIÓN DE ENSAYO DE RESISTENCIA DE ANCLAJES DE CINTURONES DE SEGURIDAD			
Normas aplicables:	NTE INEN 2704 con referencia al Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa		
Fecha de Ejecución:	17/10/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Relación de aspecto mínima:	1.32	Relación de aspecto máxima:	7.03
Número de elementos:	54310	Número de nodos:	54094
Tiempo de procesamiento:	32 horas 25 minutos	Número de procesadores:	8
Tipo de cinturón de seguridad:	Cinturón con dos puntos de anclaje		
Tiempo de aplicación de la carga:	0.2 segundos		
RESULTADO DEL ENSAYO			
<p>St=1, T= 0</p> 		<p>St=6, T= 0.05</p> 	
<p>St=11, T= 0.1</p> 		<p>St=16, T= 0.15</p> 	



(Fuente: Autor)

Una vez realizada la simulación, se han analizado los resultados más importantes obtenidos, siendo éstos los esfuerzos en las zonas donde sería más probable que se produzcan roturas, tales zonas son las uniones entre los puntos de anclaje y la estructura del asiento, también se han analizado los desplazamientos y deformaciones plásticas efectivas (Anexo 10). A continuación se muestran los resultados obtenidos:

a) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior izquierdo

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 10725, 10726, 10727, 10719 y 10732, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.24, 4.26 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.25, 4.27 y las tablas 4.35, 4.36 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

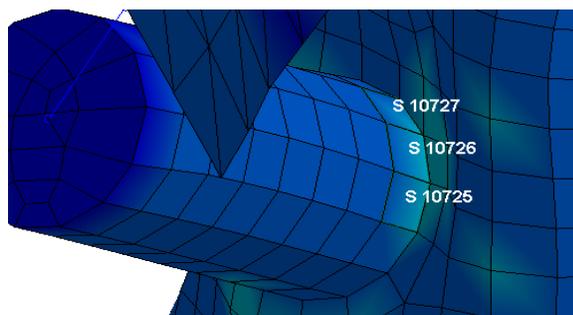


Figura 4. 24. Ubicación de los elementos N° 10725, 10726 y 10727. (Fuente: Autor)

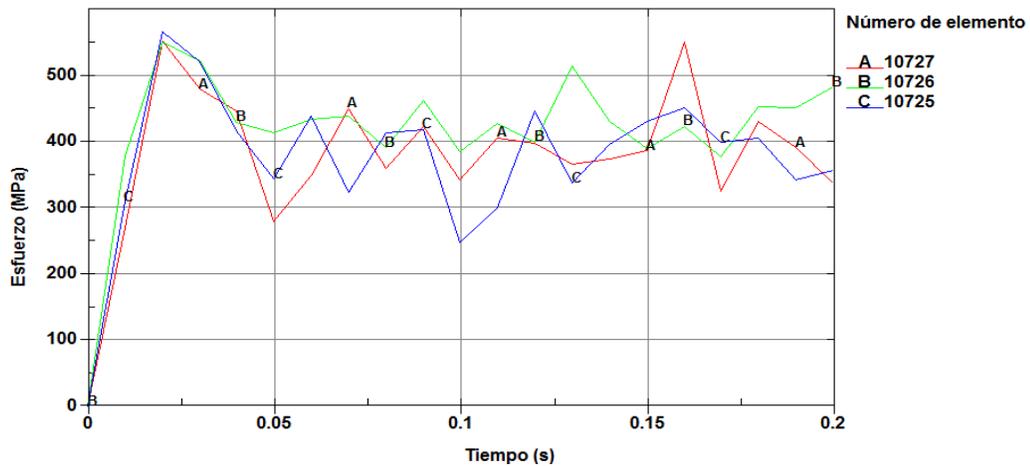


Figura 4. 25. Esfuerzos en los elementos N° 10725, 10726 y 10727. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 35. Esfuerzos en los elementos N° 10725, 10726 y 10727

ELEMENTO N° 10725		ELEMENTO N° 10726		ELEMENTO N° 10727	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	309,042	0,010	378,250	0,010	270,165
0,020	567,054	0,020	550,660	0,020	552,095
0,030	520,769	0,030	522,819	0,030	479,572
0,040	416,633	0,040	429,702	0,040	447,032
0,050	343,730	0,050	413,786	0,050	279,697
0,060	438,180	0,060	434,026	0,060	348,790
0,070	323,576	0,070	439,641	0,070	450,140
0,080	414,322	0,080	391,414	0,080	360,099
0,090	418,554	0,090	462,185	0,090	423,416
0,100	248,148	0,100	385,793	0,100	342,254
0,110	299,599	0,110	428,284	0,110	406,210
0,120	447,024	0,120	400,118	0,120	398,127
0,130	337,865	0,130	514,682	0,130	366,429
0,140	395,851	0,140	430,703	0,140	374,834
0,150	431,236	0,150	390,224	0,150	386,770
0,160	450,908	0,160	423,912	0,160	550,358
0,170	399,328	0,170	377,429	0,170	324,802
0,180	405,148	0,180	453,799	0,180	431,759
0,190	342,889	0,190	451,258	0,190	391,331
0,200	357,216	0,200	482,800	0,200	337,765

(Fuente: Autor)

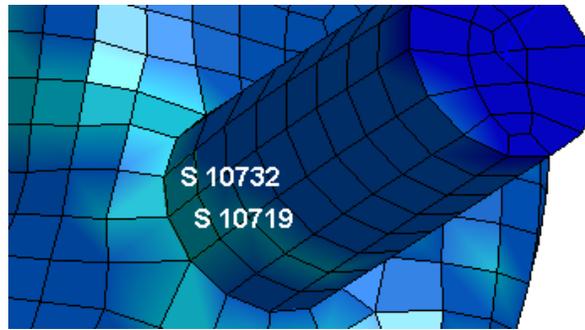


Figura 4. 26. Ubicación de los elementos N° 10719 y 10732. (Fuente: Autor)

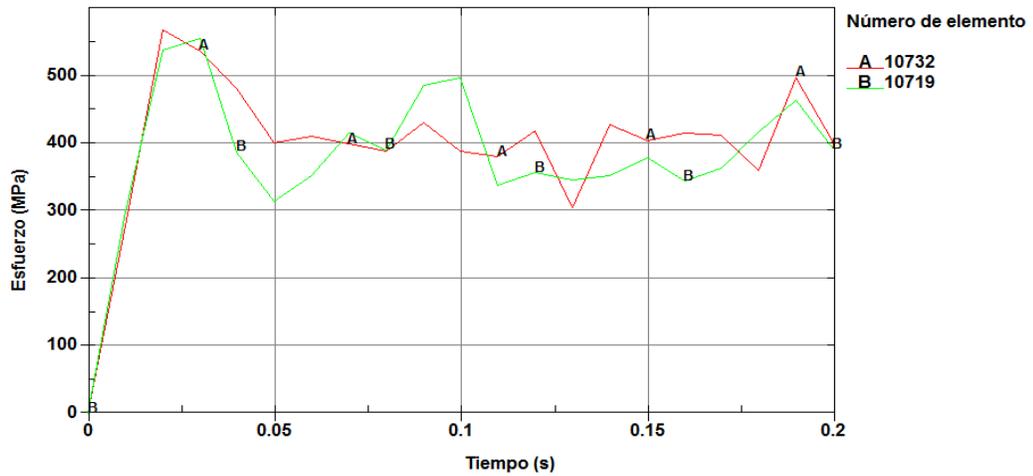


Figura 4. 27. Esfuerzos en los elementos N° 10719 y 10732. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 36. Esfuerzos en los elementos N° 10719 y 10732

ELEMENTO N° 10719		ELEMENTO N° 10732	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	298,586	0,010	277,709
0,020	537,961	0,020	567,967
0,030	555,228	0,030	536,957
0,040	387,254	0,040	481,349
0,050	313,942	0,050	400,584
0,060	352,725	0,060	410,184
0,070	415,101	0,070	399,269
0,080	390,233	0,080	388,660
0,090	486,905	0,090	430,607
0,100	497,422	0,100	388,934
0,110	338,599	0,110	379,871

0,120	356,093	0,120	418,900
0,130	346,205	0,130	304,869
0,140	352,469	0,140	428,451
0,150	379,418	0,150	404,507
0,160	343,834	0,160	415,881
0,170	362,675	0,170	412,583
0,180	417,591	0,180	359,746
0,190	463,851	0,190	497,958
0,200	391,381	0,200	401,607

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 10732, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

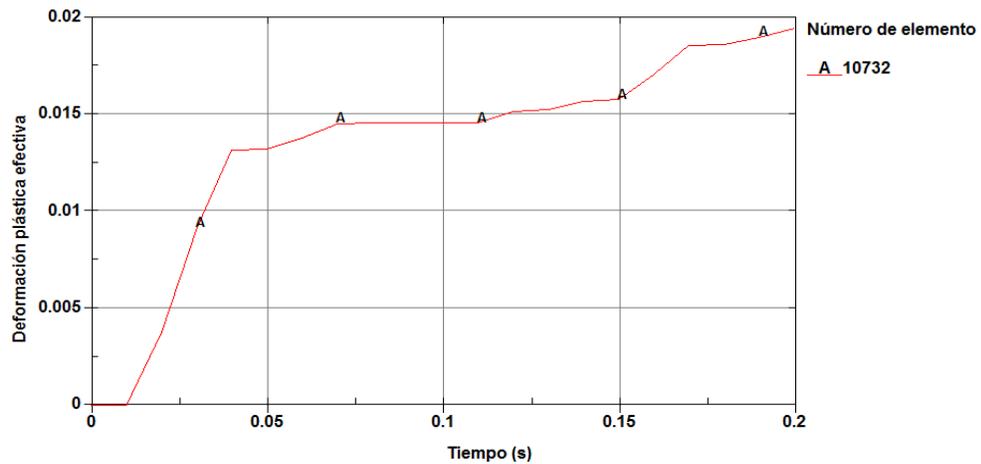


Figura 4. 28. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 10732. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 37. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 10732

ELEMENTO N° 10732	
Tiempo (s)	Deformación plástica efectiva
0,000	0,000
0,010	0,000
0,020	0,004
0,030	0,009
0,040	0,013
0,050	0,013
0,060	0,014
0,070	0,015

0,080	0,015
0,090	0,015
0,100	0,015
0,110	0,015
0,120	0,015
0,130	0,015
0,140	0,016
0,150	0,016
0,160	0,017
0,170	0,019
0,180	0,019
0,190	0,019
0,200	0,019

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 10732, su valor es de 567.967 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0.019, por lo que este anclaje no es capaz de soportar el ensayo de resistencia debido a que los esfuerzos que se producen en la región de contacto con la estructura superan considerablemente el esfuerzo máximo del material que es 383.6425 MPa, a pesar de que la deformación plástica efectiva máxima sea menor que la del material cuyo valor es de 0.37.

b) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior medio

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos 44198, 44296 y 44315, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, la figura 4.29, muestra la ubicación de los elementos analizados, mientras que la figura 4.30 y la tabla 4.38 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

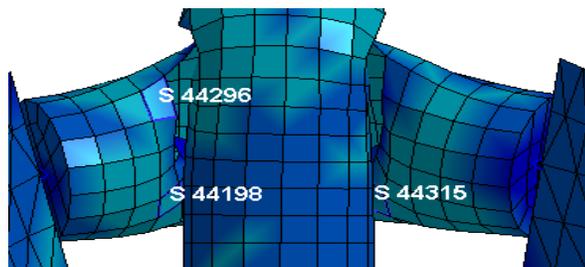


Figura 4. 29. Ubicación de los elementos N° 44198, 44296 y 44315. (Fuente: Autor)

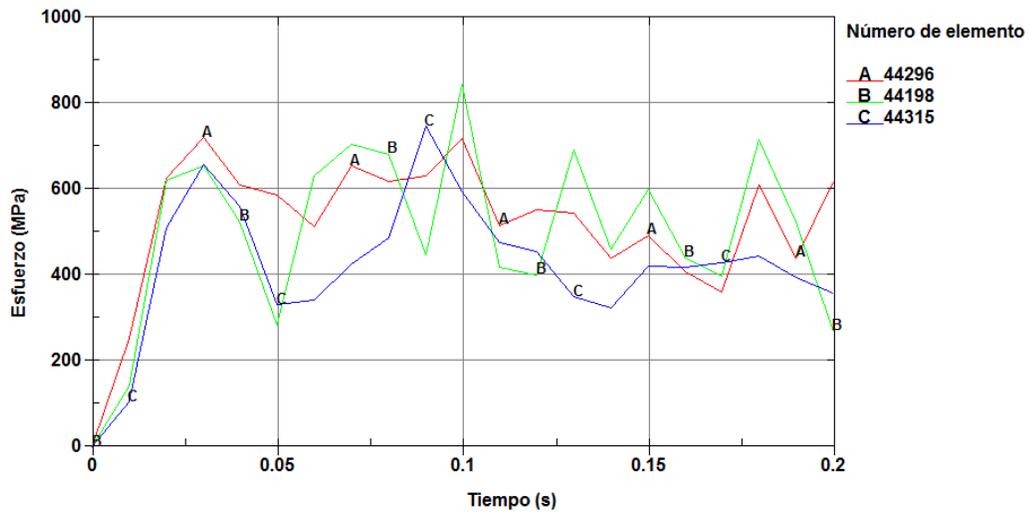


Figura 4. 30. Esfuerzos en los elementos N° 44198, 44296 y 44315. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 38. Esfuerzos en los elementos N° 44198, 44296 y 44315

ELEMENTO N° 44198		ELEMENTO N° 44296		ELEMENTO N° 44315	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	140,878	0,010	252,533	0,010	104,871
0,020	620,046	0,020	625,872	0,020	511,254
0,030	655,352	0,030	720,950	0,030	658,531
0,040	524,175	0,040	609,257	0,040	561,181
0,050	285,359	0,050	587,609	0,050	330,318
0,060	630,593	0,060	514,425	0,060	342,892
0,070	704,750	0,070	654,011	0,070	426,978
0,080	681,957	0,080	617,586	0,080	486,418
0,090	446,673	0,090	630,689	0,090	746,443
0,100	843,557	0,100	718,676	0,100	593,888
0,110	418,744	0,110	516,096	0,110	476,499
0,120	401,164	0,120	553,551	0,120	455,939
0,130	691,952	0,130	545,009	0,130	348,951
0,140	461,385	0,140	439,919	0,140	323,200
0,150	600,002	0,150	492,850	0,150	420,406
0,160	440,033	0,160	407,070	0,160	419,193
0,170	397,200	0,170	360,602	0,170	429,669
0,180	716,975	0,180	609,424	0,180	444,223
0,190	523,294	0,190	440,291	0,190	395,255
0,200	268,650	0,200	619,496	0,200	357,464

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 44198, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

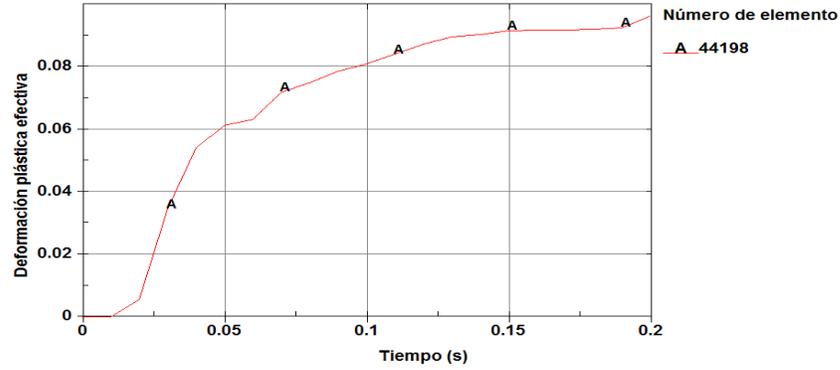


Figura 4. 31. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 44198. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 39. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 44198

ELEMENTO N° 44198	
Tiempo (s)	Deformación plástica efectiva
0,000	0,000
0,010	0,000
0,020	0,005
0,030	0,035
0,040	0,054
0,050	0,061
0,060	0,063
0,070	0,072
0,080	0,075
0,090	0,079
0,100	0,081
0,110	0,084
0,120	0,087
0,130	0,090
0,140	0,090
0,150	0,092
0,160	0,092
0,170	0,092
0,180	0,092
0,190	0,093
0,200	0,096

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 44198, su valor es de 843.557 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0.096, por lo que este anclaje no es capaz de soportar el ensayo de resistencia debido a que los esfuerzos que se producen en la región de contacto con la estructura superan considerablemente el esfuerzo máximo del material que es 383.6425 MPa, a pesar de que la deformación plástica efectiva máxima sea menor que la del material cuyo valor es de 0.37.

c) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior derecho

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos 25262, 25263 y 25283, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, la figura 4.32, muestra la ubicación de los elementos analizados, mientras que la figura 4.33 y la tabla 4.40 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

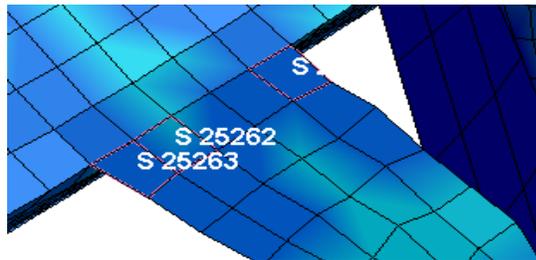


Figura 4. 32. Ubicación de los elementos N° 25262, 25263 y 25283. (Fuente: Autor)

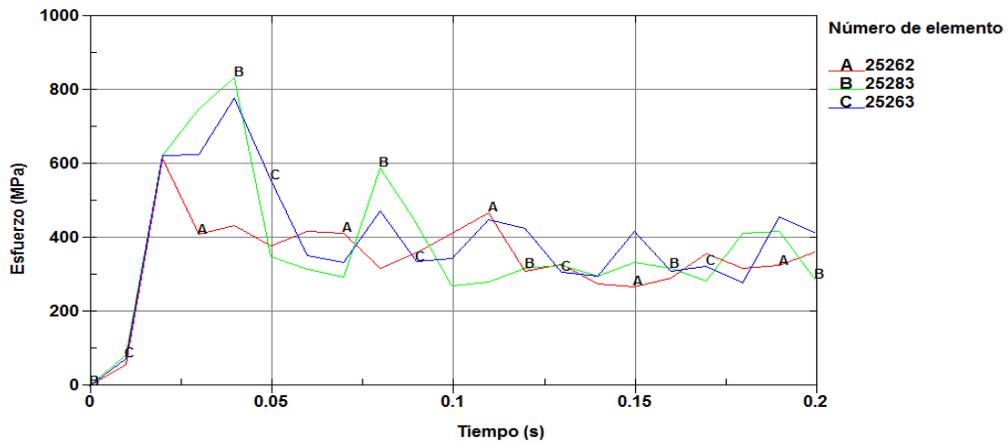


Figura 4. 33. Esfuerzos en los elementos N° 25262, 25263 y 25283. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 40. Esfuerzos en los elementos N° 25262, 25263 y 25283

ELEMENTO N° 25262		ELEMENTO N° 25263		ELEMENTO N° 25283	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	58,429	0,010	74,116	0,010	84,914
0,020	615,653	0,020	622,673	0,020	622,806
0,030	409,737	0,030	626,893	0,030	751,005
0,040	434,834	0,040	777,979	0,040	834,507
0,050	380,165	0,050	557,776	0,050	349,796
0,060	418,703	0,060	351,984	0,060	315,438
0,070	414,113	0,070	334,678	0,070	293,763
0,080	319,661	0,080	474,681	0,080	590,710
0,090	359,376	0,090	336,016	0,090	438,573
0,100	412,503	0,100	345,177	0,100	271,384
0,110	468,538	0,110	449,132	0,110	280,479
0,120	311,799	0,120	426,905	0,120	317,471
0,130	327,864	0,130	309,197	0,130	326,824
0,140	276,748	0,140	296,968	0,140	298,291
0,150	269,051	0,150	419,561	0,150	332,908
0,160	292,741	0,160	311,439	0,160	317,179
0,170	356,895	0,170	324,469	0,170	283,384
0,180	319,612	0,180	280,016	0,180	412,361
0,190	325,221	0,190	458,263	0,190	418,905
0,200	363,121	0,200	412,454	0,200	286,871

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 25283, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

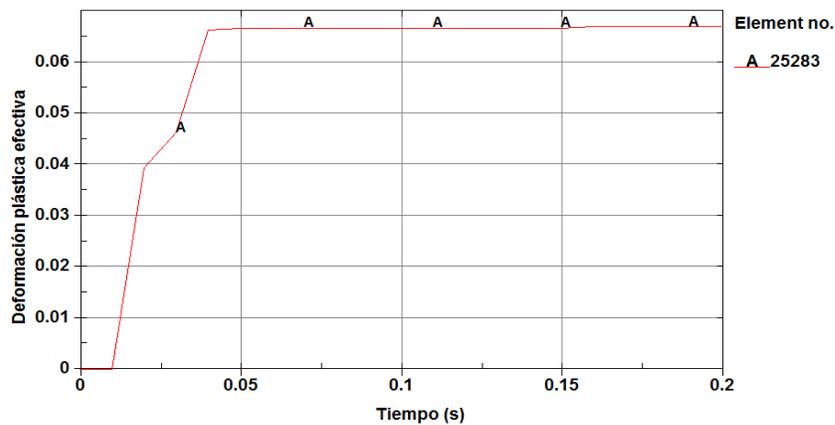


Figura 4. 34. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 25283. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 41. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 25283

ELEMENTO N° 25283	
Tiempo (s)	Deformación plástica efectiva
0,000	0,000
0,010	0,000
0,020	0,039
0,030	0,046
0,040	0,066
0,050	0,067
0,060	0,067
0,070	0,067
0,080	0,067
0,090	0,067
0,100	0,067
0,110	0,067
0,120	0,067
0,130	0,067
0,140	0,067
0,150	0,067
0,160	0,067
0,170	0,067
0,180	0,067
0,190	0,067
0,200	0,067

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 25283, su valor es de 834.507 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0.067, por lo que este anclaje no es capaz de soportar el ensayo de resistencia debido a que los esfuerzos que se producen en la región de contacto con la estructura superan considerablemente el esfuerzo máximo del material que es 511.980 MPa, a pesar de que la deformación plástica efectiva sea menor que la del material cuyo valor es de 0.283.

d) Deformaciones plásticas efectivas y desplazamientos en la estructura

La estructura presenta un comportamiento poco satisfactorio durante el ensayo de resistencia, ya que además de que los anclajes para cinturones de seguridad

no son capaces de soportar las cargas aplicadas la estructura en general sufre deformaciones excesivas que pueden causar la rotura de ciertos elementos en ella y sobre todo comprometer la seguridad de los ocupantes, tal es así que se tiene una deformación plástica efectiva máxima de 0.616 que supera por mucho los límites máximos de los materiales, los cuales son 0.37 y 0.283 para los aceros ASTM A500 grado A y ASTM A36 respectivamente; además se puede evidenciar claramente la deformación excesiva producida en la estructura debido a que se tiene un desplazamiento total máximo en la base de la estructura de 406.146 mm. Las figuras 4.35 y 4.36 muestran estos resultados.

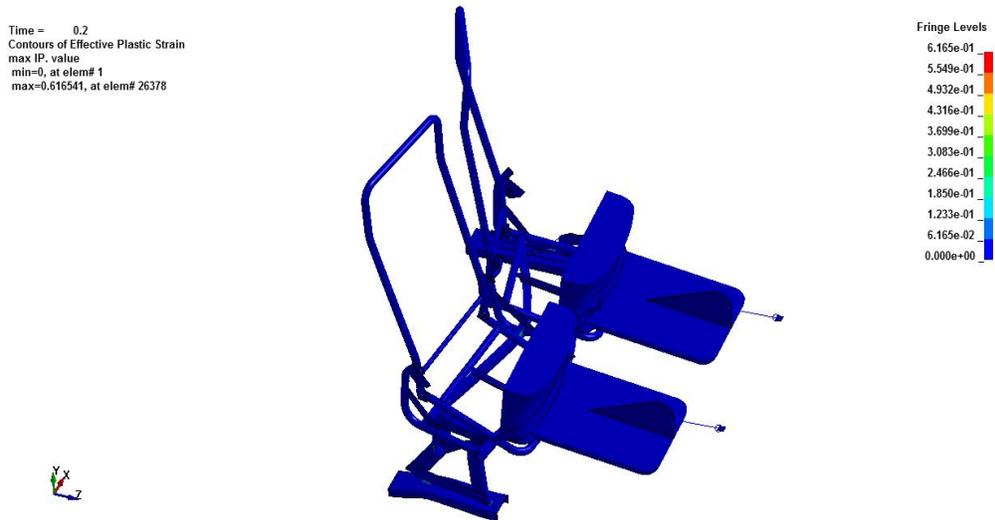


Figura 4. 35. Deformación plástica efectiva máxima en la estructura. (Fuente: Autor)

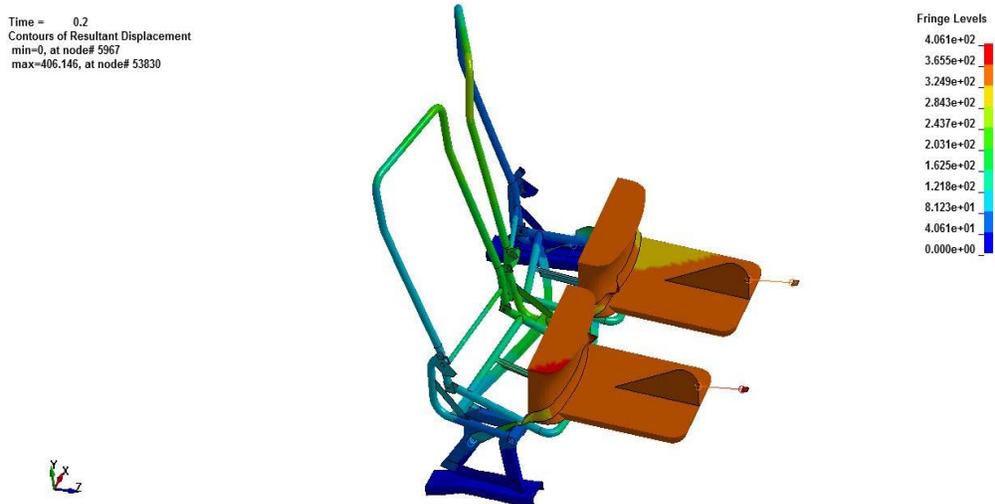


Figura 4. 36. Desplazamiento total máximo en la estructura. (Fuente: Autor)

Un parámetro importante que se ha considerado para evaluar la validez de la simulación al ser dinámica explícita es la relación entre la energía interna del sistema y la energía de Hourglass, la cual no debe superar el 10% de la energía interna.

En este caso la relación se cumple satisfactoriamente ya que la máxima relación de energías en esta simulación es de 1.28 %. La figura 4.37 muestra las curvas de energía y la tabla 4.42 muestra sus valores respectivos.

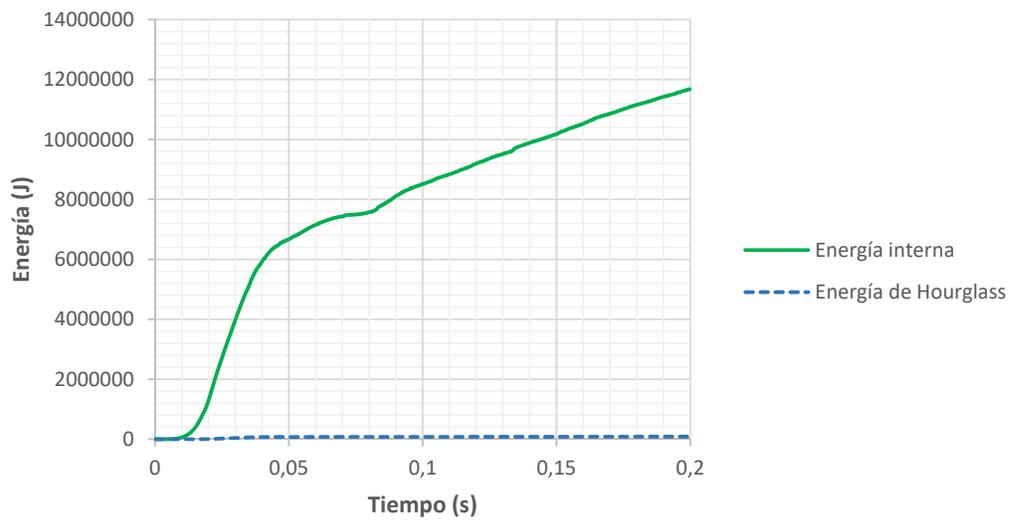


Figura 4. 37. Relación de energías de la simulación. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 42. Energías de la simulación

ENERGÍA INTERNA		ENERGÍA DE HOURGLASS		RELACIÓN DE ENERGÍAS
Tiempo (s)	Energía (J)	Tiempo (s)	Energía (J)	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%
0,010	52894,600	0,010	7,447	0,01%
0,020	1185800,000	0,020	5917,150	0,50%
0,030	3884390,000	0,030	41401,000	1,07%
0,040	5874840,000	0,040	74920,200	1,28%
0,050	6659020,000	0,050	76624,200	1,15%
0,060	7136130,000	0,060	78297,000	1,10%
0,070	7429120,000	0,070	81568,900	1,10%
0,080	7565070,000	0,080	79874,400	1,06%
0,090	8078070,000	0,090	80834,500	1,00%

0,100	8503060,000	0,100	80344,000	0,94%
0,110	8828460,000	0,110	80278,100	0,91%
0,120	9176270,000	0,120	83113,100	0,91%
0,130	9503840,000	0,130	83097,400	0,87%
0,140	9875690,000	0,140	83235,600	0,84%
0,150	10166900,000	0,150	84415,100	0,83%
0,160	10513000,000	0,160	84788,000	0,81%
0,170	10853700,000	0,170	85766,000	0,79%
0,180	11150000,000	0,180	87355,600	0,78%
0,190	11413900,000	0,190	88437,700	0,77%
0,200	11680500,000	0,200	88622,800	0,76%

(Fuente: Autor)

4.2.2.2. Simulación en un asiento con cinturones de seguridad de tres puntos

Para esta simulación se han utilizado bloques pélvicos y torácicos normalizados que se emplean para aplicar fuerzas de tracción de 6408.612 N en los bloques pélvicos y 4500 N en los bloques torácicos durante un tiempo de 0.2 segundos; estas condiciones de ensayo se aplican específicamente para asientos de autobuses. La figura 4.38 muestra el modelo digital utilizado y las condiciones para la simulación.

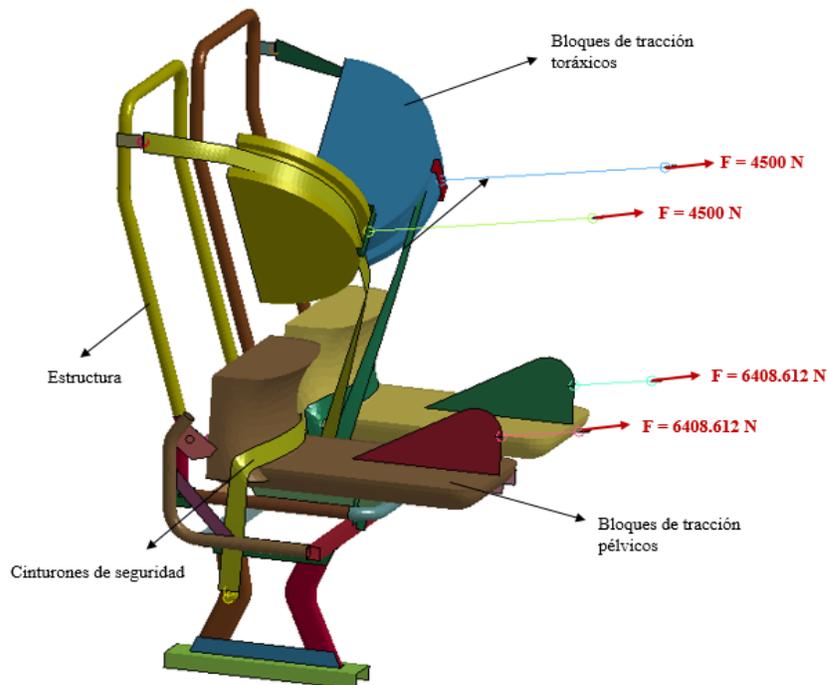


Figura 4. 38. Modelo y condiciones para la simulación. (Fuente: Autor)

4.2.2.2.1. Verificación de la calidad de la malla

El modelo fue mallado con *elementos cuadriláteros de tipo shell* en la estructura y bloques de tracción, mientras que en los cinturones de seguridad se utilizaron *elementos triangulares tipo shell*.

La malla está compuesta por 60146 elementos y 59231 nodos teniendo 56366 elementos cuadriláteros y 3780 elementos triangulares, la calidad de la malla se ha evaluado en base a la *relación de aspecto* de los elementos, teniendo una relación mínima de 1.32 y máxima de 7.03, los cuales son valores adecuados de calidad de malla en la que la mayoría de elementos se encuentran en los valores mínimos de relación de aspecto y muy pocos se encuentran en los valores máximos. A continuación se muestra la malla del modelo y su calidad:

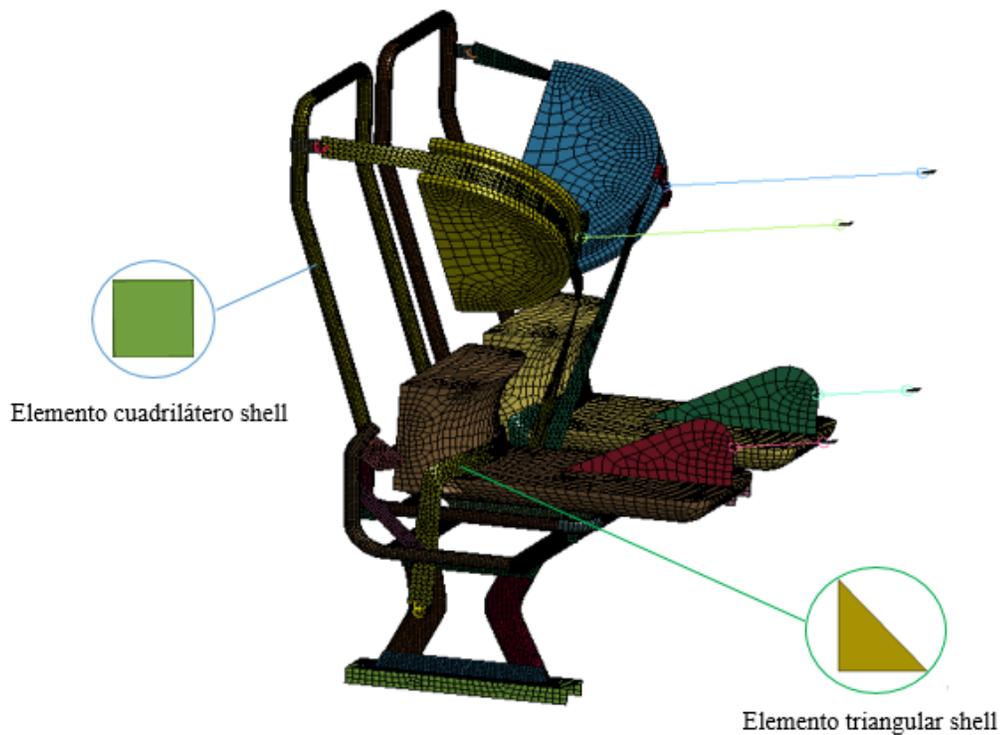


Figura 4. 39. Malla del modelo digital con elementos shell. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 43. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla

ELEMENTOS CUADRILÁTEROS		ELEMENTOS TRIANGULARES	
Relación de aspecto	Número de elementos	Relación de aspecto	Número de elementos
1,32	54300	1,32	3600
1,95	1800	1,95	111
2,59	230	2,59	11
3,22	25	3,22	2
3,86	7	3,86	6
4,49	1	4,49	4
5,13	3	5,13	29
5,76	0	5,76	14
6,4	0	6,4	2
7,03	0	7,03	1

(Fuente: Autor)

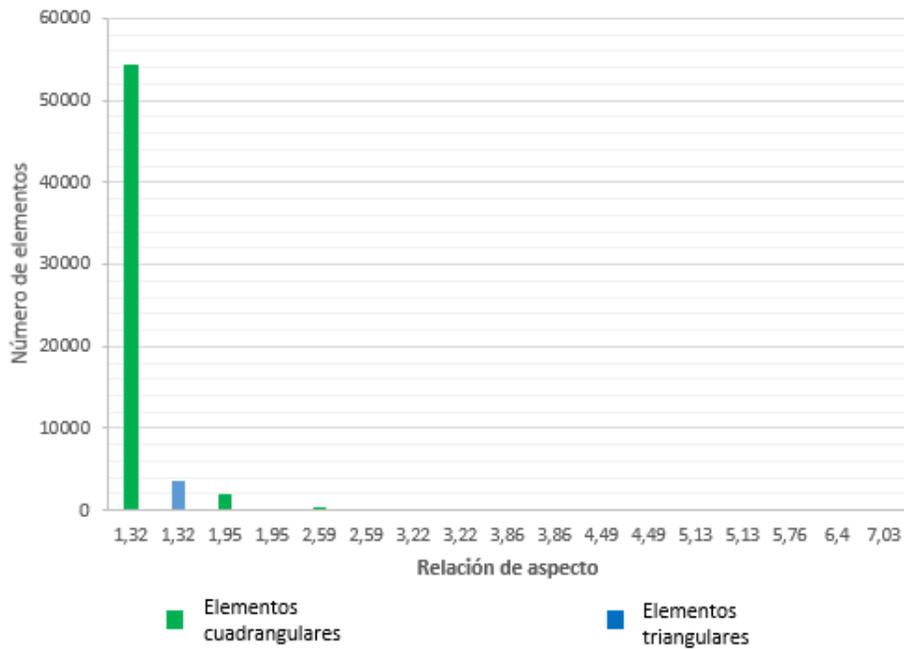
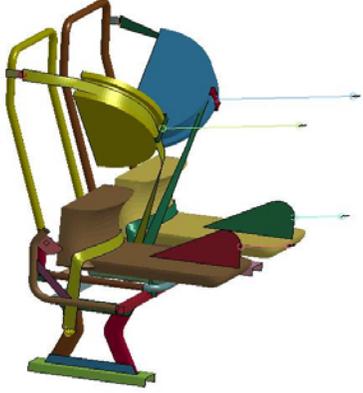
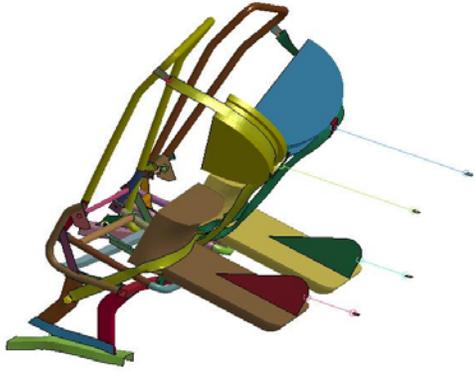
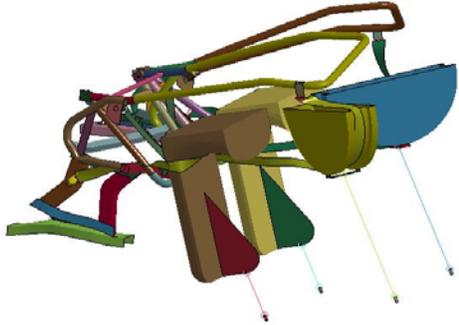
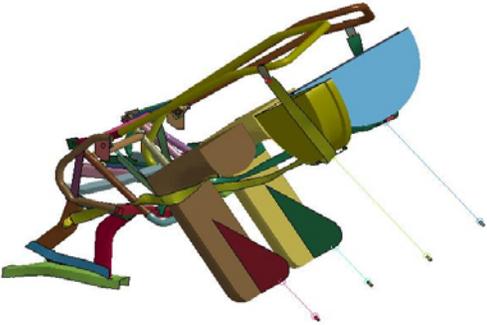


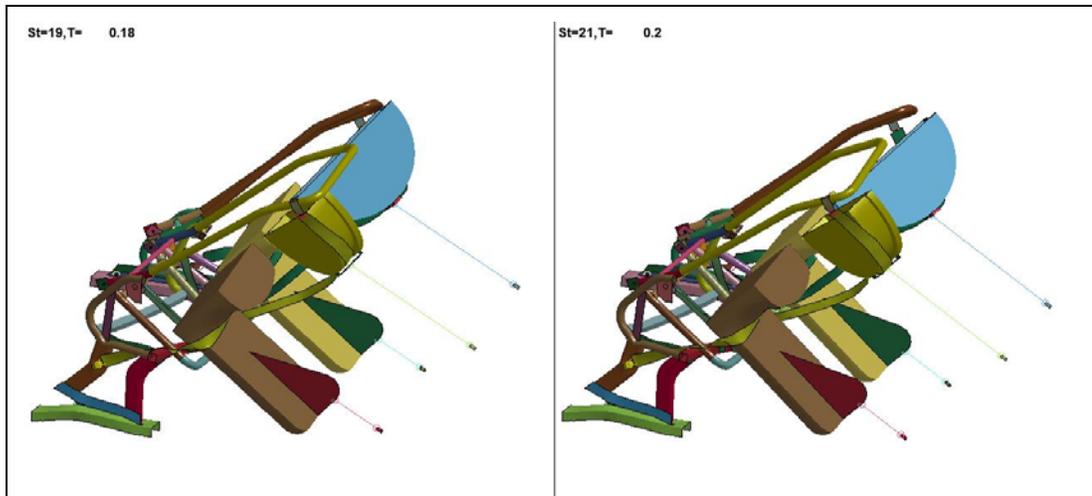
Figura 4. 40. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla. (Fuente: Autor)

4.2.2.2.2. Resultados de la simulación

La tabla 4.44 muestra los resultados obtenidos de la simulación del ensayo, para la cual se utilizaron los modelos de materiales y condiciones descritas en las secciones 3.5.6 y 3.5.7 respectivamente.

Tabla 4. 44. Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un asiento con cinturones de tres puntos

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
SIMULACIÓN DE ENSAYO DE RESISTENCIA DE ANCLAJES DE CINTURONES DE SEGURIDAD			
Normas aplicables:	NTE INEN 2704 con referencia al Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa		
Fecha de Ejecución:	17/10/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Relación de aspecto mínima:	1.32	Relación de aspecto máxima:	7.03
Número de elementos:	60146	Número de nodos:	59231
Tiempo de procesamiento:	29 horas 13 minutos	Número de procesadores:	8
Tipo de cinturón de seguridad:	Cinturón con tres puntos de anclaje		
Tiempo de aplicación de la carga:	0.2 segundos		
RESULTADO DEL ENSAYO			
<p>St=1,T= 0</p> 		<p>St=6,T= 0.05</p> 	
<p>St=11,T= 0.1</p> 		<p>St=16,T= 0.15</p> 	



(Fuente: Autor)

Una vez realizada la simulación, se han analizado los resultados más importantes obtenidos, siendo éstos los esfuerzos en las zonas donde sería más probable que se produzcan roturas, tales zonas son las uniones entre los puntos de anclaje y la estructura del asiento, también se han analizado los desplazamientos y deformaciones plásticas efectivas (Anexo 11). A continuación se muestran los resultados obtenidos:

a) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior izquierdo

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 14248, 14249, 14250, 14255 y 14256, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.41, 4.43 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.42, 4.44 y las tablas 4.45, 4.46 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

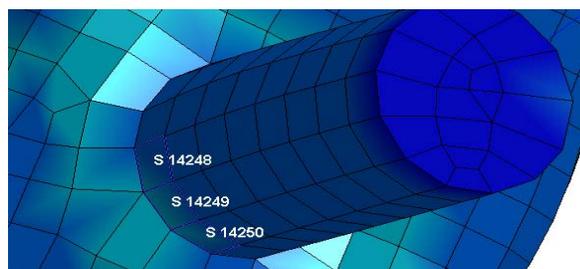


Figura 4. 41. Ubicación de los elementos N° 14248, 14249 y 14250. (Fuente: Autor)

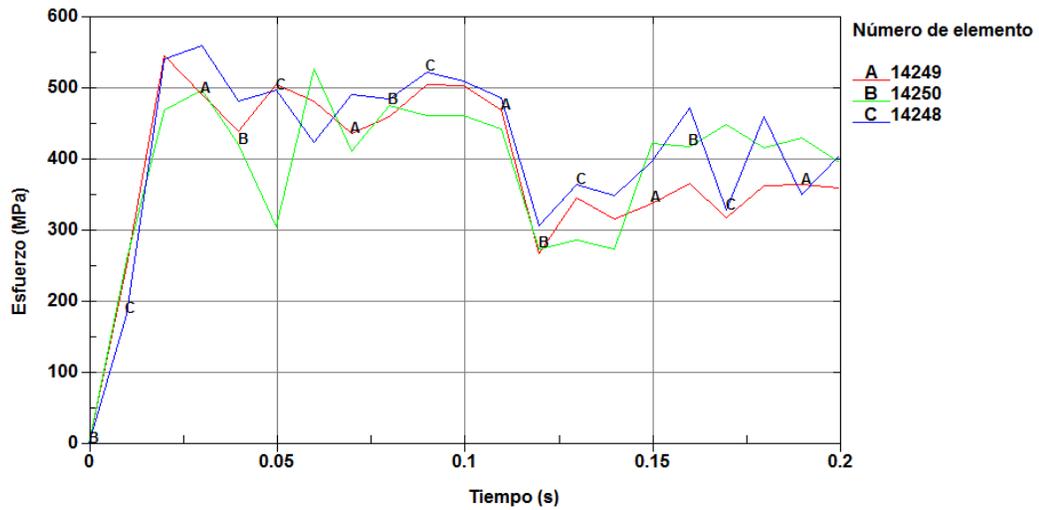


Figura 4. 42. Esfuerzos en los elementos N° 14248, 14249 y 14250. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 45. Esfuerzos en los elementos N° 14248, 14249 y 14250

ELEMENTO N° 14248		ELEMENTO N° 14249		ELEMENTO N° 14250	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	181,402	0,010	250,342	0,010	257,899
0,020	540,447	0,020	545,769	0,020	468,631
0,030	559,520	0,030	491,185	0,030	496,708
0,040	481,265	0,040	439,657	0,040	419,936
0,050	496,872	0,050	504,767	0,050	304,094
0,060	424,043	0,060	481,743	0,060	526,353
0,070	491,053	0,070	435,820	0,070	411,029
0,080	484,505	0,080	459,238	0,080	475,192
0,090	522,204	0,090	505,412	0,090	460,847
0,100	509,518	0,100	502,703	0,100	460,174
0,110	486,073	0,110	468,156	0,110	442,873
0,120	305,922	0,120	266,704	0,120	273,738
0,130	364,045	0,130	345,634	0,130	286,636
0,140	347,883	0,140	316,074	0,140	274,172
0,150	396,674	0,150	337,972	0,150	422,373
0,160	471,281	0,160	366,245	0,160	417,533
0,170	327,618	0,170	317,015	0,170	447,961
0,180	459,878	0,180	363,128	0,180	415,271
0,190	349,990	0,190	363,702	0,190	429,173
0,200	404,249	0,200	359,179	0,200	395,288

(Fuente: Autor)

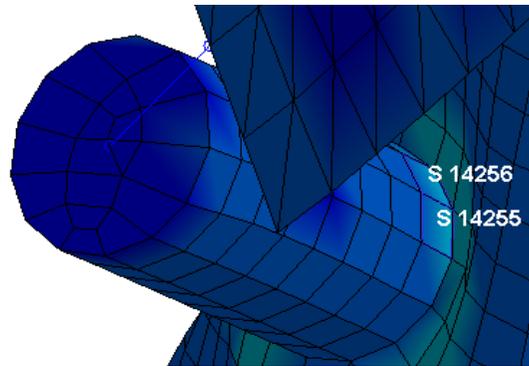


Figura 4. 43. Ubicación de los elementos N° 14255 y 14256. (Fuente: Autor)

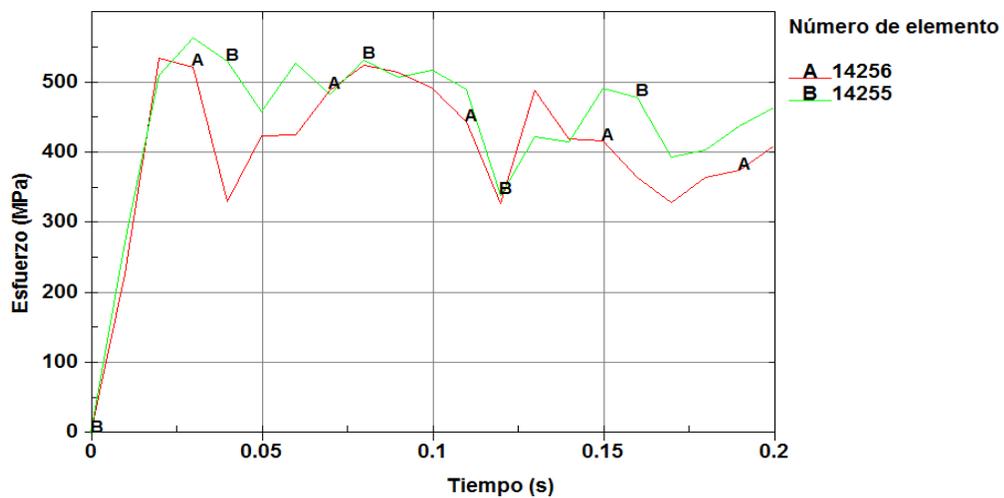


Figura 4. 44. Esfuerzos en los elementos N° 14255 y 14256. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 46. Esfuerzos en los elementos N° 14255 y 14256

ELEMENTO N° 14255		ELEMENTO N° 14256	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	272,932	0,010	226,999
0,020	510,602	0,020	535,758
0,030	563,643	0,030	522,665
0,040	530,740	0,040	330,923
0,050	458,945	0,050	423,745
0,060	528,270	0,060	424,790
0,070	483,818	0,070	489,480
0,080	532,687	0,080	524,338
0,090	507,120	0,090	514,239
0,100	517,580	0,100	491,821

0,110	489,724	0,110	444,175
0,120	339,212	0,120	327,389
0,130	422,475	0,130	488,889
0,140	415,812	0,140	419,384
0,150	492,299	0,150	416,213
0,160	479,253	0,160	364,968
0,170	393,119	0,170	328,618
0,180	403,749	0,180	364,798
0,190	439,014	0,190	374,490
0,200	464,842	0,200	410,046

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 14255, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

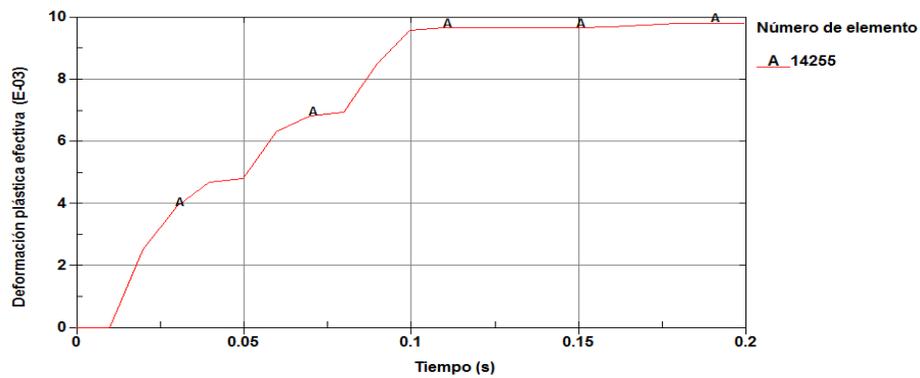


Figura 4. 45. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 14255. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 47. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 14255

ELEMENTO N° 14255	
Tiempo (s)	Deformación plástica efectiva
0,000	0,000
0,010	0,000
0,020	0,003
0,030	0,004
0,040	0,005
0,050	0,005
0,060	0,006
0,070	0,007
0,080	0,007
0,090	0,008

0,100	0,010
0,110	0,010
0,120	0,010
0,130	0,010
0,140	0,010
0,150	0,010
0,160	0,010
0,170	0,010
0,180	0,010
0,190	0,010
0,200	0,010

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 14255, su valor es de 563.643 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0.010, por lo que este anclaje no es capaz de soportar el ensayo de resistencia debido a que los esfuerzos que se producen en la región de contacto con la estructura superan considerablemente el esfuerzo máximo del material que es 383.6425 MPa, a pesar de que la deformación plástica efectiva máxima sea menor que la del material cuyo valor es de 0.37.

b) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior medio

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos 47908, 48004 y 48007, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, la figura 4.46, muestra la ubicación de los elementos analizados, mientras que la figura 4.47 y la tabla 4.48 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

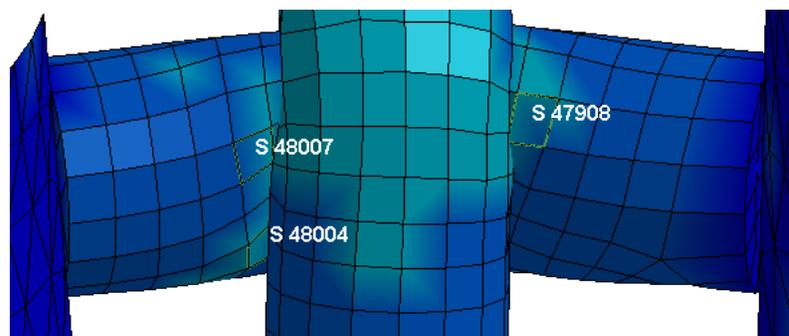


Figura 4. 46. Ubicación de los elementos N° 47908, 48004 y 48007. (Fuente: Autor)

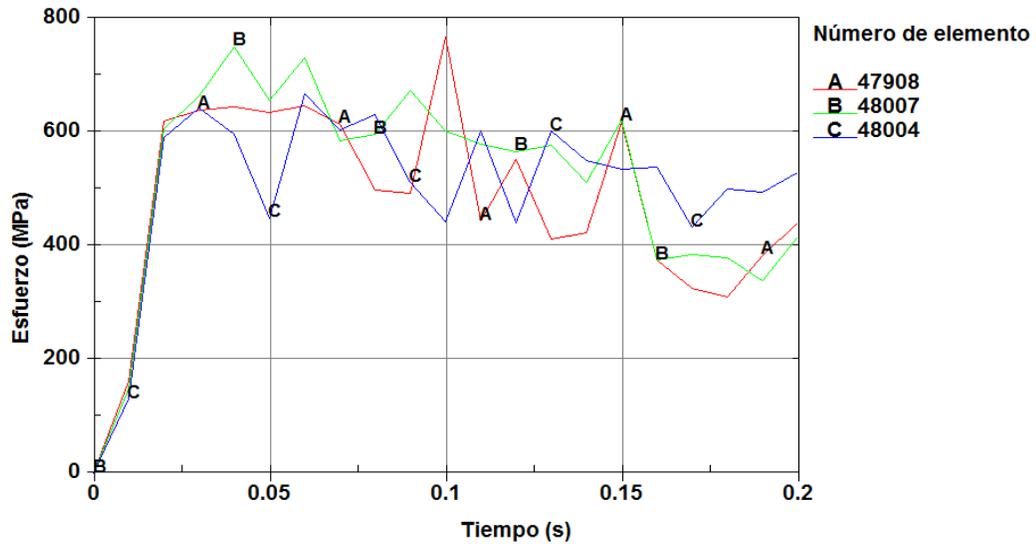


Figura 4. 47. Esfuerzos en los elementos N° 47908, 48004 y 48007. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 48. Esfuerzos en los elementos N° 47908, 48004 y 48007

ELEMENTO N° 47908		ELEMENTO N° 48004		ELEMENTO N° 48007	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	161,536	0,010	130,317	0,010	147,597
0,020	619,881	0,020	590,072	0,020	606,292
0,030	638,893	0,030	642,169	0,030	663,286
0,040	644,774	0,040	595,341	0,040	750,355
0,050	634,225	0,050	448,288	0,050	655,400
0,060	645,206	0,060	667,190	0,060	730,660
0,070	613,934	0,070	603,855	0,070	584,988
0,080	497,163	0,080	631,115	0,080	595,532
0,090	492,105	0,090	511,430	0,090	672,796
0,100	766,597	0,100	442,956	0,100	602,063
0,110	443,978	0,110	601,483	0,110	577,945
0,120	551,440	0,120	439,807	0,120	565,947
0,130	411,123	0,130	601,198	0,130	577,604
0,140	423,228	0,140	549,709	0,140	510,868
0,150	618,198	0,150	535,247	0,150	620,397
0,160	375,273	0,160	538,834	0,160	374,423
0,170	325,868	0,170	432,287	0,170	384,169
0,180	309,943	0,180	500,458	0,180	378,079
0,190	382,945	0,190	493,812	0,190	338,235
0,200	440,000	0,200	528,251	0,200	414,846

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 47908, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

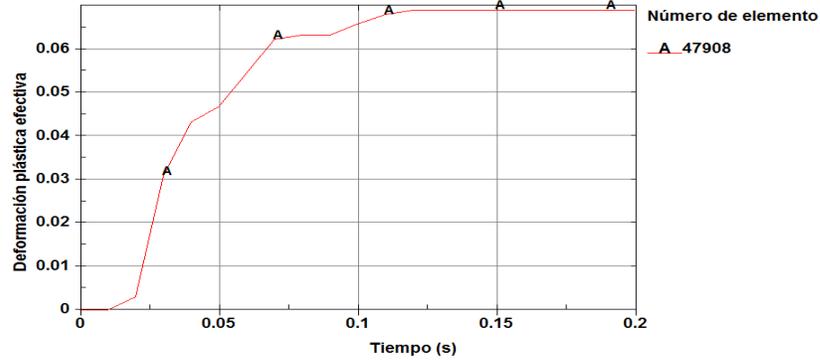


Figura 4. 48. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 47908. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 49. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 47908

ELEMENTO N° 47908	
Tiempo (s)	Deformación plástica efectiva
0,000	0,000
0,010	0,000
0,020	0,003
0,030	0,031
0,040	0,043
0,050	0,047
0,060	0,055
0,070	0,062
0,080	0,063
0,090	0,063
0,100	0,066
0,110	0,068
0,120	0,069
0,130	0,069
0,140	0,069
0,150	0,069
0,160	0,069
0,170	0,069
0,180	0,069
0,190	0,069
0,200	0,069

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 47908, su valor es de 766.597 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0.069, por lo que este anclaje no es capaz de soportar el ensayo de resistencia debido a que los esfuerzos que se producen en la región de contacto con la estructura superan considerablemente el esfuerzo máximo del material que es 383.6425 MPa, a pesar de que la deformación plástica efectiva máxima sea menor que la del material cuyo valor es de 0.37.

c) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior derecho

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos 28786, 28788 y 28808, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, la figura 4.49, muestra la ubicación de los elementos analizados, mientras que la figura 4.50 y la tabla 4.50 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

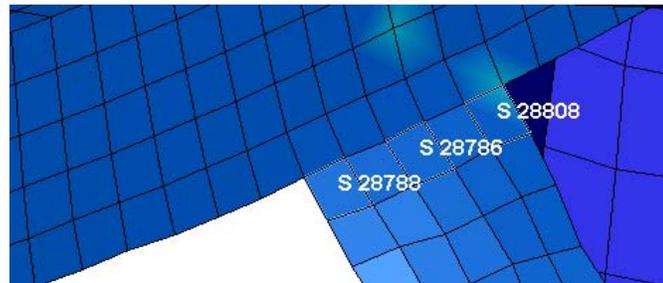


Figura 4. 49. Ubicación de los elementos N° 28786, 28788 y 28808. (Fuente: Autor)

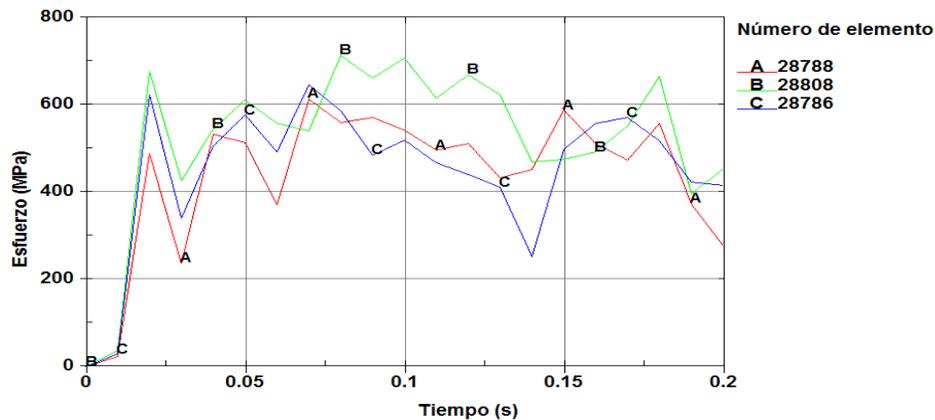


Figura 4. 50. Esfuerzos en los elementos N° 28786, 28788 y 28808. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 50. Esfuerzos en los elementos N° 28786, 28788 y 28808

ELEMENTO N° 28786		ELEMENTO N° 28788		ELEMENTO N° 28808	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	28,745	0,010	22,732	0,010	37,410
0,020	623,488	0,020	489,156	0,020	677,370
0,030	340,043	0,030	237,445	0,030	426,518
0,040	505,829	0,040	533,234	0,040	544,957
0,050	576,144	0,050	513,401	0,050	610,913
0,060	492,885	0,060	370,257	0,060	558,455
0,070	645,600	0,070	614,379	0,070	541,206
0,080	587,371	0,080	560,161	0,080	714,364
0,090	485,088	0,090	571,533	0,090	662,249
0,100	519,327	0,100	542,233	0,100	708,165
0,110	467,114	0,110	495,723	0,110	615,484
0,120	440,993	0,120	510,732	0,120	669,416
0,130	410,960	0,130	433,597	0,130	622,652
0,140	252,875	0,140	450,993	0,140	468,526
0,150	498,288	0,150	587,797	0,150	474,198
0,160	557,816	0,160	510,686	0,160	492,150
0,170	571,114	0,170	473,933	0,170	552,032
0,180	518,134	0,180	557,486	0,180	665,614
0,190	423,484	0,190	373,088	0,190	396,608
0,200	415,339	0,200	276,305	0,200	452,957

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 28808, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

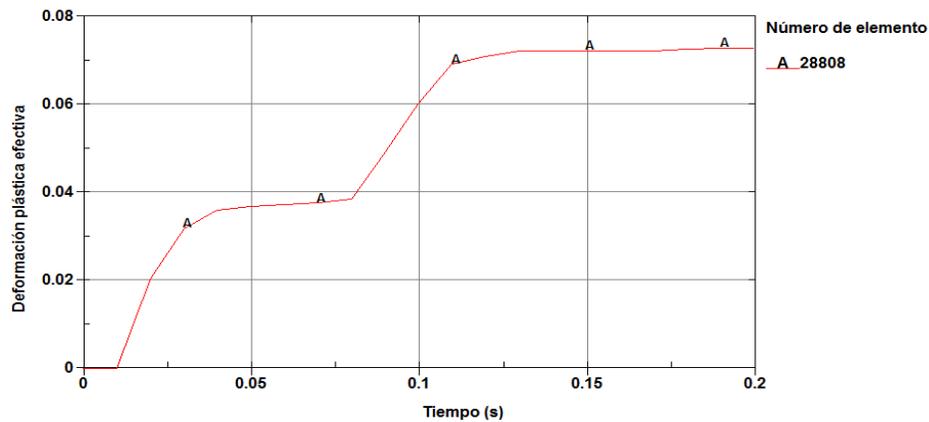


Figura 4. 51. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 28808. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 51. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 28808

ELEMENTO N° 28808	
Tiempo (s)	Deformación plástica efectiva
0,000	0,000
0,010	0,000
0,020	0,020
0,030	0,032
0,040	0,036
0,050	0,037
0,060	0,037
0,070	0,038
0,080	0,039
0,090	0,049
0,100	0,060
0,110	0,069
0,120	0,071
0,130	0,072
0,140	0,072
0,150	0,072
0,160	0,072
0,170	0,072
0,180	0,073
0,190	0,073
0,200	0,073

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 28808, su valor es de 714.364 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0.073, por lo que este anclaje no es capaz de soportar el ensayo de resistencia debido a que los esfuerzos que se producen en la región de contacto con la estructura superan considerablemente el esfuerzo máximo del material que es 511.980 MPa, a pesar de que la deformación plástica efectiva sea menor que la del material cuyo valor es de 0.283.

d) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje superior izquierdo

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos 40975 y 41028, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, la figura 4.52, muestra la ubicación de los elementos analizados, mientras que la figura 4.53 y la tabla 4.52 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

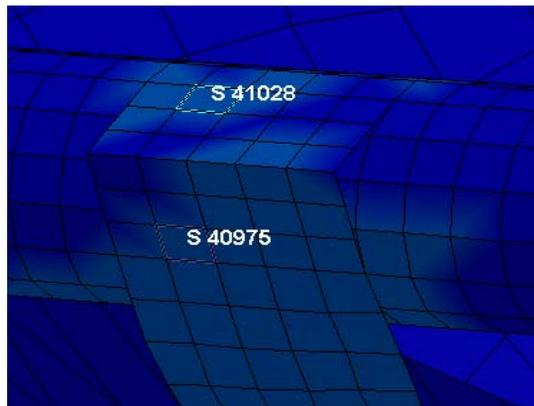


Figura 4. 52. Ubicación de los elementos N° 40975 y 41028. (Fuente: Autor)

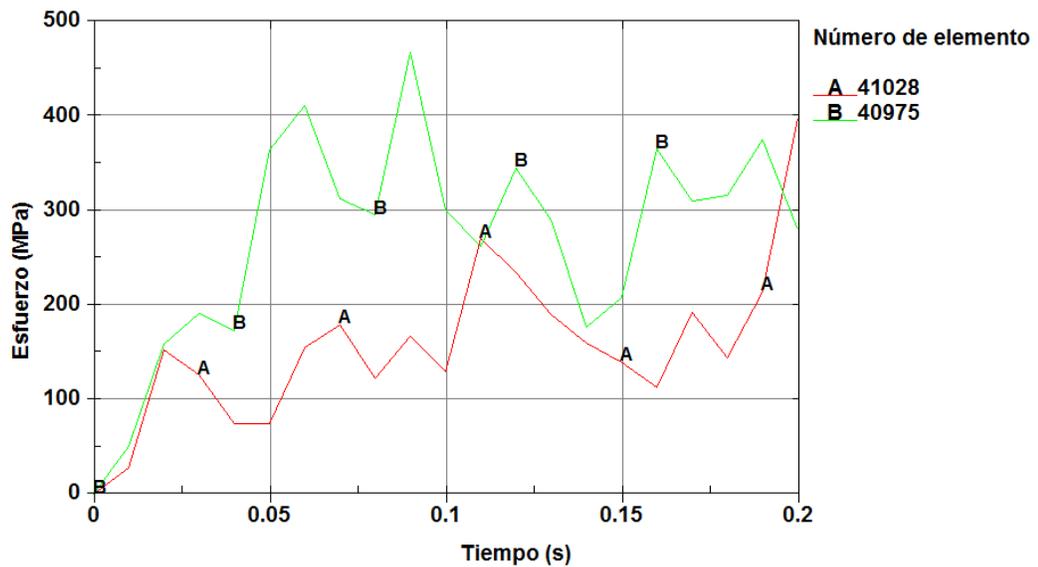


Figura 4. 53. Esfuerzos en los elementos N° 40975 y 41028. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 52. Esfuerzos en los elementos N° 40975 y 41028

ELEMENTO N° 40975		ELEMENTO N° 41028	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	50,531	0,010	27,598
0,020	159,224	0,020	152,180
0,030	190,795	0,030	126,092
0,040	173,316	0,040	75,035
0,050	364,337	0,050	74,285
0,060	411,378	0,060	155,230
0,070	312,693	0,070	179,335
0,080	295,125	0,080	122,556
0,090	467,654	0,090	167,667
0,100	299,891	0,100	129,939
0,110	261,796	0,110	269,878
0,120	345,376	0,120	234,905
0,130	290,089	0,130	190,261
0,140	176,408	0,140	160,164
0,150	207,624	0,150	139,669
0,160	364,848	0,160	113,267
0,170	310,358	0,170	191,720
0,180	316,308	0,180	144,017
0,190	374,424	0,190	214,333
0,200	279,639	0,200	397,712

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 40975, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

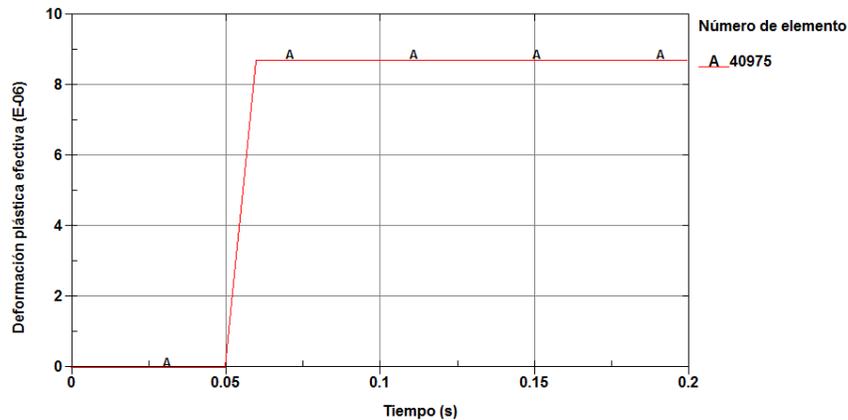


Figura 4. 54. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 40975. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 53. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 40975

ELEMENTO N° 40975	
Tiempo (s)	Deformación plástica efectiva
0,000	0,00E+00
0,010	0,00E+00
0,020	0,00E+00
0,030	0,00E+00
0,040	0,00E+00
0,050	0,00E+00
0,060	8,71E-06
0,070	8,71E-06
0,080	8,71E-06
0,090	8,71E-06
0,100	8,71E-06
0,110	8,71E-06
0,120	8,71E-06
0,130	8,71E-06
0,140	8,71E-06
0,150	8,71E-06
0,160	8,71E-06
0,170	8,71E-06
0,180	8,71E-06
0,190	8,71E-06
0,200	8,71E-06

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 40975, su valor es de 467.654 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 8.71×10^{-6} ; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia.

e) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje superior derecho

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos 40926 y 41014, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, la

figura 4.55, muestra la ubicación de los elementos analizados, mientras que la figura 4.56 y la tabla 4.54 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

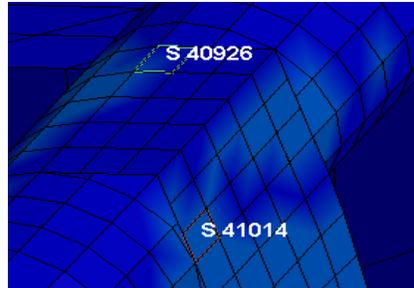


Figura 4. 55. Ubicación de los elementos N° 40926 y 41014. (Fuente: Autor)

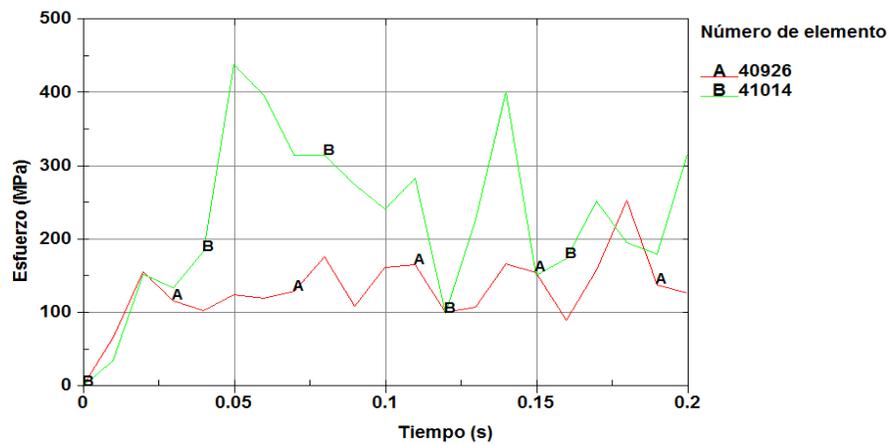


Figura 4. 56. Esfuerzos en los elementos N° 40926 y 41014. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 54. Esfuerzos en los elementos N° 40926 y 41014

ELEMENTO N° 40926		ELEMENTO N° 41014	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	65,727	0,010	34,783
0,020	155,934	0,020	152,609
0,030	116,699	0,030	134,183
0,040	103,798	0,040	183,885
0,050	124,959	0,050	439,160
0,060	120,329	0,060	396,252
0,070	129,432	0,070	314,559
0,080	177,076	0,080	314,635
0,090	109,458	0,090	275,210

0,100	162,671	0,100	241,434
0,110	165,628	0,110	283,626
0,120	101,363	0,120	99,604
0,130	107,684	0,130	227,606
0,140	167,299	0,140	401,791
0,150	155,420	0,150	151,157
0,160	90,624	0,160	174,108
0,170	158,317	0,170	252,974
0,180	253,859	0,180	196,093
0,190	138,537	0,190	180,680
0,200	127,985	0,200	315,795

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 41014, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

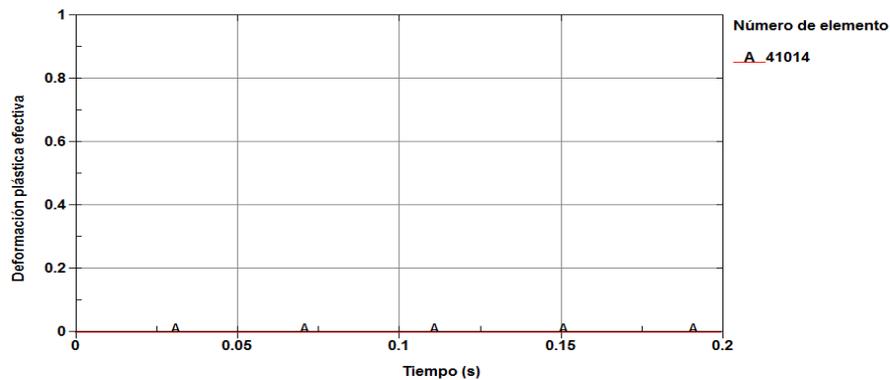


Figura 4. 57. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 41014. (Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 41014, su valor es de 439.160 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0 durante toda la simulación; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia.

f) Deformaciones plásticas efectivas y desplazamientos en la estructura

La estructura presenta un comportamiento poco satisfactorio durante el ensayo de resistencia, ya que además de que los anclajes para cinturones de seguridad

no son capaces de soportar las cargas aplicadas la estructura en general sufre deformaciones excesivas que pueden causar la rotura de ciertos elementos en ella y sobre todo comprometer la seguridad de los ocupantes, tal es así que se tiene una deformación plástica efectiva máxima de 0.674 que supera por mucho los límites máximos de los materiales, los cuales son 0.37 y 0.283 para los aceros ASTM A500 grado A y ASTM A36 respectivamente; además se puede evidenciar claramente la deformación excesiva producida en la estructura debido a que se tiene un desplazamiento total máximo de 1015.17 mm en la zona superior de los espaldares, el cual es un valor inadmisibles ya que al ser esta zona de gran importancia para garantizar la integridad de los ocupantes debe deformarse lo menos posible. Las figuras 4.58 y 4.59 muestran estos resultados.



Figura 4. 58. Deformación plástica efectiva máxima en la estructura. (Fuente: Autor)

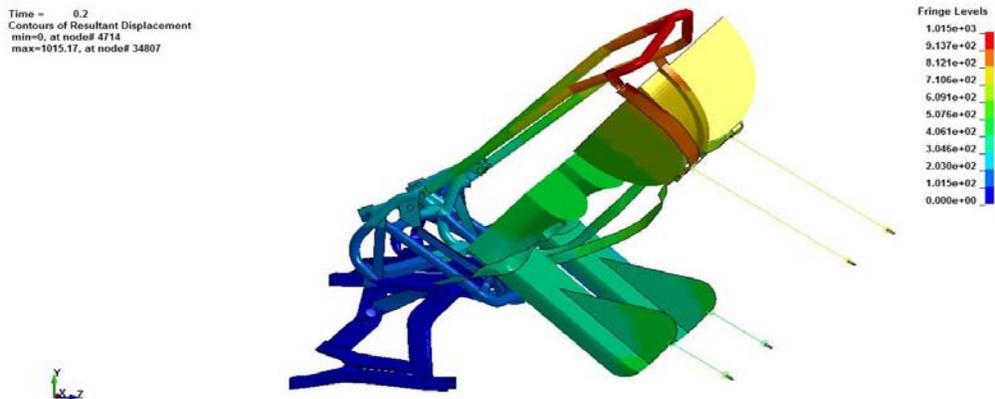


Figura 4. 59. Desplazamiento total máximo en la estructura. (Fuente: Autor)

Al tratarse de una simulación dinámica explícita se ha evaluado su validez por medio de la relación entre la energía interna del sistema y la energía de Hourglass, la cual no debe superar el 10% de la energía interna.

En este caso la relación se cumple satisfactoriamente ya que la máxima relación de energías en esta simulación es de 1.5 %. La figura 4.60 muestra las curvas de energía y la tabla 4.55 muestra sus valores respectivos.

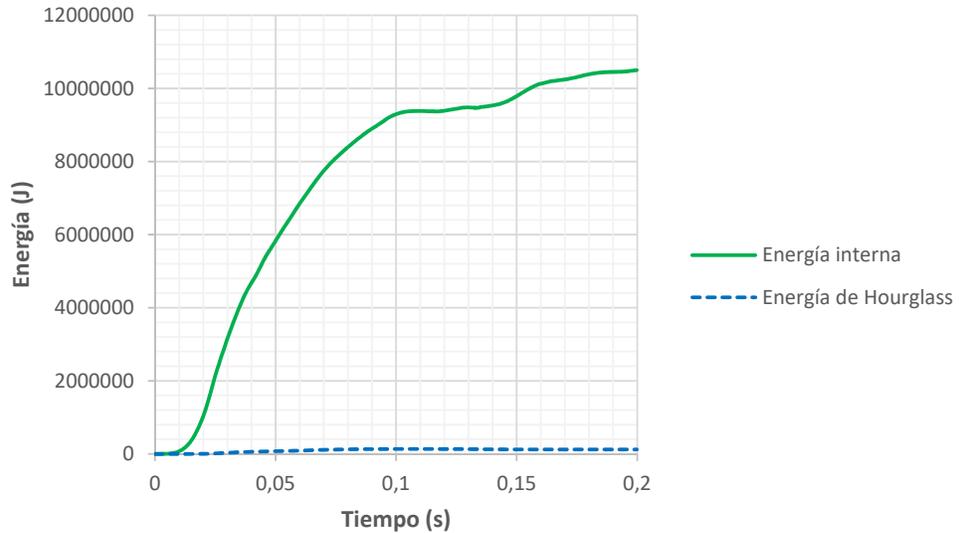


Figura 4. 60. Relación de energías de la simulación. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 55. Energías de la simulación

ENERGÍA INTERNA		ENERGÍA DE HOURGLASS		RELACIÓN DE ENERGÍAS
Tiempo (s)	Energía (J)	Tiempo (s)	Energía (J)	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%
0,010	70819,100	0,010	26,929	0,04%
0,020	1039580,000	0,020	3552,190	0,34%
0,030	3153460,000	0,030	31624,500	1,00%
0,040	4677680,000	0,040	58670,000	1,25%
0,050	5829730,000	0,050	74804,300	1,28%
0,060	6851430,000	0,060	90205,700	1,32%
0,070	7751140,000	0,070	112471,000	1,45%
0,080	8394280,000	0,080	126165,000	1,50%
0,090	8898380,000	0,090	132275,000	1,49%
0,100	9293960,000	0,100	135757,000	1,46%
0,110	9381300,000	0,110	136801,000	1,46%

0,120	9385720,000	0,120	134557,000	1,43%
0,130	9481120,000	0,130	131895,000	1,39%
0,140	9530660,000	0,140	126667,000	1,33%
0,150	9772810,000	0,150	123247,000	1,26%
0,160	10121900,000	0,160	122788,000	1,21%
0,170	10241500,000	0,170	121808,000	1,19%
0,180	10382900,000	0,180	122910,000	1,18%
0,190	10451900,000	0,190	122289,000	1,17%
0,200	10500000,000	0,200	122701,000	1,17%

(Fuente: Autor)

4.2.3. Rediseño de la estructura

Una vez realizado el análisis de resistencia de los anclajes de cinturones de seguridad en la estructura de asiento de autobús interprovincial fabricada actualmente por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. se ha determinado que ésta no es capaz de soportar de manera satisfactoria con los parámetros de evaluación establecidos en el numeral 7.1 del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa (Anexo 3) ya que se producen esfuerzos y deformaciones excesivas que superan los valores de resistencia máximos de los materiales según se muestra en las secciones 4.2.2.1 y 4.2.2.2.

Debido a que es necesario contar con una estructura que sea capaz de soportar las condiciones de evaluación propuestas para garantizar la seguridad de los ocupantes del vehículo se propone rediseñar la estructura actual.

El rediseño de la estructura se ha realizado identificando sus partes más críticas, es decir aquellas zonas donde se generan grandes esfuerzos y deformaciones, en dichas zonas se han modificado y añadido nuevos elementos estructurales que permitan reforzar la estructura procurando no alterar demasiado la estructura original.

Las modificaciones propuestas a la estructura se han llevado a cabo considerando sobre todo la disponibilidad de perfiles estructurales en el mercado, así por ejemplo no se han reemplazado los tubos estructurales utilizados inicialmente ya que no se dispone de tubos de mayor espesor con las dimensiones requeridas, lo cual resulta un limitante muy importante. Por otro lado, el uso de otro tipo de materiales no es

posible debido a que en el mercado local los materiales más utilizados en estructuras de este tipo son los aceros estructurales ASTM A 36 y ASTM A 500.

4.2.3.1. Descripción de la estructura rediseñada

A continuación se describen las partes de la estructura del asiento que han sido modificadas:

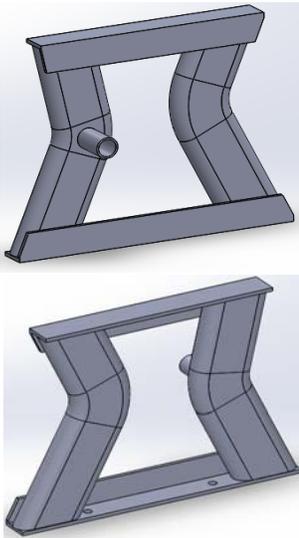
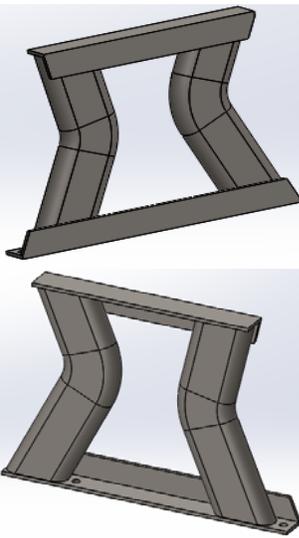
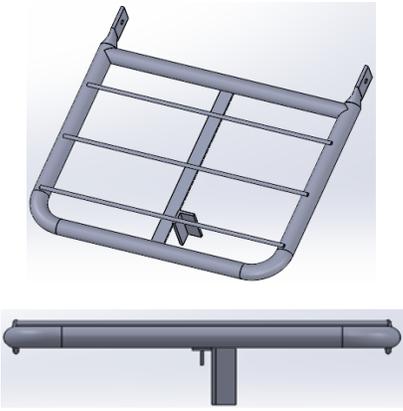
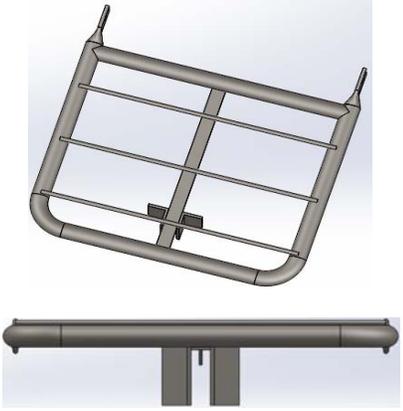
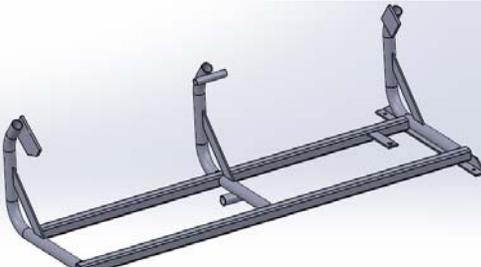
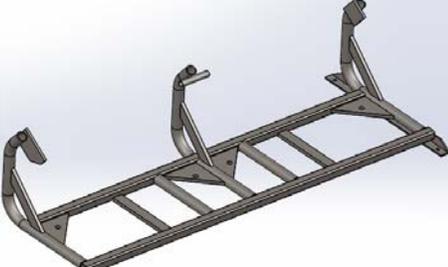
- a) **Pata del asiento:** En esta zona se ha ubicado el punto de anclaje al piso del autobús en un lugar diferente para evitar que éste se desprenda o se levante demasiado, además se ha removido el punto de anclaje para cinturón de seguridad.
- b) **Asientos:** En este componente se ha añadido un elemento estructural de refuerzo en la zona que une los asientos a la base de la estructura para brindar una mayor estabilidad.
- c) **Base de la estructura:** Este componente es el que ha tenido mayores modificaciones ya que al ser el que más esfuerzo soporta durante el ensayo de resistencia debe contar con una mayor estabilidad.

Se han añadido perfiles estructurales de refuerzo en el marco principal de la estructura, además se han ubicado los puntos inferiores de anclaje para cinturones de seguridad en esta zona, mientras que en los refuerzos laterales de la estructura se ha mantenido la forma original aunque se han utilizado perfiles de un mayor espesor.

- d) **Anclajes de cinturones de seguridad inferiores:** Se han reemplazado por completo a los anclajes anteriores tanto en su ubicación como en su forma.

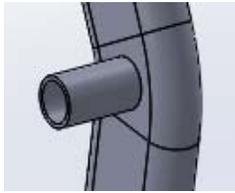
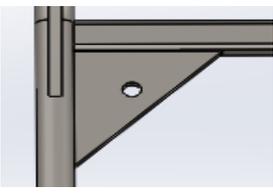
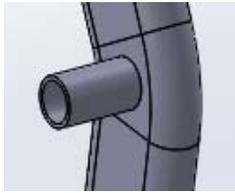
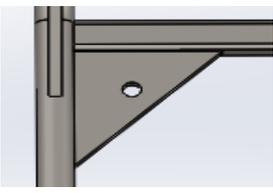
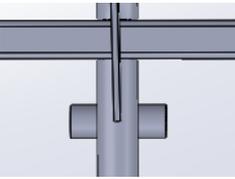
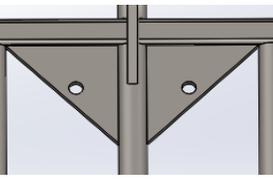
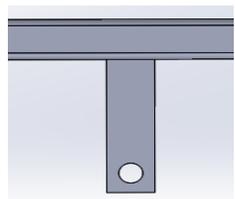
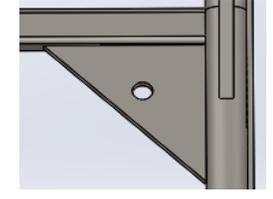
Los perfiles utilizados en la estructura modificada así como también sus dimensiones se detallan en el Anexo 14. La tablas 4.56 y 4.57 muestran las modificaciones realizadas en la estructura y los anclajes inferiores de cinturones de seguridad.

Tabla 4. 56. Modificaciones a la estructura del asiento

PARTE	ESTRUCTURA ORIGINAL	ESTRUCTURA MODIFICADA
Pata		
Asiento		
Base		

(Fuente: Autor)

Tabla 4. 57. Modificaciones en los anclajes inferiores de cinturones de seguridad

ANCLAJE	ESTRUCTURA ORIGINAL		ESTRUCTURA MODIFICADA	
	UBICACIÓN		UBICACIÓN	
Inferior izquierdo	Pata		Base de la estructura	
Inferior medio	Base de la estructura		Base de la estructura	
Inferior derecho	Base de la estructura		Base de la estructura	

(Fuente: Autor)

4.2.3.2. Simulación en un asiento con cinturones de seguridad de dos puntos

Al igual que las simulaciones con la estructura original, se utilizaron las mismas condiciones de evaluación para la estructura modificada. La figura 4.61 muestra el modelo digital utilizado y las condiciones para la simulación.

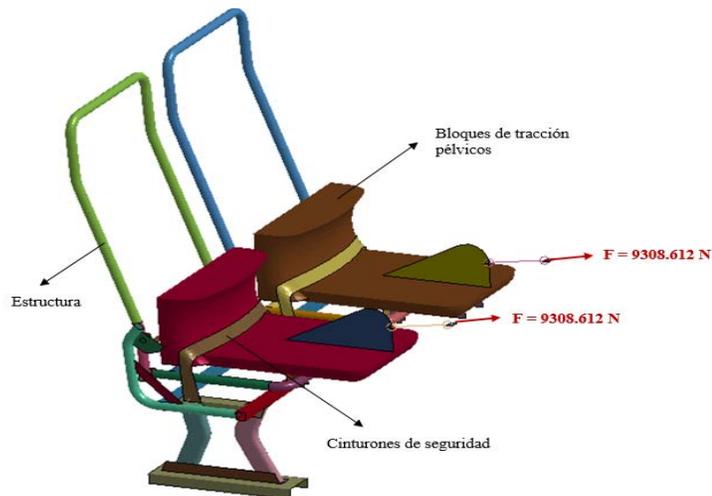


Figura 4. 61. Modelo y condiciones para la simulación. (Fuente: Autor)

4.2.3.2.1. Verificación de la calidad de la malla

El modelo fue mallado con *elementos cuadriláteros de tipo shell* en la estructura y bloques de tracción, mientras que en los cinturones de seguridad se utilizaron *elementos triangulares tipo shell*.

La malla está compuesta por 56641 elementos y 56828 nodos teniendo 54979 elementos cuadriláteros y 1662 elementos triangulares, la calidad de la malla se ha evaluado en base a la relación de aspecto de los elementos, teniendo una relación mínima de 1.29 y máxima de 6.58, los cuales son valores adecuados de calidad de malla ya que al tratarse de una modelo con zonas que tienen una geometría compleja y un número elevado de elementos, la mayoría de ellos se encuentran en los valores mínimos de relación de aspecto y muy pocos superan ligeramente el valor recomendado máximo que es 5, esto se puede apreciar a continuación:

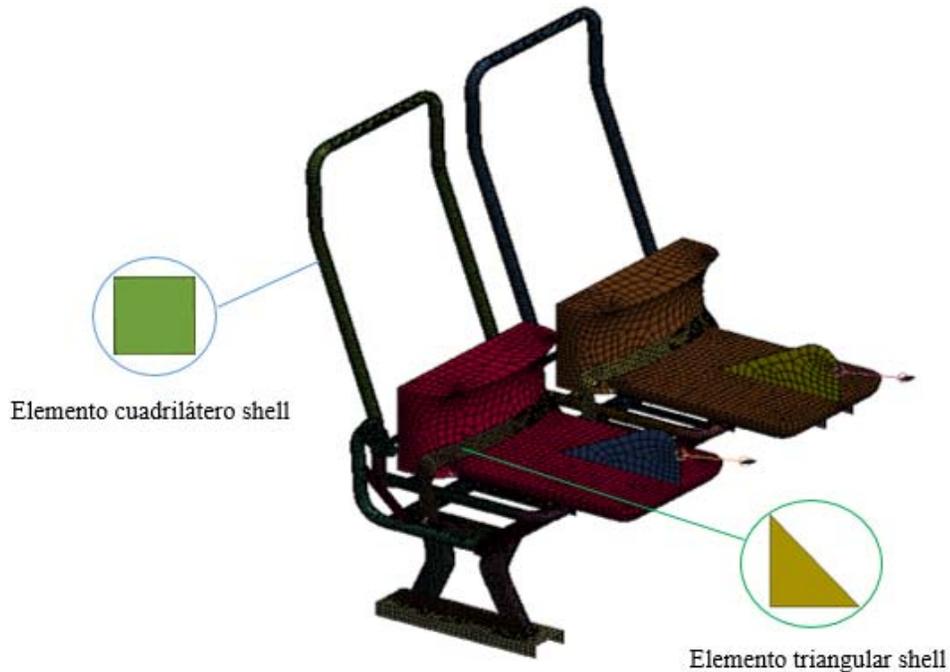


Figura 4. 62. Malla del modelo digital con elementos shell. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 58. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla

ELEMENTOS CUADRILÁTEROS		ELEMENTOS TRIANGULARES	
Relación de aspecto	Número de elementos	Relación de aspecto	Número de elementos
1,29	52843	1,29	1510
1,88	1730	1,88	64
2,47	354	2,47	20
3,05	36	3,05	2
3,64	11	3,64	4
4,23	1	4,23	3
4,82	3	4,82	10
5,4	1	5,4	46
5,99	0	5,99	1
6,58	0	6,58	2

(Fuente: Autor)

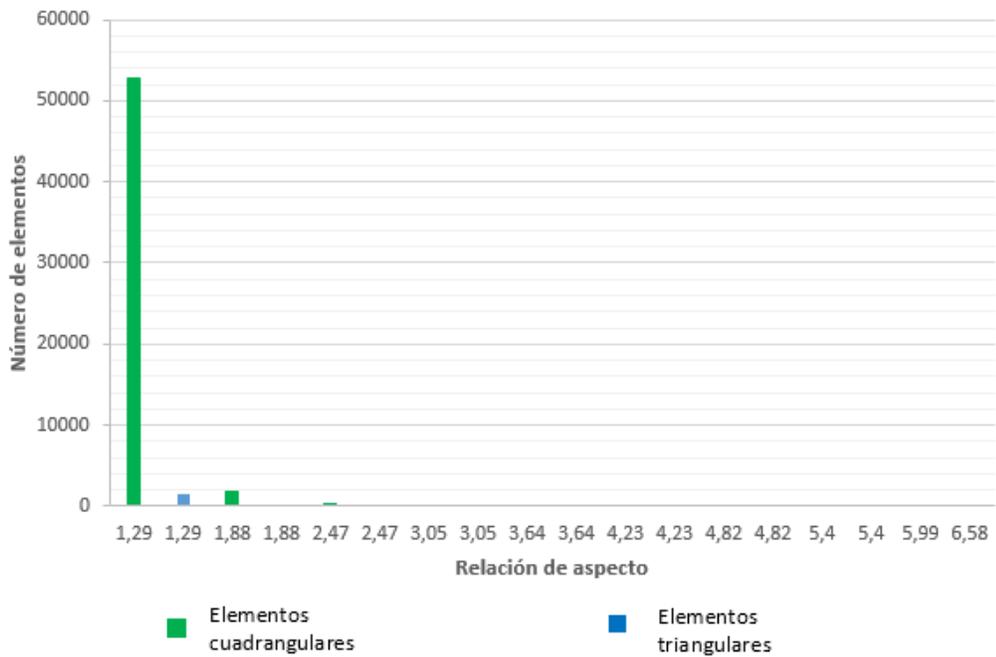
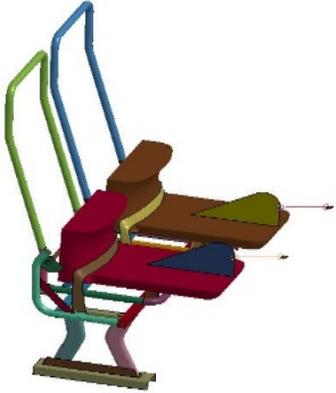
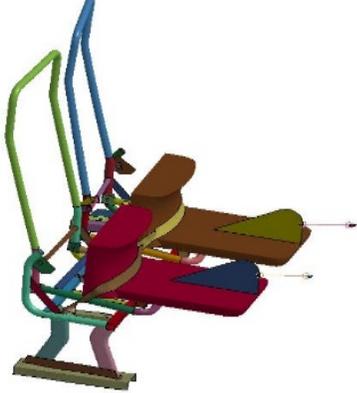
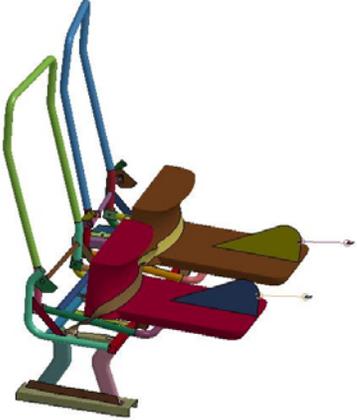
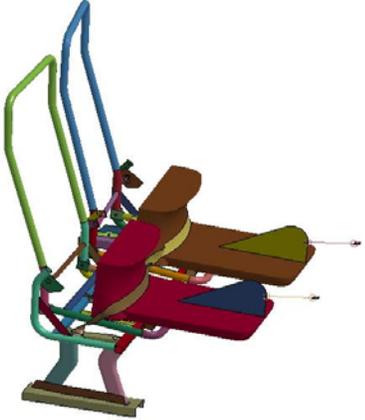


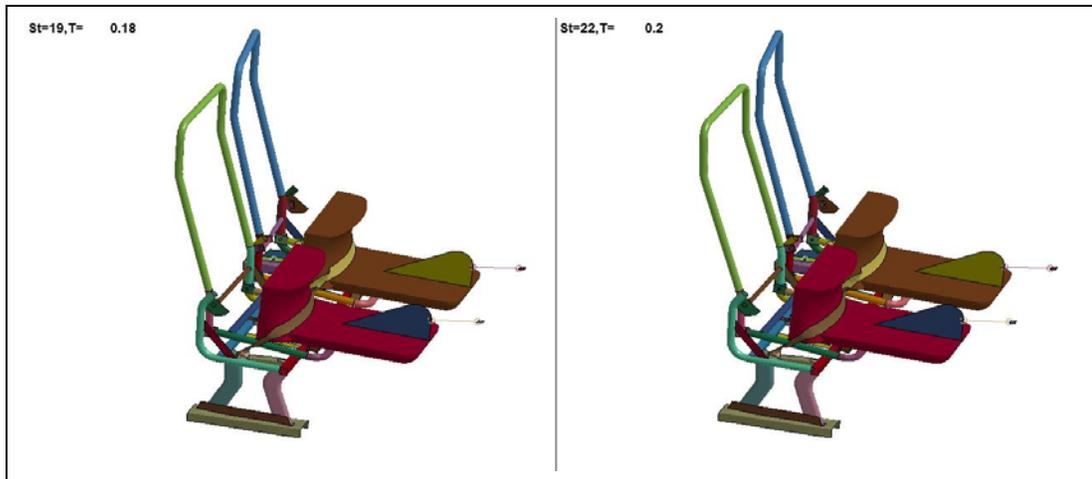
Figura 4. 63. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla. (Fuente: Autor)

4.2.3.2.2. Resultados de la simulación

La tabla 4.59 muestra los resultados obtenidos de la simulación del ensayo, para la cual se utilizaron los modelos de materiales y condiciones descritas en las secciones 3.5.6 y 3.5.7 respectivamente.

Tabla 4. 59. Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un asiento con cinturones de dos puntos

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
SIMULACIÓN DE ENSAYO DE RESISTENCIA DE ANCLAJES DE CINTURONES DE SEGURIDAD			
Normas aplicables:	NTE INEN 2704 con referencia al Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa		
Fecha de Ejecución:	27/10/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Relación de aspecto mínima:	1.29	Relación de aspecto máxima:	6.58
Número de elementos:	56641	Número de nodos:	56828
Tiempo de procesamiento:	26 horas 13 minutos	Número de procesadores:	8
Tipo de cinturón de seguridad:	Cinturón con dos puntos de anclaje		
Tiempo de aplicación de la carga:	0.2 segundos		
RESULTADO DEL ENSAYO			
<p>St=1,T= 0</p> 		<p>St=6,T= 0.05</p> 	
<p>St=11,T= 0.1</p> 		<p>St=16,T= 0.15</p> 	



(Fuente: Autor)

Una vez realizada la simulación, se han analizado los resultados más importantes obtenidos, siendo éstos los esfuerzos en las zonas donde sería más probable que se produzcan roturas, tales zonas son las uniones entre los puntos de anclaje y la estructura del asiento, también se han analizado los desplazamientos y deformaciones plásticas efectivas (Anexo 12). A continuación se muestran los resultados obtenidos:

a) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior izquierdo

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 28123, 28126, 28128, 28143 y 28145, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.64, 4.66 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.65, 4.67 y las tablas 4.60, 4.61 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

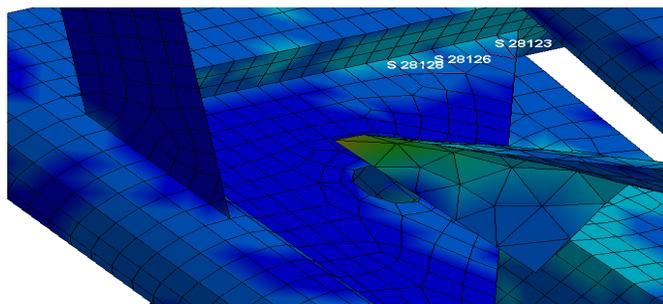


Figura 4. 64. Ubicación de los elementos N° 28123, 28126 y 28128. (Fuente: Autor)

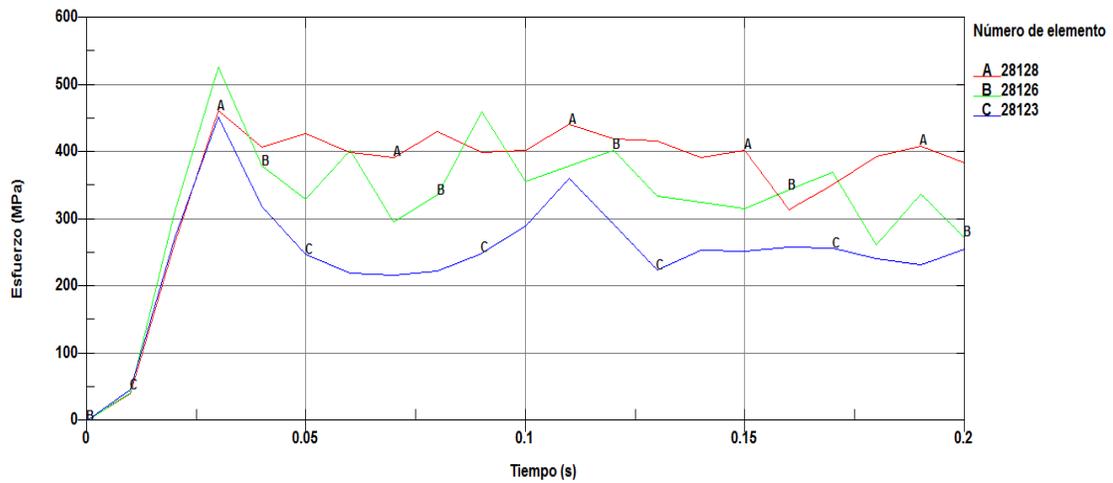


Figura 4. 65. Esfuerzos en los elementos N° 28123, 28126 y 28128. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 60. Esfuerzos en los elementos N° 28123, 28126 y 28128

ELEMENTO N° 28123		ELEMENTO N° 28126		ELEMENTO N° 28128	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	46,399	0,010	42,021	0,010	40,569
0,020	272,513	0,020	311,104	0,020	264,919
0,030	452,921	0,030	526,683	0,030	461,719
0,040	320,046	0,040	379,829	0,040	408,184
0,050	247,653	0,050	329,462	0,050	427,844
0,060	219,541	0,060	403,552	0,060	400,510
0,070	217,076	0,070	295,769	0,070	392,883
0,080	222,733	0,080	335,967	0,080	430,424
0,090	249,974	0,090	459,744	0,090	399,647
0,100	289,587	0,100	355,889	0,100	403,490
0,110	360,961	0,110	379,328	0,110	441,681
0,120	293,765	0,120	403,131	0,120	419,744
0,130	224,266	0,130	334,875	0,130	417,558
0,140	254,019	0,140	325,204	0,140	392,195
0,150	252,834	0,150	315,931	0,150	403,657
0,160	259,476	0,160	343,693	0,160	314,298
0,170	256,842	0,170	370,642	0,170	352,464
0,180	242,220	0,180	262,044	0,180	394,573
0,190	232,060	0,190	337,359	0,190	409,993
0,200	256,189	0,200	273,327	0,200	385,028

(Fuente: Autor)

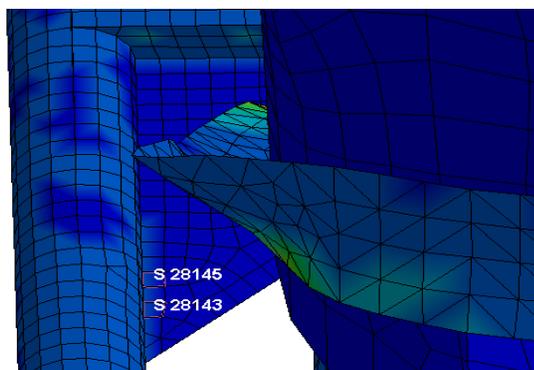


Figura 4. 66. Ubicación de los elementos N° 28143 y 28145. (Fuente: Autor)

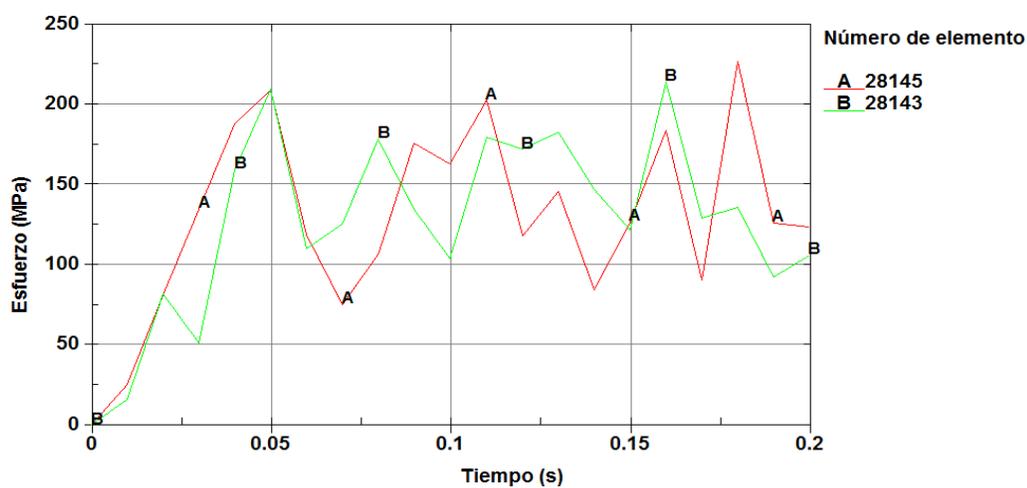


Figura 4. 67. Esfuerzos en los elementos N° 28143 y 28145. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 61. Esfuerzos en los elementos N° 28143, y 28145

ELEMENTO N° 28143		ELEMENTO N° 28145	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	16,148	0,010	24,934
0,020	81,403	0,020	81,010
0,030	50,745	0,030	134,783
0,040	159,198	0,040	187,867
0,050	209,567	0,050	209,064
0,060	109,995	0,060	118,830
0,070	125,316	0,070	75,025
0,080	178,193	0,080	106,541
0,090	134,652	0,090	175,749
0,100	104,029	0,100	162,593

0,110	179,296	0,110	202,458
0,120	171,982	0,120	117,977
0,130	182,242	0,130	145,400
0,140	146,868	0,140	84,360
0,150	121,416	0,150	126,695
0,160	213,800	0,160	183,425
0,170	129,286	0,170	90,473
0,180	136,018	0,180	226,535
0,190	92,256	0,190	126,065
0,200	105,887	0,200	123,529

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 28126, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

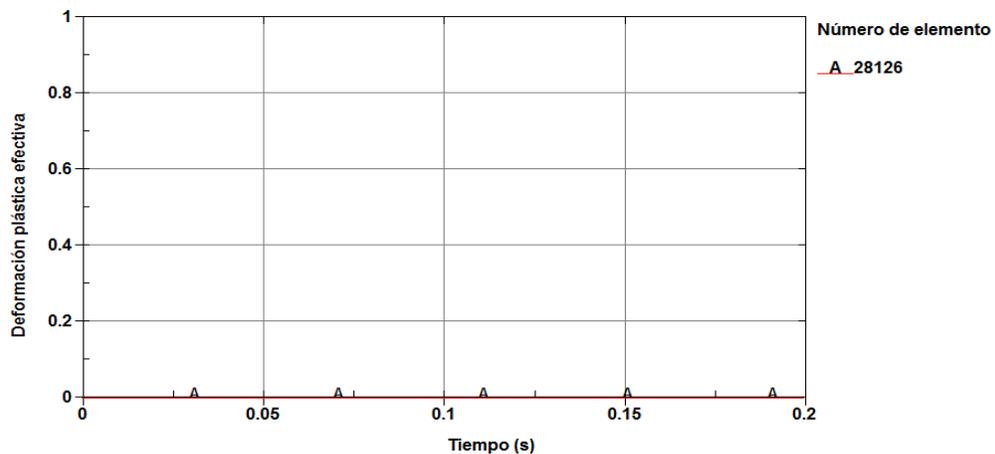


Figura 4. 68. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 28126. (Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 28126, su valor es de 526.683 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0 durante toda la simulación, por lo tanto este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia debido a que los esfuerzos producidos en las regiones de contacto con la estructura se encuentran por debajo del esfuerzo máximo promedio del material, el cual es 511.980 MPa, aunque se supere por poco este valor con el esfuerzo máximo obtenido éste no es constante y disminuye de inmediato.

b) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior medio izquierdo

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 27365, 27370, 27546, 27494, 27495 y 27505, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.69, 4.71 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.70, 4.72 y las tablas 4.62, 4.63 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

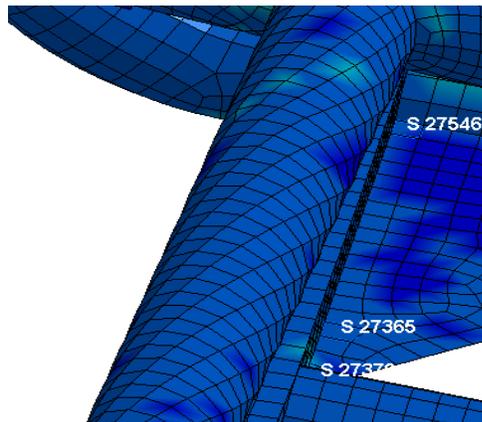


Figura 4. 69. Ubicación de los elementos N° 27365, 27370 y 27546. (Fuente: Autor)

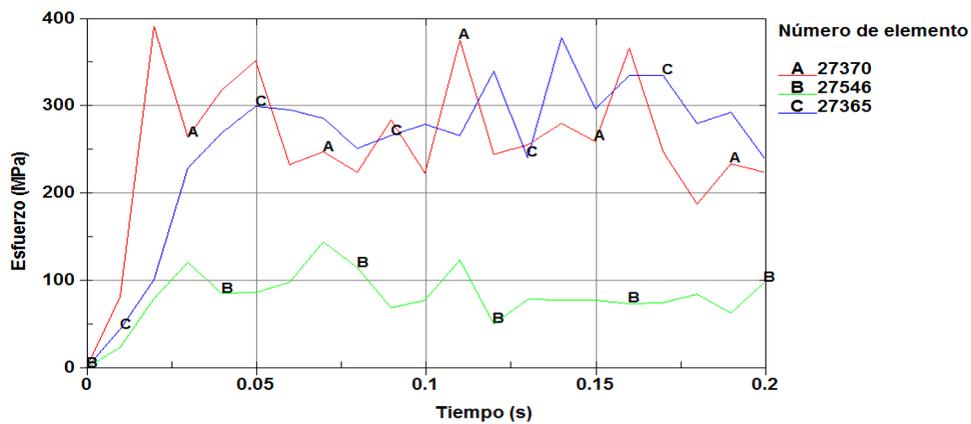


Figura 4. 70. Esfuerzos en los elementos N° 27365, 27370 y 27546. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 62. Esfuerzos en los elementos N° 27365, 27370 y 27546

ELEMENTO N° 27365		ELEMENTO N° 27370		ELEMENTO N° 27546	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	81,237	0,010	23,585	0,010	43,826
0,020	391,610	0,020	79,321	0,020	101,614
0,030	263,926	0,030	120,783	0,030	229,319
0,040	318,523	0,040	85,315	0,040	269,355
0,050	352,021	0,050	86,515	0,050	299,657
0,060	232,606	0,060	98,412	0,060	295,773
0,070	247,329	0,070	144,693	0,070	286,368
0,080	223,673	0,080	114,545	0,080	251,859
0,090	283,951	0,090	68,960	0,090	266,094
0,100	223,434	0,100	77,400	0,100	279,259
0,110	375,457	0,110	123,896	0,110	266,187
0,120	244,531	0,120	50,285	0,120	340,355
0,130	255,991	0,130	78,720	0,130	241,050
0,140	279,724	0,140	77,196	0,140	378,246
0,150	259,560	0,150	77,772	0,150	296,955
0,160	366,222	0,160	73,814	0,160	335,110
0,170	247,722	0,170	74,650	0,170	335,552
0,180	187,631	0,180	84,632	0,180	279,821
0,190	234,209	0,190	63,319	0,190	293,171
0,200	223,795	0,200	98,090	0,200	239,486

(Fuente: Autor)

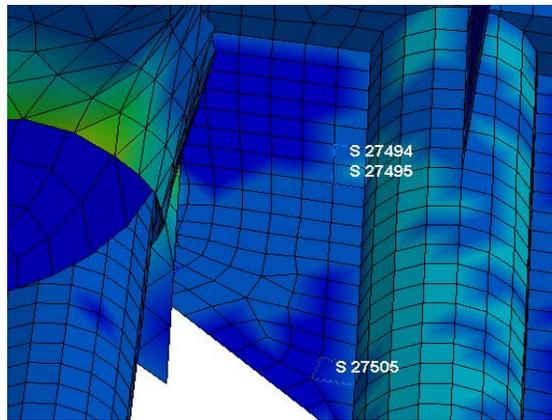


Figura 4. 71. Ubicación de los elementos N° 27494, 27495 y 27505. (Fuente: Autor)

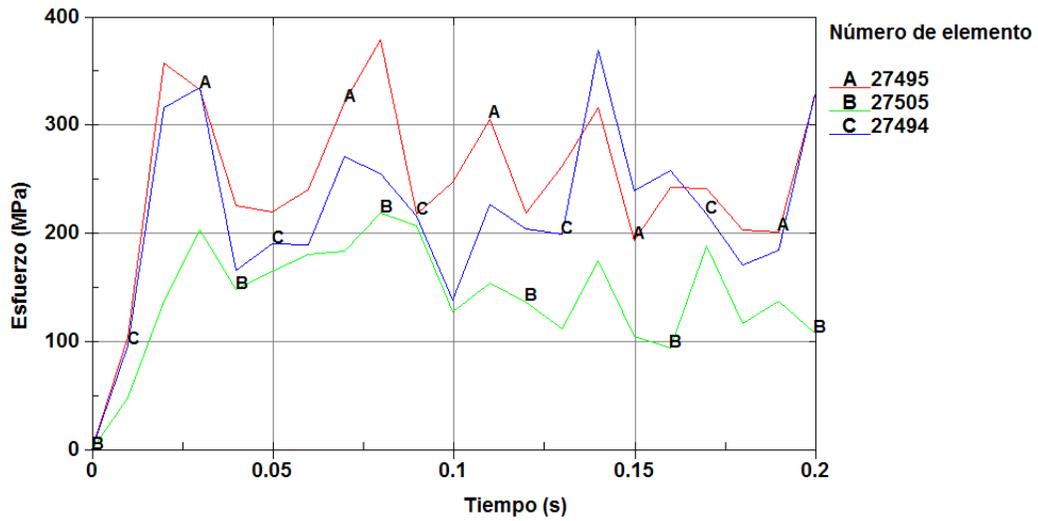


Figura 4. 72. Esfuerzos en los elementos N° 27494, 27495 y 27505. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 63. Esfuerzos en los elementos N° 27494, 27495 y 27505

ELEMENTO N° 27494		ELEMENTO N° 27495		ELEMENTO N° 27505	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	96,655	0,010	104,443	0,010	48,543
0,020	316,866	0,020	357,977	0,020	138,066
0,030	334,872	0,030	333,656	0,030	203,546
0,040	166,348	0,040	225,642	0,040	148,218
0,050	190,345	0,050	219,671	0,050	164,727
0,060	189,683	0,060	240,973	0,060	180,500
0,070	271,681	0,070	321,030	0,070	184,049
0,080	255,479	0,080	379,655	0,080	218,825
0,090	216,359	0,090	217,748	0,090	207,375
0,100	138,629	0,100	247,676	0,100	127,851
0,110	227,428	0,110	306,021	0,110	153,996
0,120	204,020	0,120	219,028	0,120	136,769
0,130	199,056	0,130	262,473	0,130	111,565
0,140	369,473	0,140	316,027	0,140	174,770
0,150	240,070	0,150	193,621	0,150	105,310
0,160	258,172	0,160	242,819	0,160	94,320
0,170	217,805	0,170	242,142	0,170	189,010
0,180	171,322	0,180	203,251	0,180	116,925
0,190	184,873	0,190	201,887	0,190	137,782
0,200	329,085	0,200	327,445	0,200	108,046

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 27365, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

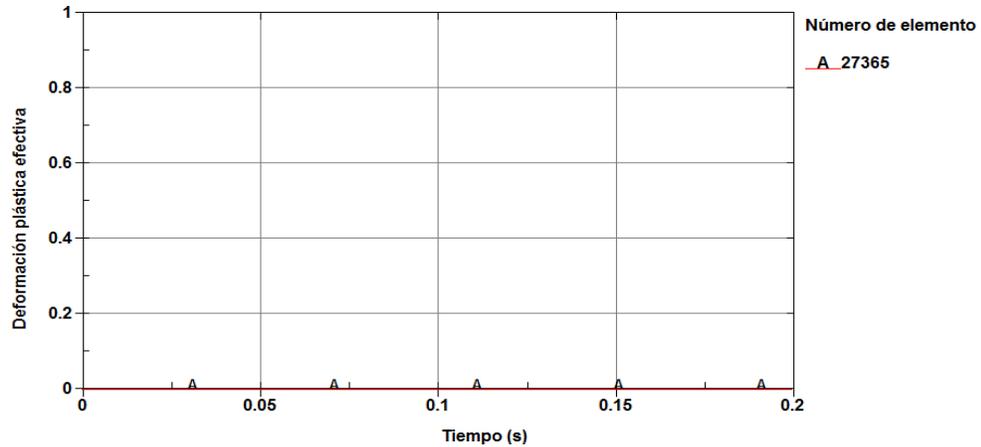


Figura 4. 73. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 27365. (Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 27365, su valor es de 391.61 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0 durante toda la simulación; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia satisfactoriamente.

c) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior medio derecho

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 27901, 27910, 27955, 27937, 27945 y 27947, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.74, 4.76 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.75, 4.77 y las tablas 4.64, 4.65 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

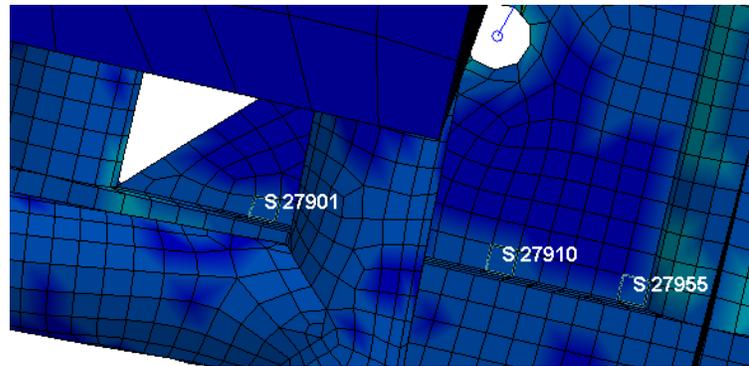


Figura 4. 74. Ubicación de los elementos N° 27901, 27910 y 27955. (Fuente: Autor)

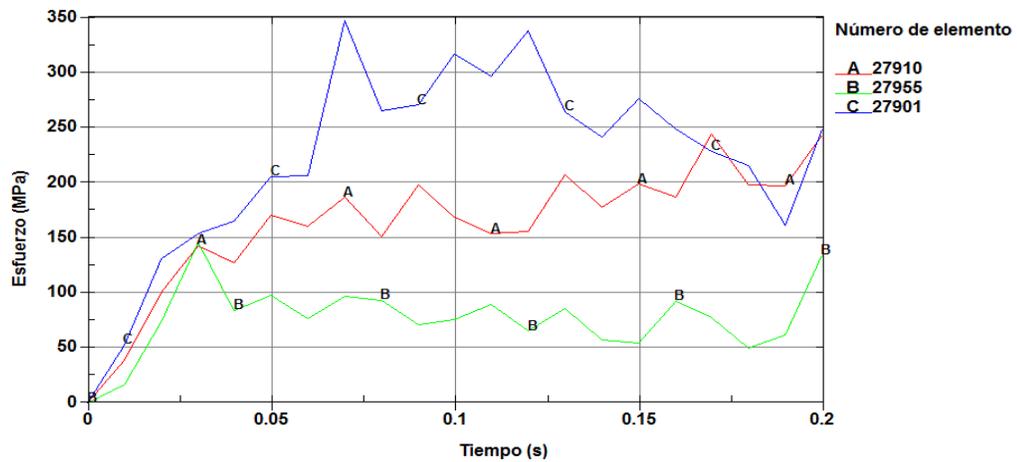


Figura 4. 75. Esfuerzos en los elementos N° 27901, 27910 y 27955. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 64. Esfuerzos en los elementos N° 27901, 27910 y 27955

ELEMENTO N° 27901		ELEMENTO N° 27910		ELEMENTO N° 27955	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	52,710	0,010	38,669	0,010	16,397
0,020	130,928	0,020	100,767	0,020	73,720
0,030	153,768	0,030	142,985	0,030	145,127
0,040	164,416	0,040	127,351	0,040	83,925
0,050	205,420	0,050	170,447	0,050	97,849
0,060	206,375	0,060	160,679	0,060	76,365
0,070	347,254	0,070	186,967	0,070	96,518
0,080	265,065	0,080	151,452	0,080	93,342
0,090	270,422	0,090	197,854	0,090	70,920

0,100	317,159	0,100	168,095	0,100	75,345
0,110	296,282	0,110	153,774	0,110	89,185
0,120	338,473	0,120	155,421	0,120	65,091
0,130	264,384	0,130	207,657	0,130	85,712
0,140	241,709	0,140	177,787	0,140	56,917
0,150	275,980	0,150	198,795	0,150	54,640
0,160	249,080	0,160	186,738	0,160	92,203
0,170	228,668	0,170	243,970	0,170	77,620
0,180	215,639	0,180	197,829	0,180	49,553
0,190	161,124	0,190	197,170	0,190	61,269
0,200	248,370	0,200	243,106	0,200	134,418

(Fuente: Autor)

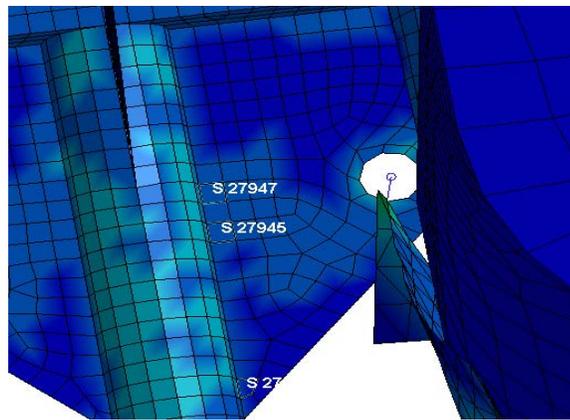


Figura 4. 76. Ubicación de los elementos N° 27937, 27945 y 27947. (Fuente: Autor)

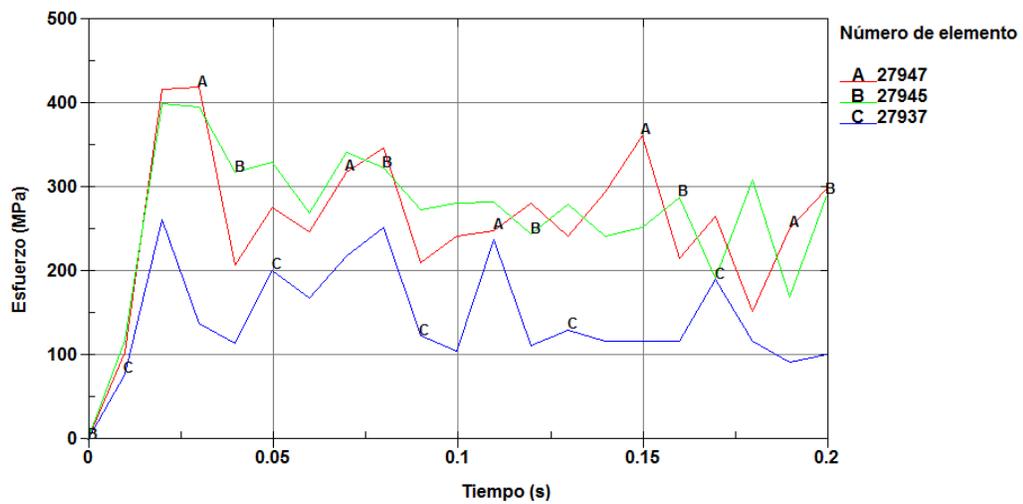


Figura 4. 77. Esfuerzos en los elementos N° 27937, 27945 y 27947. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 65. Esfuerzos en los elementos N° 27937, 27945 y 27947

ELEMENTO N° 27937		ELEMENTO N° 27945		ELEMENTO N° 27947	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	77,850	0,010	118,371	0,010	103,902
0,020	261,400	0,020	399,485	0,020	416,488
0,030	138,765	0,030	396,629	0,030	419,350
0,040	113,969	0,040	317,837	0,040	208,368
0,050	201,865	0,050	329,818	0,050	276,961
0,060	168,919	0,060	270,243	0,060	247,451
0,070	218,922	0,070	342,096	0,070	318,487
0,080	251,978	0,080	323,385	0,080	347,348
0,090	123,578	0,090	273,280	0,090	210,106
0,100	104,745	0,100	281,691	0,100	242,185
0,110	238,231	0,110	282,346	0,110	249,244
0,120	111,467	0,120	244,284	0,120	281,104
0,130	130,702	0,130	279,819	0,130	241,593
0,140	117,386	0,140	241,580	0,140	294,164
0,150	117,386	0,150	252,678	0,150	362,320
0,160	117,427	0,160	288,741	0,160	215,788
0,170	190,207	0,170	192,599	0,170	266,146
0,180	117,228	0,180	309,649	0,180	152,342
0,190	92,536	0,190	169,861	0,190	251,777
0,200	100,762	0,200	290,794	0,200	298,484

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 27947, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

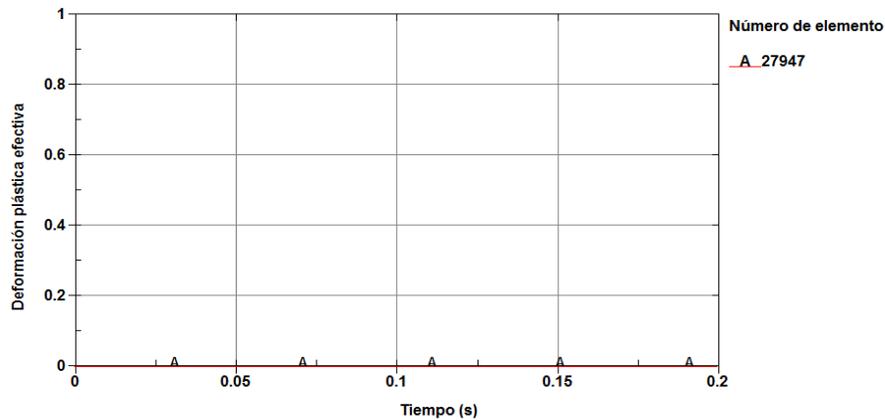


Figura 4. 78. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 27947. (Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 27947, su valor es de 419.35 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0 durante toda la simulación; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia satisfactoriamente.

d) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior derecho

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 27547, 27740, 27747, 27548, 27719 y 27721, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.79, 4.81 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.80, 4.82 y las tablas 4.66, 4.67 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

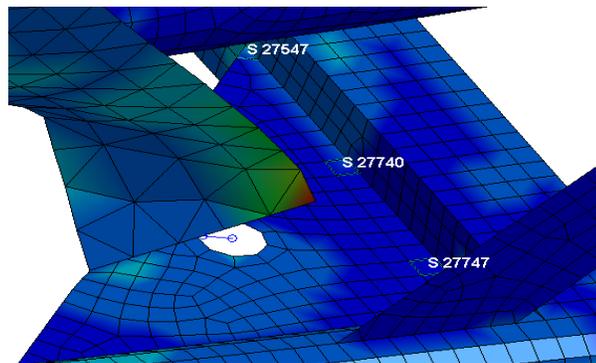


Figura 4. 79. Ubicación de los elementos N° 27547, 27740 y 27747. (Fuente: Autor)

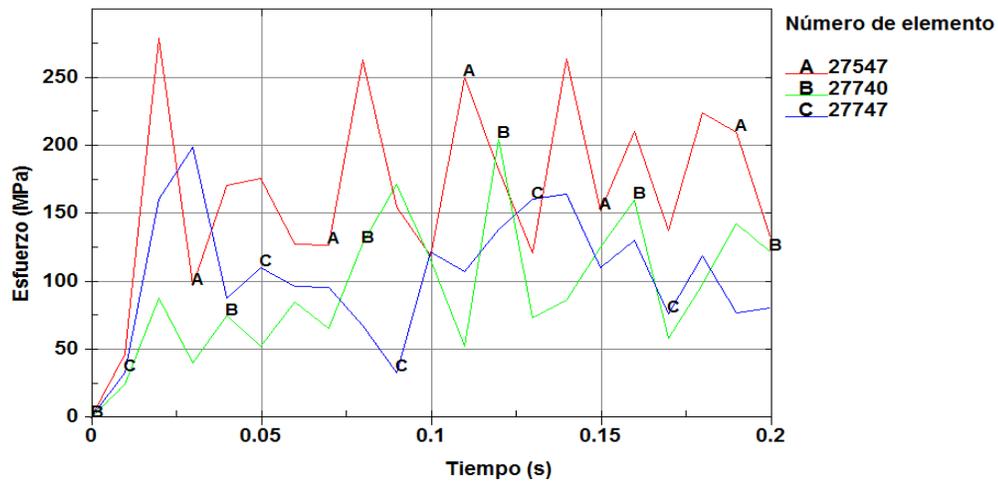


Figura 4. 80. Esfuerzos en los elementos N° 27547, 27740 y 27747. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 66. Esfuerzos en los elementos N° 27547, 27740 y 27747

ELEMENTO N° 27547		ELEMENTO N° 27740		ELEMENTO N° 27747	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	46,722	0,010	24,464	0,010	33,317
0,020	279,070	0,020	87,640	0,020	160,604
0,030	97,310	0,030	40,683	0,030	199,041
0,040	170,585	0,040	74,728	0,040	87,784
0,050	176,211	0,050	52,825	0,050	110,625
0,060	127,787	0,060	85,207	0,060	96,804
0,070	127,106	0,070	65,730	0,070	95,654
0,080	263,418	0,080	128,282	0,080	67,625
0,090	155,215	0,090	171,398	0,090	33,507
0,100	118,707	0,100	116,339	0,100	121,977
0,110	250,529	0,110	52,470	0,110	107,238
0,120	182,124	0,120	204,978	0,120	138,244
0,130	121,280	0,130	73,422	0,130	160,608
0,140	263,914	0,140	86,416	0,140	164,581
0,150	152,225	0,150	125,494	0,150	110,255
0,160	210,935	0,160	160,220	0,160	130,660
0,170	137,432	0,170	58,206	0,170	76,689
0,180	224,457	0,180	98,060	0,180	119,318
0,190	210,120	0,190	142,636	0,190	76,977
0,200	132,716	0,200	122,066	0,200	80,667

(Fuente: Autor)

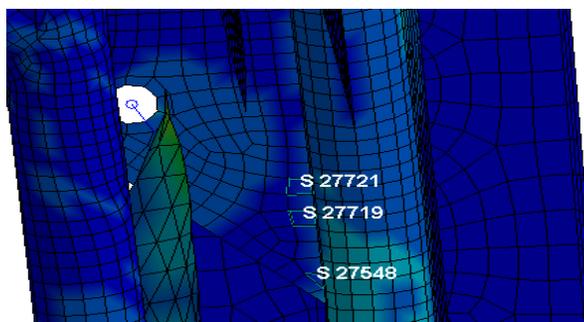


Figura 4. 81. Ubicación de los elementos N° 27548, 27719 y 27721. (Fuente: Autor)

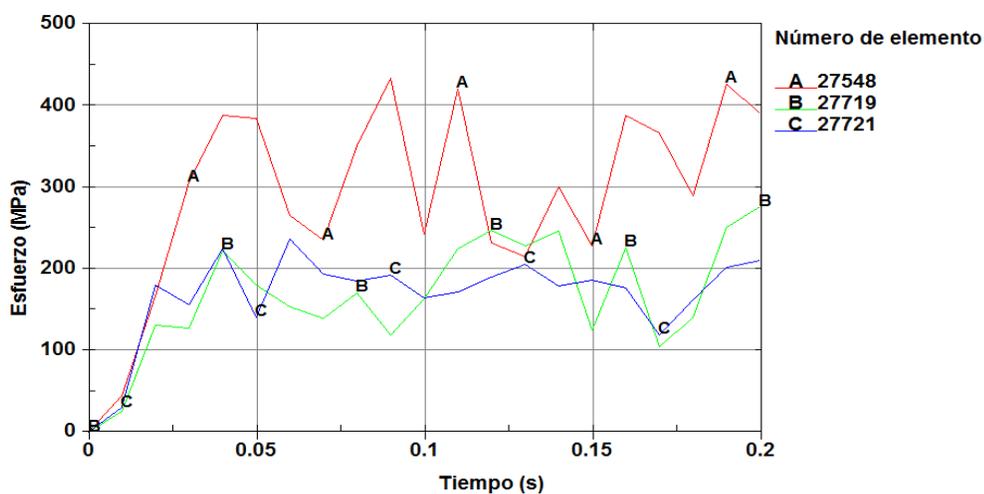


Figura 4. 82. Esfuerzos en los elementos N° 27548, 27719 y 27721. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 67. Esfuerzos en los elementos N° 27548, 27719 y 27721

ELEMENTO N° 27548		ELEMENTO N° 27719		ELEMENTO N° 27721	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	43,942	0,010	25,041	0,010	29,989
0,020	167,638	0,020	130,476	0,020	180,782
0,030	306,401	0,030	126,967	0,030	155,976
0,040	388,301	0,040	222,537	0,040	224,338
0,050	384,184	0,050	180,759	0,050	141,010
0,060	265,610	0,060	154,286	0,060	236,896
0,070	235,430	0,070	139,098	0,070	193,246
0,080	350,436	0,080	171,205	0,080	185,069
0,090	434,224	0,090	119,531	0,090	192,309
0,100	243,238	0,100	162,945	0,100	165,230

0,110	420,759	0,110	224,916	0,110	172,201
0,120	231,455	0,120	247,146	0,120	189,652
0,130	215,352	0,130	228,503	0,130	205,529
0,140	300,274	0,140	246,206	0,140	179,016
0,150	228,866	0,150	124,569	0,150	186,104
0,160	388,395	0,160	226,188	0,160	176,829
0,170	366,467	0,170	104,306	0,170	119,465
0,180	289,460	0,180	141,115	0,180	162,098
0,190	427,149	0,190	250,632	0,190	202,173
0,200	390,432	0,200	276,127	0,200	210,302

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 27548, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

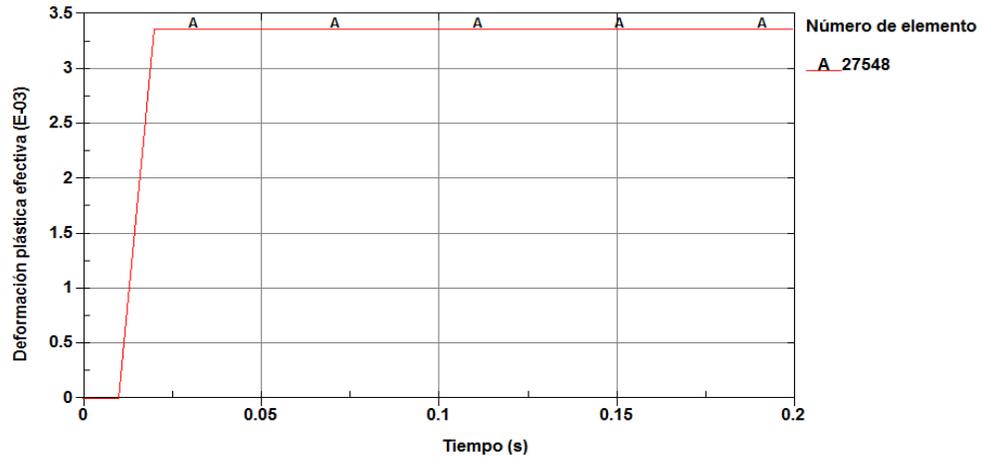


Figura 4. 83. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 27548. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 68. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 27548

ELEMENTO N° 27548	
Tiempo (s)	Deformación plástica efectiva
0,000	0,000
0,010	0,000
0,020	0,003
0,030	0,003
0,040	0,003
0,050	0,003
0,060	0,003
0,070	0,003

0,080	0,003
0,090	0,003
0,100	0,003
0,110	0,003
0,120	0,003
0,130	0,003
0,140	0,003
0,150	0,003
0,160	0,003
0,170	0,003
0,180	0,003
0,190	0,003
0,200	0,003

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 27548, su valor es de 424.224 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0.003; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia satisfactoriamente.

e) Deformaciones plásticas efectivas y desplazamientos en la estructura

A diferencia de la estructura original, la estructura modificada presenta notables mejorías en su desempeño durante el ensayo de resistencia teniendo un comportamiento más rígido, con menores deformaciones y resistencia total ya que los anclajes para cinturones de seguridad son capaces de soportar las cargas aplicadas en forma satisfactoria, además de que en la mayoría de ellos no se presentan deformaciones plásticas efectivas lo que significa que no se producen roturas.

En general se ha reducido la deformación plástica efectiva máxima de 0.616 a 0.37, es decir en un 40% encontrándose dentro de los límites máximos de los materiales, los cuales son 0.37 y 0.283 para los aceros ASTM A500 grado A y ASTM A36 respectivamente; por otra parte se ha reducido significativamente el desplazamiento total máximo en la base de la estructura pasando de 406.146

mm a 181.345 mm, lo que significa una reducción del 55%. Las figuras 4.84 y 4.85 muestran estos resultados.

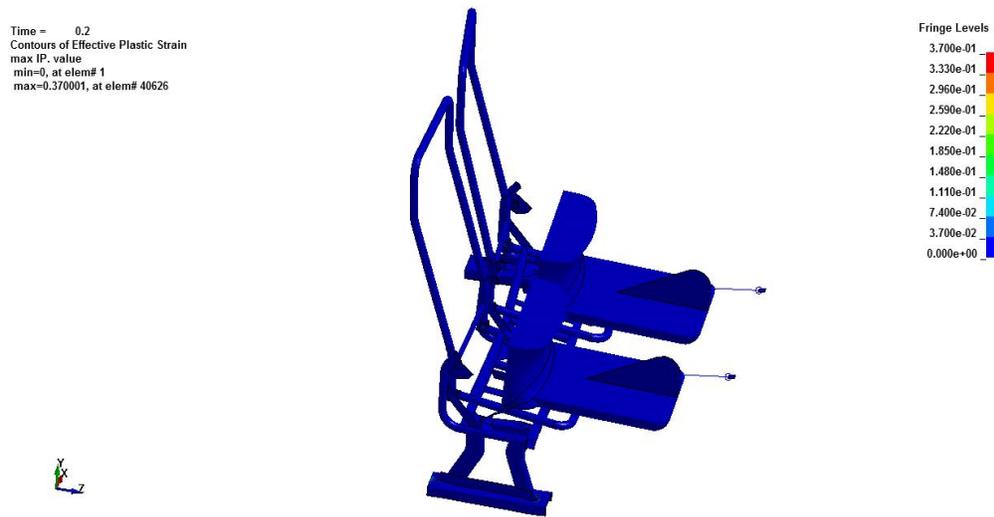


Figura 4. 84. Deformación plástica efectiva máxima en la estructura. (Fuente: Autor)

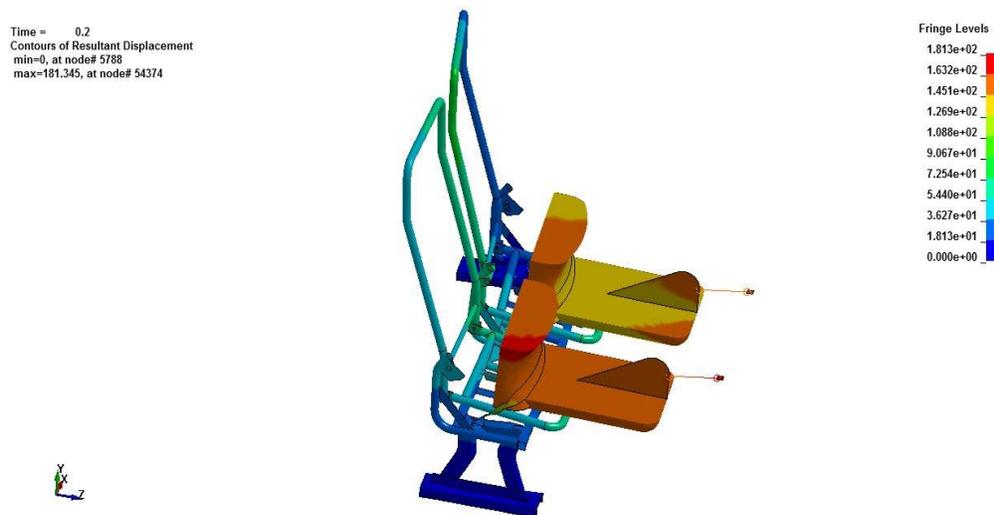


Figura 4. 85. Desplazamiento total máximo en la estructura. (Fuente: Autor)

Al tratarse de una simulación dinámica explícita, se verificó la validez de ésta por medio de la relación entre la energía interna del sistema y la energía de Hourglass, debiendo ser esta última menor al 10% de la energía interna.

En este caso la relación se cumple satisfactoriamente ya que la máxima relación de energías en esta simulación es de 0.5 %. La figura 4.86 muestra las curvas de energía y la tabla 4.69 muestra sus valores respectivos.

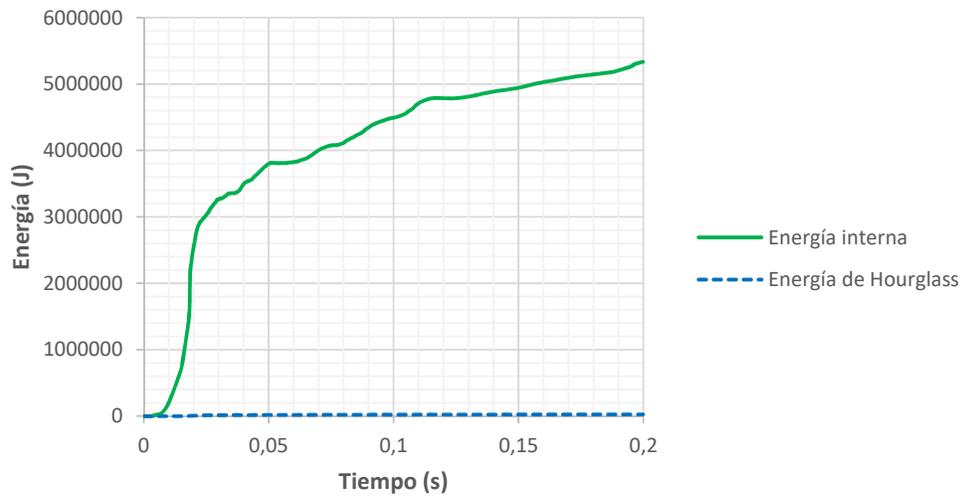


Figura 4. 86. Relación de energías de la simulación. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 69. Energías de la simulación

ENERGÍA INTERNA		ENERGÍA DE HOURGLASS		RELACIÓN DE ENERGÍAS
Tiempo (s)	Energía (J)	Tiempo (s)	Energía (J)	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%
0,010	169593,000	0,010	27,777	0,02%
0,020	2461700,000	0,020	6112,110	0,25%
0,030	3257160,000	0,030	14559,500	0,45%
0,040	3470850,000	0,040	16857,300	0,49%
0,050	3790320,000	0,050	18521,100	0,49%
0,060	3821510,000	0,060	19080,700	0,50%
0,070	3994520,000	0,070	20400,900	0,51%
0,080	4105040,000	0,080	20672,000	0,50%
0,090	4335640,000	0,090	21782,600	0,50%
0,100	4491540,000	0,100	22322,700	0,50%
0,110	4697380,000	0,110	23242,700	0,49%
0,120	4786180,000	0,120	23970,200	0,50%
0,130	4808130,000	0,130	23332,300	0,49%
0,140	4884660,000	0,140	24284,100	0,50%
0,150	4938640,000	0,150	24453,500	0,50%
0,160	5024850,000	0,160	25009,600	0,50%
0,170	5091080,000	0,170	25208,000	0,50%
0,180	5141110,000	0,180	25222,800	0,49%
0,190	5199420,000	0,190	25850,300	0,50%
0,200	5332490,000	0,200	26296,600	0,49%
0,200	5333820,000	0,200	26486,700	0,50%

(Fuente: Autor)

4.2.3.3. Simulación en un asiento con cinturones de seguridad de tres puntos

Al igual que las simulaciones con la estructura original, se utilizaron las mismas condiciones de evaluación para la estructura modificada. La figura 4.87 muestra el modelo digital utilizado y las condiciones para la simulación.

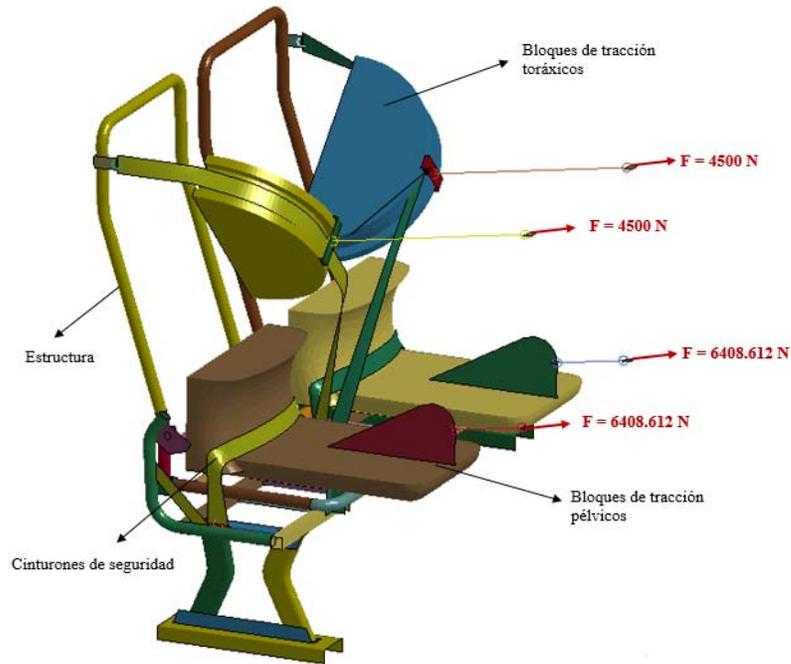


Figura 4. 87. Modelo y condiciones para la simulación. (Fuente: Autor)

4.2.3.3.1. Verificación de la calidad de la malla

El modelo fue mallado con *elementos cuadriláteros de tipo shell* en la estructura y bloques de tracción, mientras que en los cinturones de seguridad se utilizaron *elementos triangulares tipo shell*.

La malla está compuesta por 62557 elementos y 61688 nodos teniendo 58832 elementos cuadriláteros y 3725 elementos triangulares, la calidad de la malla se ha evaluado en base a la *relación de aspecto* de los elementos, teniendo una relación mínima de 1.29 y máxima de 6.58, los cuales son valores adecuados de calidad de malla en la que la mayoría de elementos se encuentran en los valores mínimos de relación de aspecto recomendados y muy pocos superan el valor recomendado máximo que es 5, esto se muestra a continuación:

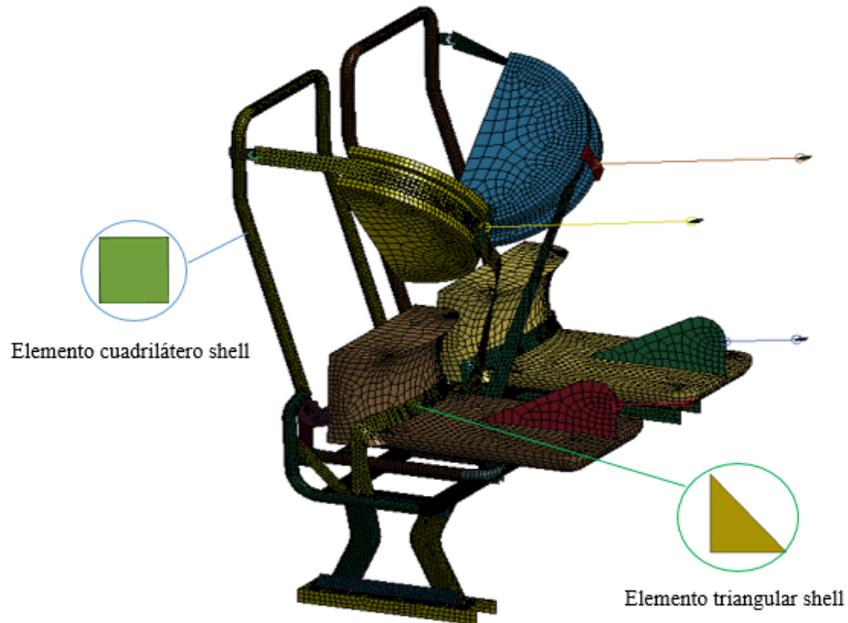


Figura 4. 88. Malla del modelo digital con elementos shell. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 70. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla

ELEMENTOS CUADRILÁTEROS		ELEMENTOS TRIANGULARES	
Relación de aspecto	Número de elementos	Relación de aspecto	Número de elementos
1,29	56659	1,29	3050
1,88	1770	1,88	585
2,47	356	2,47	18
3,05	32	3,05	4
3,64	10	3,64	6
4,23	1	4,23	3
4,82	3	4,82	10
5,4	1	5,4	46
5,99	0	5,99	1
6,58	0	6,58	2

(Fuente: Autor)

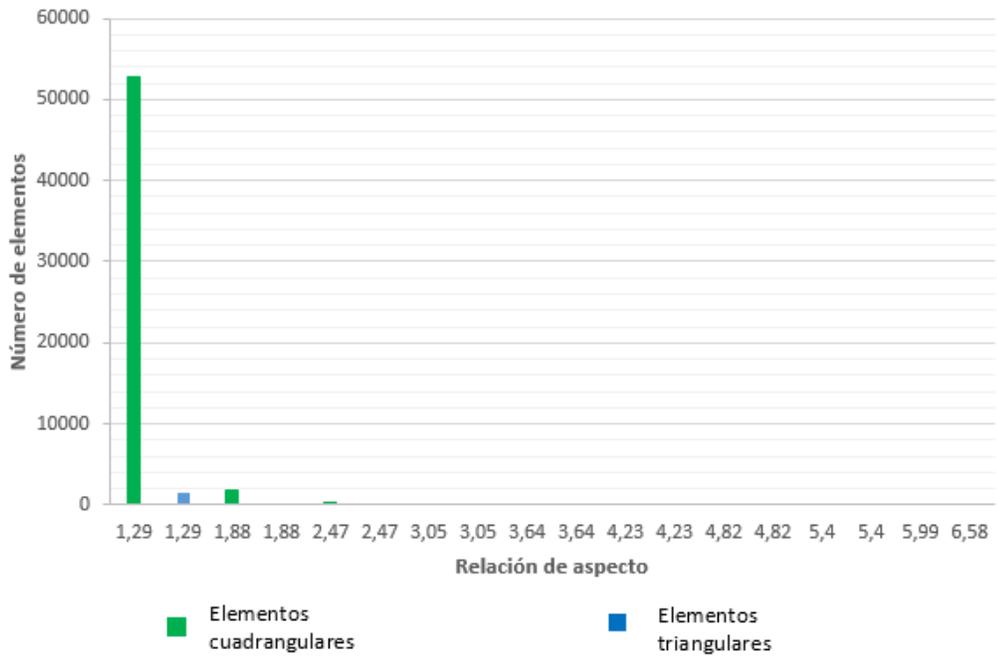
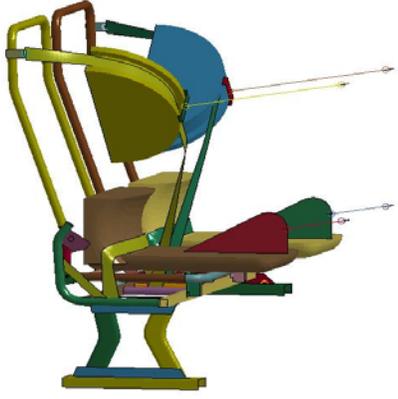
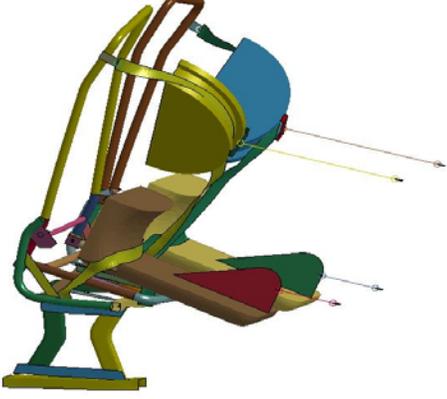
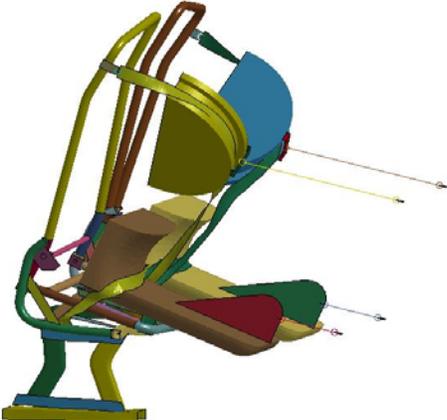
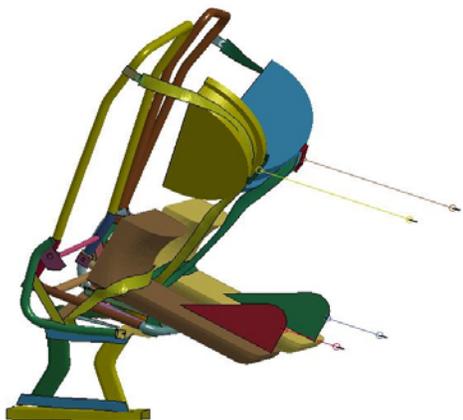


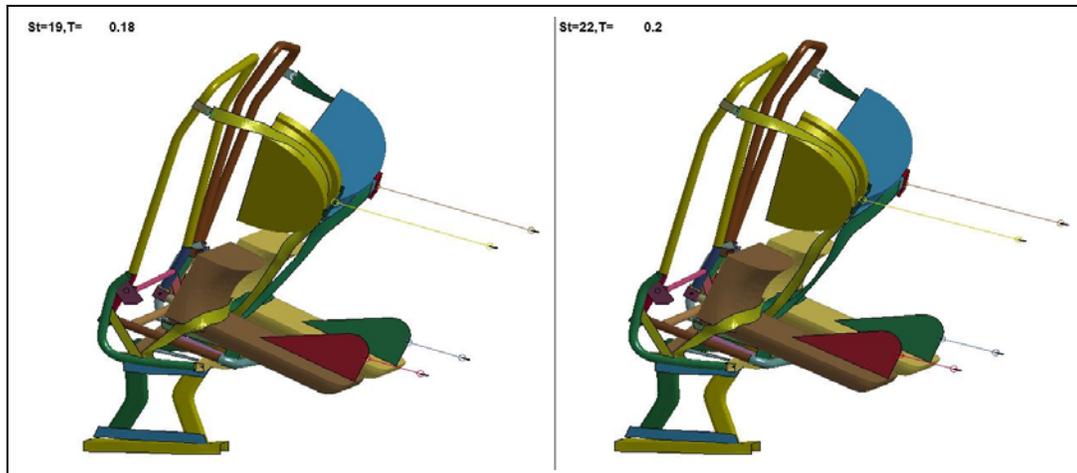
Figura 4. 89. Relaciones de aspecto de los elementos de la malla. (Fuente: Autor)

4.2.3.3.2. Resultados de la simulación

La tabla 4.71 muestra los resultados obtenidos de la simulación del ensayo, para la cual se utilizaron los modelos de materiales y condiciones descritas en las secciones 3.5.6 y 3.5.7 respectivamente.

Tabla 4. 71. Simulación del ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad en un asiento con cinturones de tres puntos

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
SIMULACIÓN DE ENSAYO DE RESISTENCIA DE ANCLAJES DE CINTURONES DE SEGURIDAD			
Normas aplicables:	NTE INEN 2704 con referencia al Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa		
Fecha de Ejecución:	27/10/2016	Realizado por:	Luis Martínez
		Revisado por:	Ing. Diego Núñez
Relación de aspecto mínima:	1.29	Relación de aspecto máxima:	6.58
Número de elementos:	62557	Número de nodos:	61688
Tiempo de procesamiento:	22 horas 28 minutos	Número de procesadores:	8
Tipo de cinturón de seguridad:	Cinturón con tres puntos de anclaje		
Tiempo de aplicación de la carga:	0.2 segundos		
RESULTADO DEL ENSAYO			
<p>St=1,T= 0</p> 		<p>St=6,T= 0.05</p> 	
<p>St=11,T= 0.1</p> 		<p>St=16,T= 0.15</p> 	



(Fuente: Autor)

Una vez realizada la simulación, se han analizado los resultados más importantes obtenidos, siendo éstos los esfuerzos en las zonas donde sería más probable que se produzcan roturas, tales zonas son las uniones entre los puntos de anclaje y la estructura del asiento, también se han analizado los desplazamientos y deformaciones plásticas efectivas (Anexo 13). A continuación se muestran los resultados obtenidos:

a) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior izquierdo

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 31724, 31726, 31757, 31746 y 31754, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.90, 4.92 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.91, 4.93 y las tablas 4.72, 4.73 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

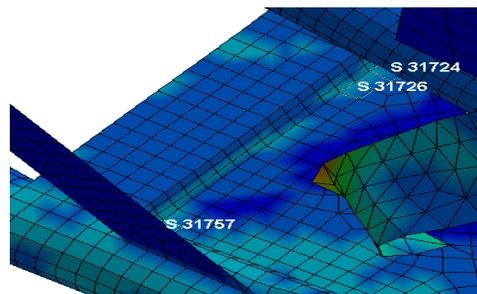


Figura 4. 90. Ubicación de los elementos N° 31724, 31726 y 31757. (Fuente: Autor)

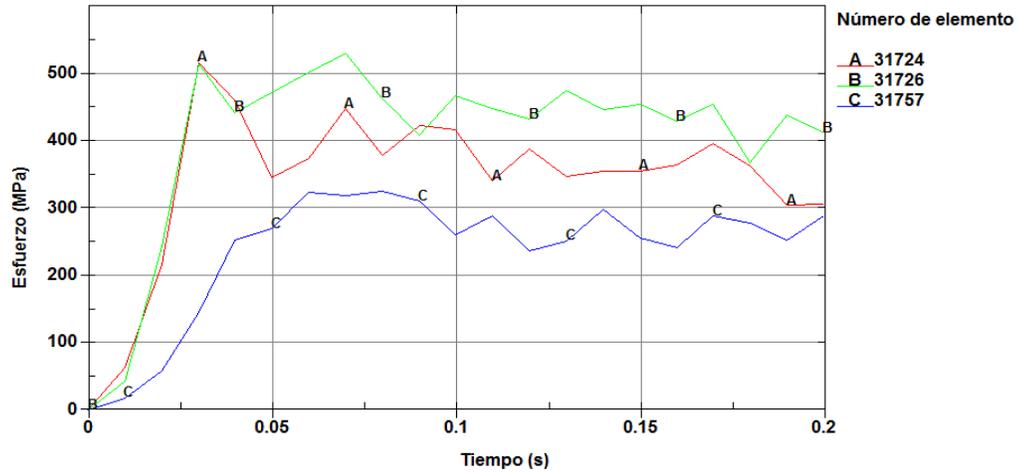


Figura 4. 91. Esfuerzos en los elementos N° 31724, 31726 y 31757. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 72. Esfuerzos en los elementos N° 31724, 31726 y 31757

ELEMENTO N° 31724		ELEMENTO N° 31726		ELEMENTO N° 31757	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	63,601	0,010	42,970	0,010	17,806
0,020	215,881	0,020	243,406	0,020	58,558
0,030	516,597	0,030	515,491	0,030	145,850
0,040	461,030	0,040	442,323	0,040	252,045
0,050	345,709	0,050	471,774	0,050	269,533
0,060	374,302	0,060	502,878	0,060	324,464
0,070	447,928	0,070	510,443	0,070	319,714
0,080	378,801	0,080	463,054	0,080	326,010
0,090	423,896	0,090	409,010	0,090	311,052
0,100	416,542	0,100	466,737	0,100	260,830
0,110	341,010	0,110	448,961	0,110	289,153
0,120	388,174	0,120	432,490	0,120	236,770
0,130	347,117	0,130	475,349	0,130	251,507
0,140	355,737	0,140	447,501	0,140	299,131
0,150	355,502	0,150	454,616	0,150	256,059
0,160	364,808	0,160	428,828	0,160	241,636
0,170	396,911	0,170	454,030	0,170	288,172
0,180	362,757	0,180	368,267	0,180	278,601
0,190	304,609	0,190	438,681	0,190	252,703
0,200	306,696	0,200	411,757	0,200	289,622

(Fuente: Autor)

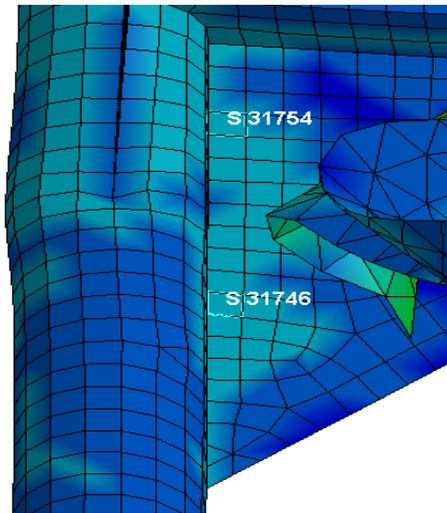


Figura 4. 92. Ubicación de los elementos N° 31746 y 31754. (Fuente: Autor)

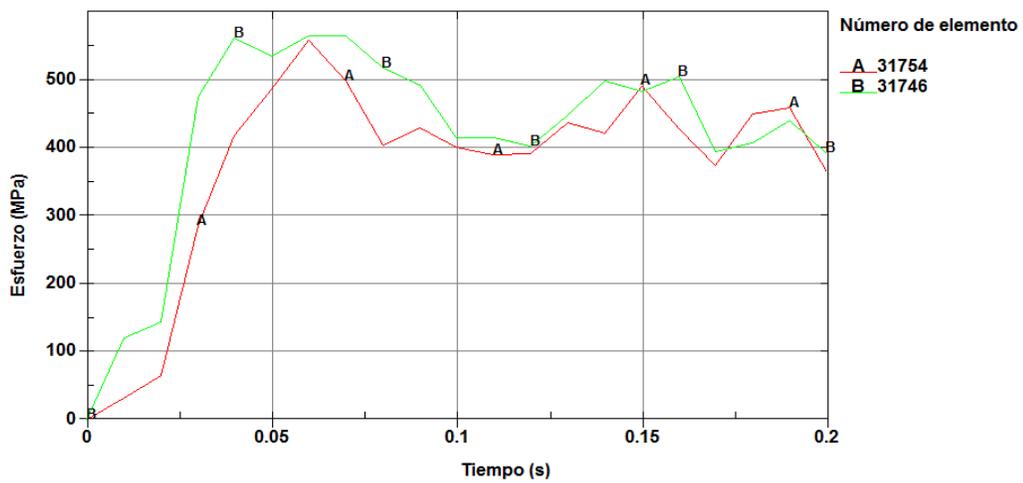


Figura 4. 93. Esfuerzos en los elementos N° 31746 y 31754. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 73. Esfuerzos en los elementos N° 31746 y 31754

ELEMENTO N° 31746		ELEMENTO N° 31754	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	120,317	0,010	31,533
0,020	143,398	0,020	64,342
0,030	475,503	0,030	285,271
0,040	531,512	0,040	417,973
0,050	515,706	0,050	486,154
0,060	534,662	0,060	539,274

0,070	535,232	0,070	498,770
0,080	517,733	0,080	404,721
0,090	492,094	0,090	429,758
0,100	415,474	0,100	401,146
0,110	415,371	0,110	389,852
0,120	401,938	0,120	391,532
0,130	447,809	0,130	437,824
0,140	499,674	0,140	421,112
0,150	483,553	0,150	491,278
0,160	504,835	0,160	427,128
0,170	394,935	0,170	373,823
0,180	407,486	0,180	449,974
0,190	440,784	0,190	459,137
0,200	391,739	0,200	365,090

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 31754, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

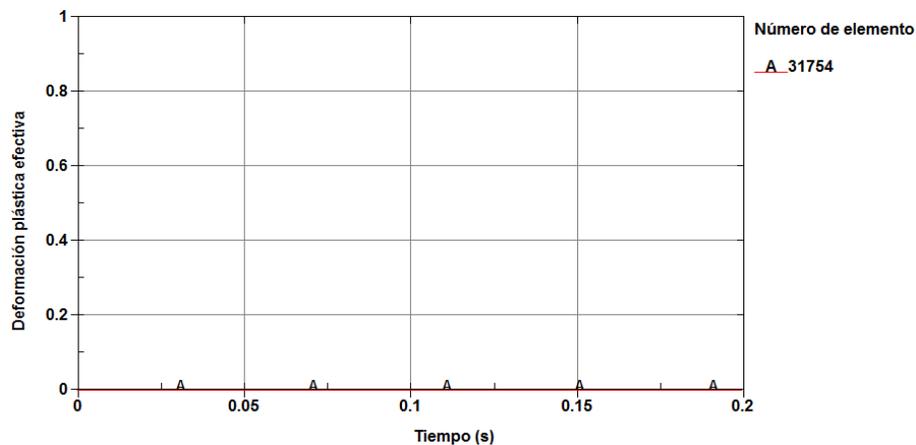


Figura 4. 94. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31754. (Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 31754, su valor es de 539.274 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0 durante toda la simulación, por lo tanto este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia debido a que los esfuerzos producidos en las regiones de contacto con la estructura se encuentran por debajo del esfuerzo máximo promedio del material, el cual es 511.980 MPa, aunque se supere por

poco este valor con el esfuerzo máximo obtenido éste no es constante y disminuye de inmediato.

b) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior medio izquierdo

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 31133, 31140, 31144, 31095, 31099 y 31106, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.95, 4.97 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.96, 4.98 y las tablas 4.74, 4.75 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

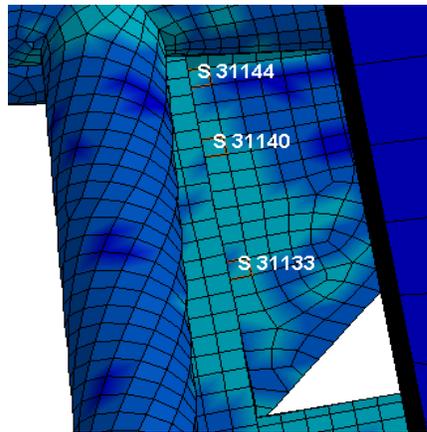


Figura 4. 95. Ubicación de los elementos N° 31133, 31140 y 31144. (Fuente: Autor)

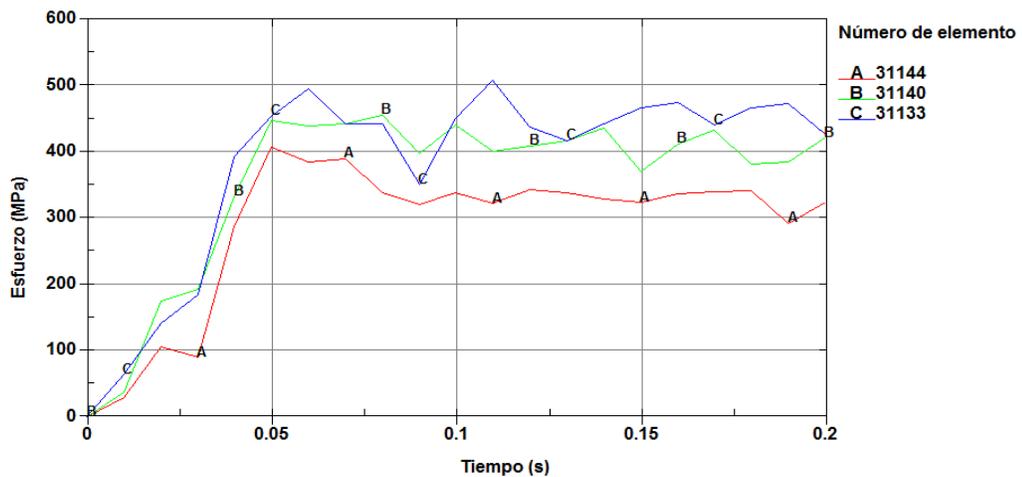


Figura 4. 96. Esfuerzos en los elementos N° 31133, 31140 y 31144. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 74. Esfuerzos en los elementos N° 31133, 31140 y 31144

ELEMENTO N° 31133		ELEMENTO N° 31140		ELEMENTO N° 31144	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	64,148	0,010	36,958	0,010	28,647
0,020	140,914	0,020	175,429	0,020	106,383
0,030	184,071	0,030	192,905	0,030	89,720
0,040	393,256	0,040	332,455	0,040	286,762
0,050	454,456	0,050	447,731	0,050	407,784
0,060	496,006	0,060	439,002	0,060	385,638
0,070	442,942	0,070	443,150	0,070	389,914
0,080	442,174	0,080	455,823	0,080	338,177
0,090	351,227	0,090	398,636	0,090	320,329
0,100	450,436	0,100	441,409	0,100	339,148
0,110	508,514	0,110	400,744	0,110	322,165
0,120	438,743	0,120	409,264	0,120	343,885
0,130	417,379	0,130	417,589	0,130	337,969
0,140	442,049	0,140	435,765	0,140	328,870
0,150	466,511	0,150	371,201	0,150	323,459
0,160	475,240	0,160	412,955	0,160	337,121
0,170	441,062	0,170	432,689	0,170	340,884
0,180	466,560	0,180	381,266	0,180	340,951
0,190	473,603	0,190	384,236	0,190	292,697
0,200	426,891	0,200	421,478	0,200	323,684

(Fuente: Autor)

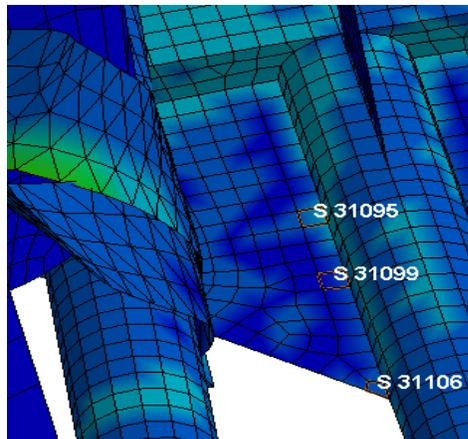


Figura 4. 97. Ubicación de los elementos N° 31095, 31099 y 31106. (Fuente: Autor)

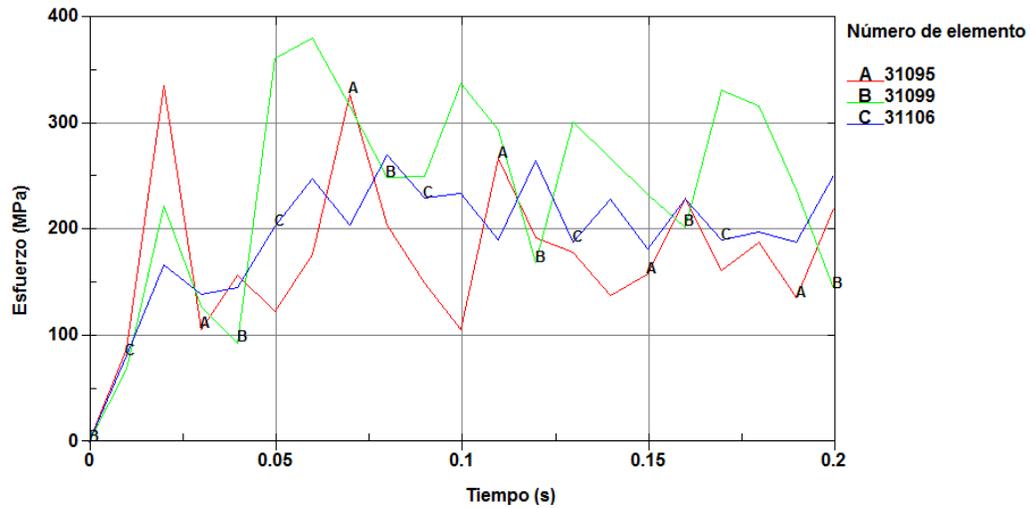


Figura 4. 98. Esfuerzos en los elementos N° 31095, 31099 y 31106. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 75. Esfuerzos en los elementos N° 31095, 31099 y 31106

ELEMENTO N° 31095		ELEMENTO N° 31099		ELEMENTO N° 31106	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	87,689	0,010	68,467	0,010	81,114
0,020	335,949	0,020	222,507	0,020	167,370
0,030	105,968	0,030	127,284	0,030	138,820
0,040	157,579	0,040	93,173	0,040	145,589
0,050	123,284	0,050	361,330	0,050	203,024
0,060	176,664	0,060	381,165	0,060	247,811
0,070	327,296	0,070	316,433	0,070	204,809
0,080	204,562	0,080	249,123	0,080	270,106
0,090	149,548	0,090	250,145	0,090	229,767
0,100	105,481	0,100	337,563	0,100	233,828
0,110	267,362	0,110	293,800	0,110	190,670
0,120	192,451	0,120	168,895	0,120	265,435
0,130	179,130	0,130	302,016	0,130	187,798
0,140	137,533	0,140	267,602	0,140	228,988
0,150	157,828	0,150	233,160	0,150	181,448
0,160	229,957	0,160	202,395	0,160	229,021
0,170	161,531	0,170	331,625	0,170	190,096
0,180	187,825	0,180	316,642	0,180	197,684
0,190	135,738	0,190	237,641	0,190	188,514
0,200	220,000	0,200	144,036	0,200	250,868

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 31133, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

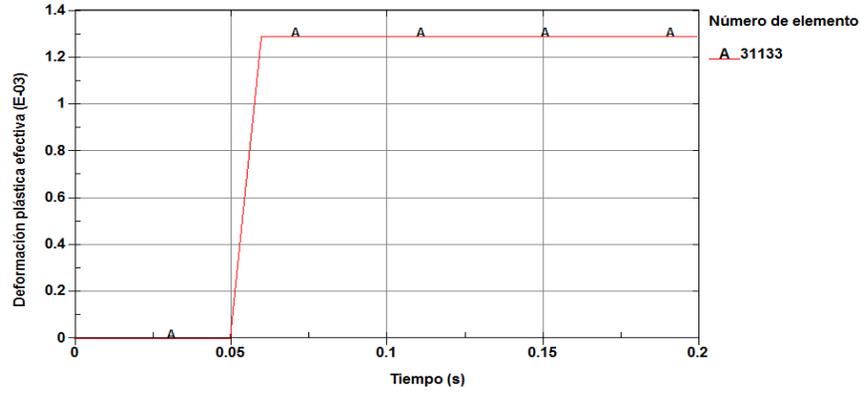


Figura 4. 99. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31133. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 76. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31133

ELEMENTO N° 31133	
Tiempo (s)	Deformación plástica efectiva
0,000	0,000
0,010	0,000
0,020	0,000
0,030	0,000
0,040	0,000
0,050	0,000
0,060	0,001
0,070	0,001
0,080	0,001
0,090	0,001
0,100	0,001
0,110	0,001
0,120	0,001
0,130	0,001
0,140	0,001
0,150	0,001
0,160	0,001
0,170	0,001
0,180	0,001
0,190	0,001
0,200	0,001

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 31133, su valor es de 508.514 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0.001; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia satisfactoriamente.

c) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior medio derecho

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 31503, 31507, 31553, 31534, 31540 y 31552, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.100, 4.102 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.101, 4.103 y las tablas 4.77, 4.78 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

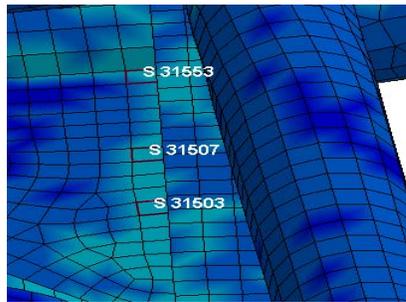


Figura 4. 100. Ubicación de los elementos N° 31503, 31507 y 31553. (Fuente: Autor)

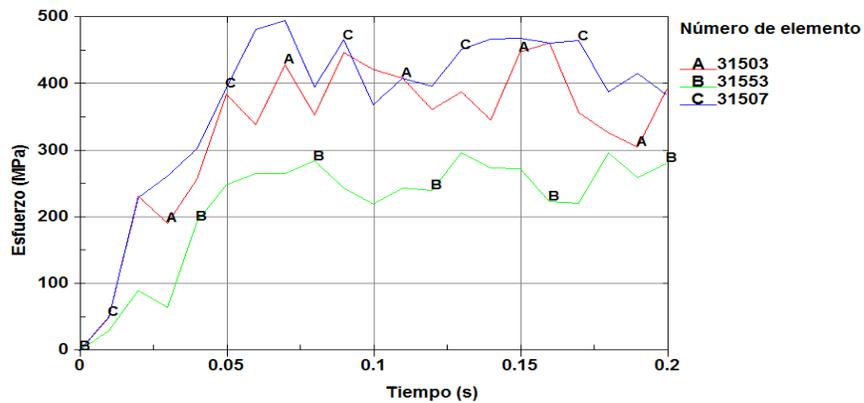


Figura 4. 101. Esfuerzos en los elementos N° 31503, 31507 y 31553. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 77. Esfuerzos en los elementos N° 31503, 31507 y 31553

ELEMENTO N° 31503		ELEMENTO N° 31507		ELEMENTO N° 31553	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	49,113	0,010	50,920	0,010	30,583
0,020	231,594	0,020	229,889	0,020	89,593
0,030	191,167	0,030	261,824	0,030	65,156
0,040	256,616	0,040	303,294	0,040	193,772
0,050	385,205	0,050	393,968	0,050	249,024
0,060	338,577	0,060	481,980	0,060	265,517
0,070	429,379	0,070	495,630	0,070	266,149
0,080	353,301	0,080	394,969	0,080	284,362
0,090	446,622	0,090	466,249	0,090	243,629
0,100	421,544	0,100	368,935	0,100	219,709
0,110	409,125	0,110	408,121	0,110	243,535
0,120	361,954	0,120	396,450	0,120	240,416
0,130	387,967	0,130	451,515	0,130	296,357
0,140	345,836	0,140	467,528	0,140	273,944
0,150	447,818	0,150	468,686	0,150	273,436
0,160	462,085	0,160	461,674	0,160	223,650
0,170	356,793	0,170	464,799	0,170	221,390
0,180	326,420	0,180	388,097	0,180	296,365
0,190	305,740	0,190	415,946	0,190	259,485
0,200	392,551	0,200	383,083	0,200	281,525

(Fuente: Autor)

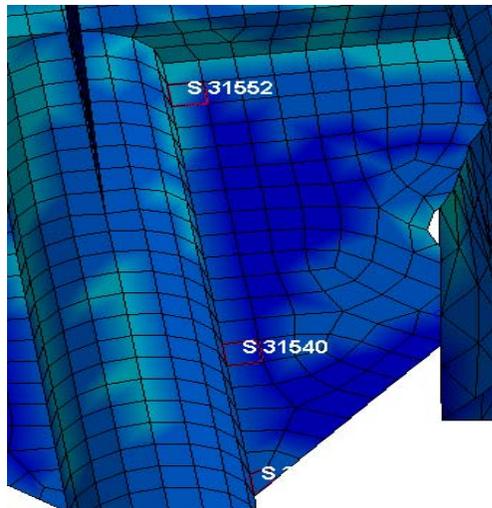


Figura 4. 102. Ubicación de los elementos N° 31534, 31540 y 31552. (Fuente: Autor)

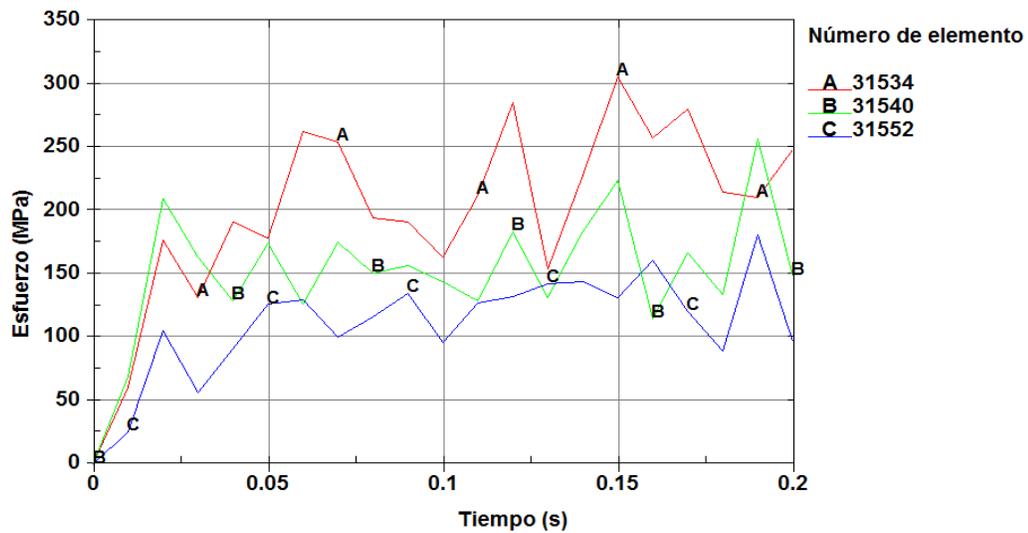


Figura 4. 103. Esfuerzos en los elementos N° 31534, 31540 y 31552. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 78. Esfuerzos en los elementos N° 31534, 31540 y 31552

ELEMENTO N° 31534		ELEMENTO N° 31540		ELEMENTO N° 31552	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	60,191	0,010	69,223	0,010	25,438
0,020	176,929	0,020	209,865	0,020	104,898
0,030	131,659	0,030	163,118	0,030	56,627
0,040	190,696	0,040	128,762	0,040	90,781
0,050	178,347	0,050	174,328	0,050	125,916
0,060	262,347	0,060	125,849	0,060	129,413
0,070	254,265	0,070	175,106	0,070	99,963
0,080	194,548	0,080	150,854	0,080	116,212
0,090	191,144	0,090	156,552	0,090	134,879
0,100	163,145	0,100	144,142	0,100	96,174
0,110	212,249	0,110	128,333	0,110	126,725
0,120	285,190	0,120	183,548	0,120	131,962
0,130	154,159	0,130	131,493	0,130	142,361
0,140	227,972	0,140	183,769	0,140	144,203
0,150	305,482	0,150	224,016	0,150	131,016
0,160	257,302	0,160	114,787	0,160	160,287
0,170	279,984	0,170	166,890	0,170	120,351
0,180	214,209	0,180	133,367	0,180	89,171
0,190	210,166	0,190	256,738	0,190	180,817
0,200	248,119	0,200	148,484	0,200	96,583

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 31507, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

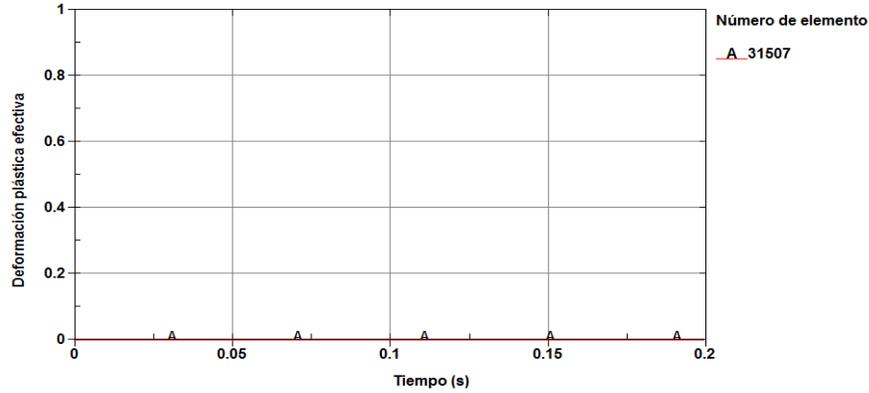


Figura 4. 104. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31507. (Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 31507, su valor es de 495.6 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0 durante toda la simulación; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia satisfactoriamente.

d) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje inferior derecho

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 31145, 31349, 31315, 31327 y 31330, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las figuras 4.105, 4.107 muestran la ubicación de los elementos analizados, mientras que las figuras 4.106, 4.108 y las tablas 4.79, 4.80 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

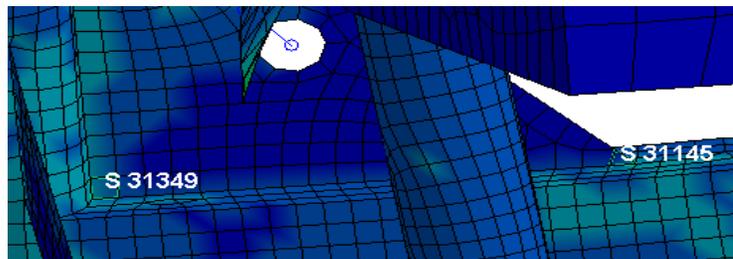


Figura 4. 105. Ubicación de los elementos N° 31145 y 31349. (Fuente: Autor)

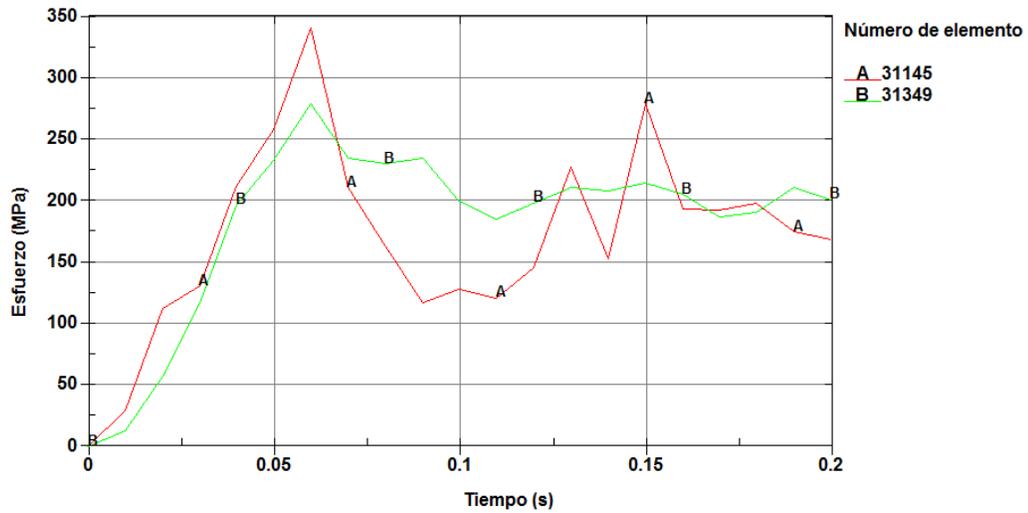


Figura 4. 106. Esfuerzos en los elementos N° 31145 y 31349. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 79. Esfuerzos en los elementos N° 31145 y 31349

ELEMENTO N° 31145		ELEMENTO N° 31349	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	29,786	0,010	12,736
0,020	112,510	0,020	57,524
0,030	130,361	0,030	116,530
0,040	211,823	0,040	196,337
0,050	257,498	0,050	232,712
0,060	340,349	0,060	278,624
0,070	210,863	0,070	235,306
0,080	162,809	0,080	229,968
0,090	117,275	0,090	234,897
0,100	128,345	0,100	199,845
0,110	121,027	0,110	185,476
0,120	145,259	0,120	198,216
0,130	227,356	0,130	210,721
0,140	152,568	0,140	208,589
0,150	278,954	0,150	214,599
0,160	193,278	0,160	205,034
0,170	192,653	0,170	186,619
0,180	198,449	0,180	190,339
0,190	174,661	0,190	210,960
0,200	168,302	0,200	200,793

(Fuente: Autor)

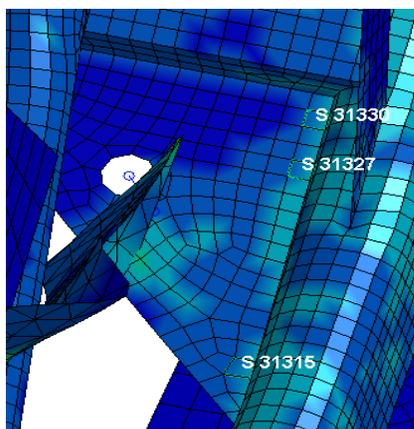


Figura 4. 107. Ubicación de los elementos N° 31315, 31327 y 31330. (Fuente: Autor)

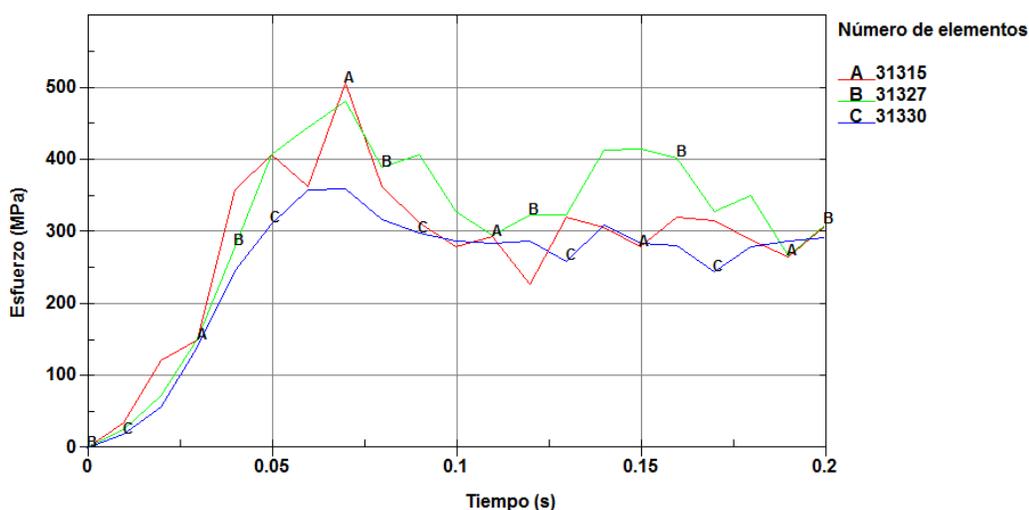


Figura 4. 108. Esfuerzos en los elementos N° 31315, 31327 y 31330. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 80. Esfuerzos en los elementos N° 31315, 31327 y 31330

ELEMENTO N° 31315		ELEMENTO N° 31327		ELEMENTO N° 31330	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	34,514	0,010	25,980	0,010	18,342
0,020	120,793	0,020	72,956	0,020	56,553
0,030	149,750	0,030	151,286	0,030	140,339
0,040	358,591	0,040	279,807	0,040	246,400
0,050	406,734	0,050	407,474	0,050	311,312
0,060	362,914	0,060	445,470	0,060	357,937

0,070	506,095	0,070	482,136	0,070	360,245
0,080	363,224	0,080	389,977	0,080	318,137
0,090	312,199	0,090	406,759	0,090	298,293
0,100	279,487	0,100	327,886	0,100	287,074
0,110	293,677	0,110	295,911	0,110	284,606
0,120	227,954	0,120	323,543	0,120	287,971
0,130	319,985	0,130	324,087	0,130	259,551
0,140	306,790	0,140	413,748	0,140	308,948
0,150	278,950	0,150	415,326	0,150	284,385
0,160	321,114	0,160	402,755	0,160	280,841
0,170	316,276	0,170	328,970	0,170	244,690
0,180	289,106	0,180	350,315	0,180	279,719
0,190	265,602	0,190	267,122	0,190	286,990
0,200	307,844	0,200	309,901	0,200	291,908

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 31315, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

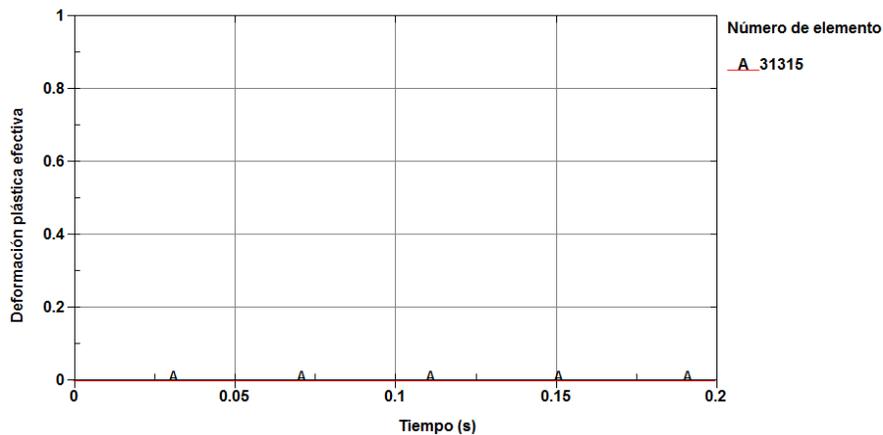


Figura 4. 109. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 31315. (Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 31315, su valor es de 506.095 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0 durante toda la simulación; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia satisfactoriamente.

e) **Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje superior izquierdo**

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 44286 y 44339, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, la figura 4.110 muestra la ubicación de los elementos analizados, mientras que la figura 4.111 y la tabla 4.81 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

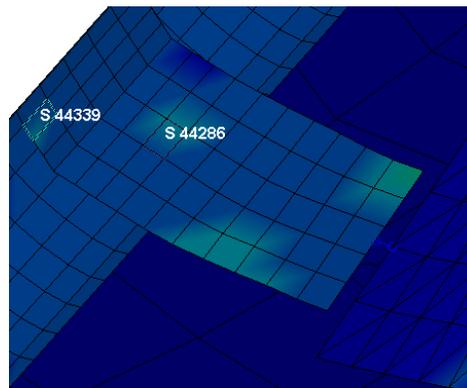


Figura 4. 110. Ubicación de los elementos N° 44286 y 44339. (Fuente: Autor)

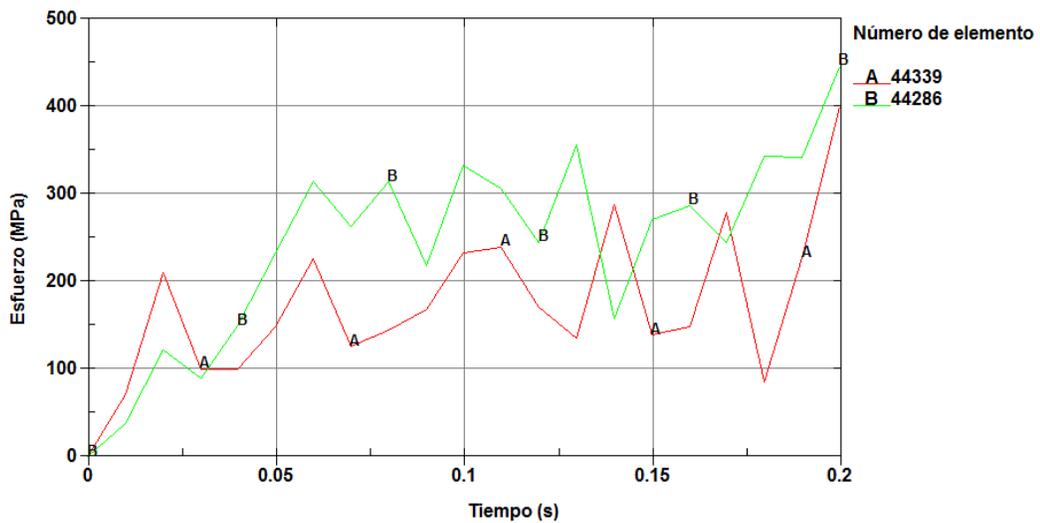


Figura 4. 111. Esfuerzos en los elementos N° 44286 y 44339. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 81. Esfuerzos en los elementos N° 44286 y 44339

ELEMENTO N° 44286		ELEMENTO N° 44339	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	37,534	0,010	70,600
0,020	121,885	0,020	210,515
0,030	89,686	0,030	100,049
0,040	149,659	0,040	100,521
0,050	232,469	0,050	149,232
0,060	314,932	0,060	226,515
0,070	263,266	0,070	125,998
0,080	314,247	0,080	144,201
0,090	218,071	0,090	169,003
0,100	332,643	0,100	232,305
0,110	307,121	0,110	239,551
0,120	245,146	0,120	170,976
0,130	356,261	0,130	135,695
0,140	158,181	0,140	287,831
0,150	270,399	0,150	138,928
0,160	286,860	0,160	148,126
0,170	244,249	0,170	279,337
0,180	343,039	0,180	85,279
0,190	342,333	0,190	227,115
0,200	446,225	0,200	400,347

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 44286, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

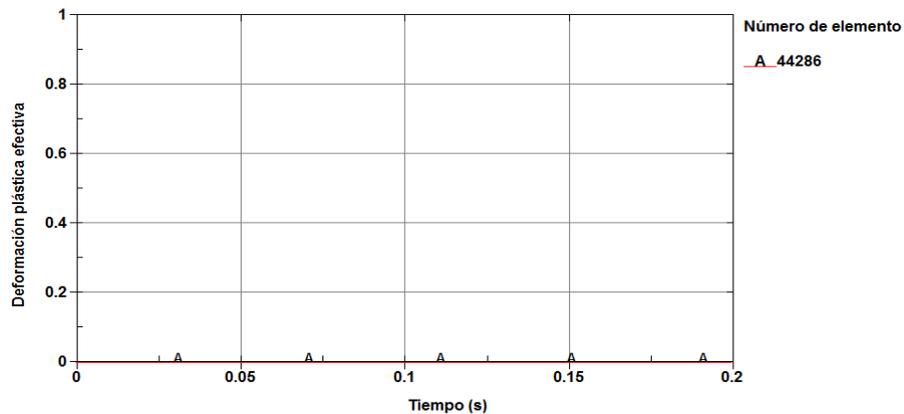


Figura 4. 112. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 44286. (Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 44286, su valor es de 446.225 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0 durante toda la simulación; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia satisfactoriamente.

f) Esfuerzos y deformaciones plásticas efectivas en el anclaje superior derecho

En este anclaje se han evaluado los esfuerzos en los elementos N° 44238, 44321 y 44322, los cuales se encuentran en las zonas de mayor concentración de esfuerzos, la figura 4.113 muestra la ubicación de los elementos analizados, mientras que la figura 4.114 y las tabla 4.82 muestran los esfuerzos producidos en dichos elementos.

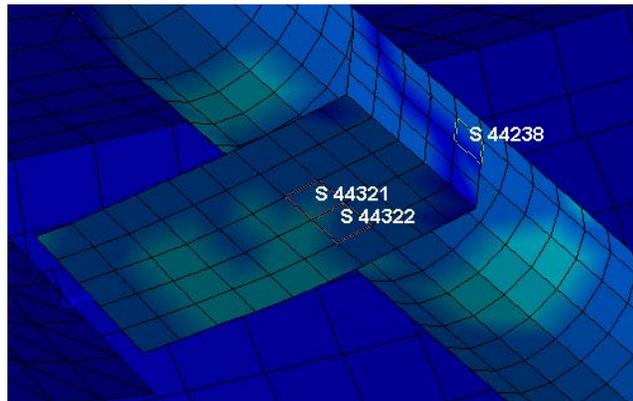


Figura 4. 113. Ubicación de los elementos N° 44238, 44321 y 44322. (Fuente: Autor)

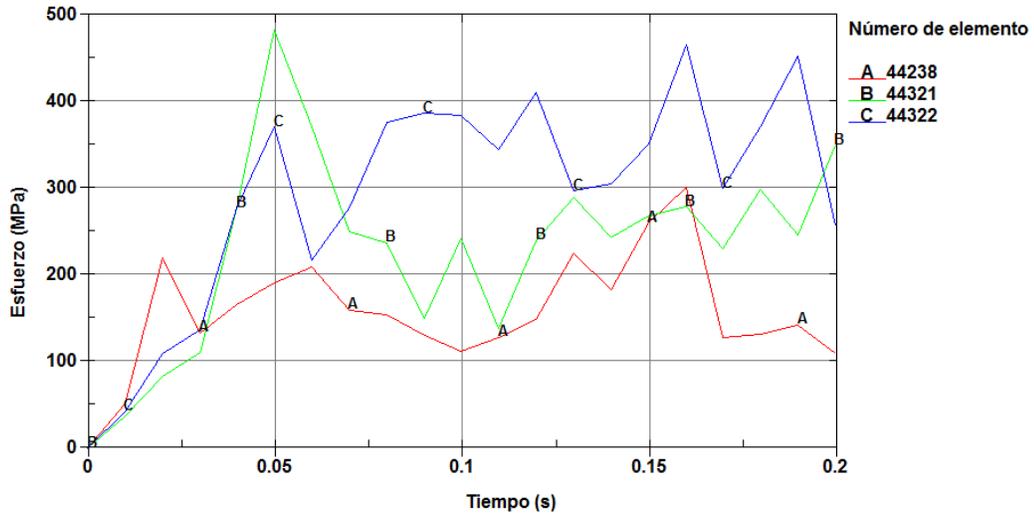


Figura 4. 114. Esfuerzos en los elementos N° 44238, 44321 y 44322. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 82. Esfuerzos en los elementos N° 44238, 44321 y 44322

ELEMENTO N° 44238		ELEMENTO N° 44321		ELEMENTO N° 44322	
Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)	Tiempo (s)	Esfuerzo (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,010	51,664	0,010	36,987	0,010	42,291
0,020	220,098	0,020	82,314	0,020	109,275
0,030	133,054	0,030	110,008	0,030	136,647
0,040	165,847	0,040	276,943	0,040	277,360
0,050	191,402	0,050	482,395	0,050	370,395
0,060	209,057	0,060	371,251	0,060	216,816
0,070	159,302	0,070	250,324	0,070	277,197
0,080	153,622	0,080	237,158	0,080	376,719
0,090	130,628	0,090	149,700	0,090	386,783
0,100	111,965	0,100	242,720	0,100	383,926
0,110	127,900	0,110	138,785	0,110	344,908
0,120	149,219	0,120	239,631	0,120	410,795
0,130	225,039	0,130	289,828	0,130	297,237
0,140	182,279	0,140	243,166	0,140	304,965
0,150	260,077	0,150	268,616	0,150	351,724
0,160	301,807	0,160	278,602	0,160	466,260
0,170	127,591	0,170	230,162	0,170	299,916
0,180	132,159	0,180	299,082	0,180	371,403
0,190	142,173	0,190	245,728	0,190	452,706
0,200	109,481	0,200	349,602	0,200	257,068

(Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo de este anclaje se localiza en el elemento N° 44321, por lo que se ha analizado también la deformación plástica efectiva en este elemento, estos resultados se muestran a continuación:

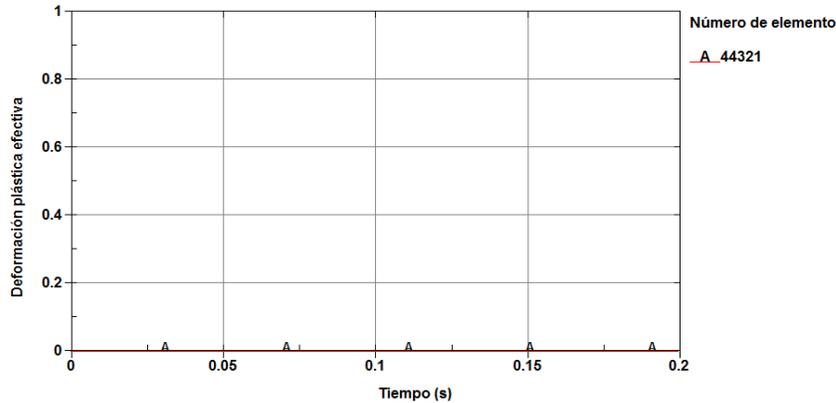


Figura 4. 115. Deformación plástica efectiva en el elemento N° 44321. (Fuente: Autor)

El esfuerzo máximo obtenido se localiza en el elemento N° 44321, su valor es de 482.395 MPa, mientras que la deformación plástica efectiva máxima en este elemento es de 0 durante toda la simulación; estos resultados se encuentran por debajo de los valores máximos que el material puede soportar, los cuales son 511.980 MPa y 0.283 respectivamente, por lo que este anclaje es capaz de soportar el ensayo de resistencia satisfactoriamente.

g) Deformaciones plásticas efectivas y desplazamientos en la estructura

A diferencia de la estructura original, la estructura modificada presenta notables mejorías en su desempeño durante el ensayo de resistencia teniendo un comportamiento más rígido, con menores deformaciones y resistencia total ya que los anclajes para cinturones de seguridad son capaces de soportar las cargas aplicadas en forma satisfactoria, además de que en la mayoría de ellos no se presentan deformaciones plásticas efectivas lo que significa que no se producen roturas.

En general se ha reducido la deformación plástica efectiva máxima de 0.674 a 0.41, es decir en un 40% encontrándose muy cerca de los límites máximos de los materiales, los cuales son 0.37 y 0.283 para los aceros ASTM A500 grado A y ASTM A36 respectivamente; por otra parte se ha reducido

significativamente el desplazamiento total máximo de la estructura en la zona superior de los espaldares pasando de 1015.17 mm a 549.33 mm, lo que significa una reducción del 46%. Las figuras 4.116 y 4.117 muestran estos resultados.



Figura 4. 116. Deformación plástica efectiva máxima en la estructura. (Fuente: Autor)

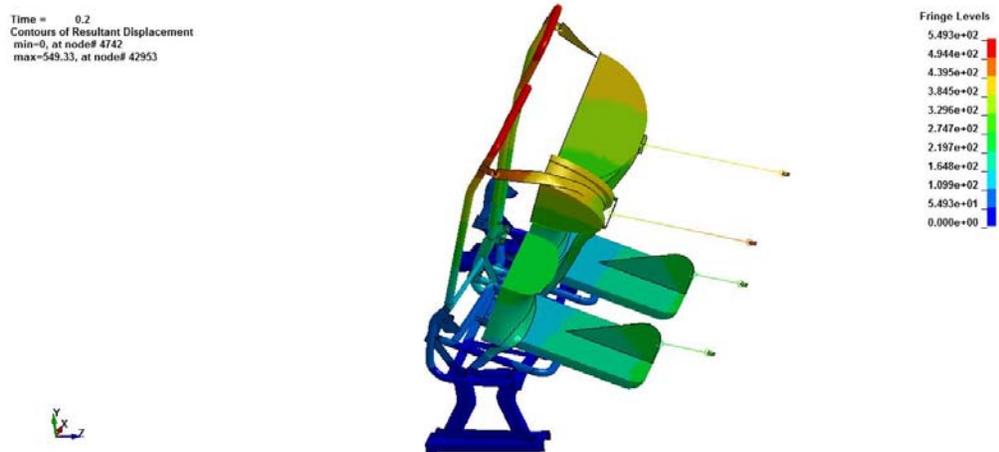


Figura 4. 117. Desplazamiento total máximo en la estructura. (Fuente: Autor)

Al tratarse de una simulación dinámica explícita, se verificó la validez de ésta por medio de la relación entre la energía interna del sistema y la energía de Hourglass, debiendo ser esta última menor al 10% de la energía interna.

En este caso la relación se cumple satisfactoriamente ya que la máxima relación de energías en esta simulación es de 0.8 %. La figura 4.118 muestra las curvas de energía y la tabla 4.83 muestra sus valores respectivos.

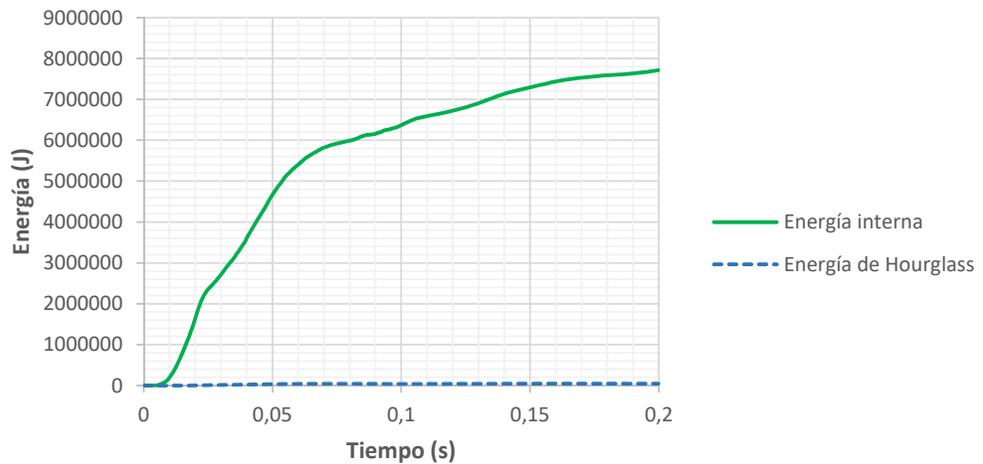


Figura 4. 118. Relación de energías de la simulación. (Fuente: Autor)

Tabla 4. 83. Energías de la simulación

ENERGÍA INTERNA		ENERGÍA DE HOURGLASS		RELACIÓN DE ENERGÍAS
Tiempo (s)	Energía (J)	Tiempo (s)	Energía (J)	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%
0,010	193851,000	0,010	65,030	0,03%
0,020	1638120,000	0,020	4177,030	0,25%
0,030	2712930,000	0,030	16187,100	0,60%
0,040	3610260,000	0,040	26089,200	0,72%
0,050	4663630,000	0,050	35762,000	0,77%
0,060	5403370,000	0,060	43065,500	0,80%
0,070	5820470,000	0,070	45113,000	0,78%
0,080	5988700,000	0,080	45154,000	0,75%
0,090	6156330,000	0,090	43378,800	0,70%
0,100	6369350,000	0,100	41893,800	0,66%
0,110	6585190,000	0,110	42836,800	0,65%
0,120	6716070,000	0,120	43854,400	0,65%
0,130	6898310,000	0,130	45496,200	0,66%
0,140	7125220,000	0,140	46449,100	0,65%
0,150	7286700,000	0,150	47941,300	0,66%
0,160	7432210,000	0,160	48754,100	0,66%
0,170	7527740,000	0,170	47965,200	0,64%
0,180	7589260,000	0,180	47676,100	0,63%
0,190	7630730,000	0,190	46758,000	0,61%
0,200	7713290,000	0,200	47481,300	0,62%

(Fuente: Autor)

4.3. Verificación de la hipótesis

La hipótesis planteada para este estudio se ha verificado en base a los resultados obtenidos de las simulaciones y los parámetros de aceptación y rechazo de anclajes de cinturones de seguridad establecidos en el numeral 7.1 del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa (Anexo 3) referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

4.3.1. Estructura original

A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos de las simulaciones y su evaluación respectiva:

4.3.1.1. Asiento con dos puntos de anclaje para cinturones de seguridad

Tabla 4. 84. Evaluación de resultados

ANCLAJE	CRITERIO DE ACEPTACIÓN/ RECHAZO SEGÚN NUMERAL 7.1 R14 CEPE	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EFECTIVA MÁXIMA	EXCEDE EL ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE	RESISTE EL ENSAYO
Inferior izquierdo	No se deben producir roturas totales o parciales durante el tiempo de aplicación de la carga	567.967 MPa	0.019	Si	No
Inferior medio		843.557 MPa	0.096	Si	No
Inferior derecho		834.507 MPa	0.067	Si	No

(Fuente: Autor)

En este análisis se ha determinado que ninguno de los anclajes de cinturones de seguridad es capaz de resistir el ensayo, por lo tanto:

$$H_i = \text{Falso}$$

$$H_o = \text{Verdadero}$$

Los anclajes de cinturones de seguridad utilizados por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. en estructuras de asientos de autobús interprovincial no soportan

el ensayo de resistencia del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

4.3.1.2. Asiento con tres puntos de anclaje para cinturones de seguridad

Tabla 4. 85. Evaluación de resultados

ANCLAJE	CRITERIO DE ACEPTACIÓN/ RECHAZO SEGÚN NUMERAL 7.1 R14 CEPE	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EFECTIVA MÁXIMA	EXCEDE EL ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE	RESISTE EL ENSAYO
Inferior izquierdo	No se deben producir roturas totales o parciales durante el tiempo de aplicación de la carga	563.643 MPa	0.010	Si	No
Inferior medio		766.597 MPa	0.069	Si	No
Inferior derecho		714.364 MPa	0.073	Si	No
Superior izquierdo		467.654	8.71×10^{-6}	No	Si
Superior derecho		439.160	0	No	Si

(Fuente: Autor)

En este análisis se ha determinado que solamente los anclajes superiores de cinturones de seguridad resisten el ensayo, por lo tanto:

$$H_i = \text{Falso}$$

$$H_o = \text{Verdadero}$$

Los anclajes de cinturones de seguridad utilizados por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. en estructuras de asientos de autobús interprovincial no soportan el ensayo de resistencia del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

4.3.2. Estructura modificada

A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con la estructura modificada y su evaluación respectiva:

4.3.2.1. Asiento con dos puntos de anclaje para cinturones de seguridad

Tabla 4. 86. Evaluación de resultados

ANCLAJE	CRITERIO DE ACEPTACIÓN/ RECHAZO SEGÚN NUMERAL 7.1 R14 CEPE	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EFECTIVA MÁXIMA	EXCEDE EL ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE	RESISTE EL ENSAYO
Inferior izquierdo	No se deben producir roturas totales o parciales durante el tiempo de aplicación de la carga	526.683 MPa	0	No	Si
Inferior medio izquierdo		391.61 MPa	0	No	Si
Inferior medio derecho		419.35 MPa	0	No	Si
Inferior derecho		434.224 MPa	0.003	No	Si

(Fuente: Autor)

En este análisis se ha determinado que todos los anclajes de cinturones de seguridad resisten el ensayo, por lo tanto:

$$H_i = \textit{Verdadero}$$

$$H_o = \textit{Falso}$$

Los anclajes de cinturones de seguridad soportan el ensayo de resistencia del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

4.3.2.2. Asiento con tres puntos de anclaje para cinturones de seguridad

Tabla 4. 87. Evaluación de resultados

ANCLAJE	CRITERIO DE ACEPTACIÓN/ RECHAZO SEGÚN NUMERAL 7.1 R14 CEPE	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EFECTIVA MÁXIMA	EXCEDE EL ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE	RESISTE EL ENSAYO
Inferior izquierdo	No se deben producir roturas totales o parciales durante el tiempo de aplicación de la carga	539.274 MPa	0	No	Si
Inferior medio izquierdo		508.514 MPa	0.001	No	Si
Inferior medio derecho		495.6 MPa	0	No	Si
Inferior derecho		506.095 MPa	0	No	Si
Superior izquierdo		446.225 MPa	0	No	Si
Superior derecho		482.395 MPa	0	No	Si

(Fuente: Autor)

En este análisis se ha determinado que todos los anclajes de cinturones de seguridad resisten el ensayo, por lo tanto:

$$H_i = \textit{Verdadero}$$

$$H_o = \textit{Falso}$$

Los anclajes de cinturones de seguridad soportan el ensayo de resistencia del Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- ❖ Se han utilizado los parámetros de evaluación del Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa, el cual es tomado como referencia en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704 debido a que el reglamento tiene una mejor estructura que incluye parámetros de evaluación específicos para diferentes tipos de vehículos en base a su categoría, a diferencia de la norma ecuatoriana que carece de estos parámetros.
- ❖ Los materiales utilizados en la construcción de estructuras de asientos de autobús interprovincial son aceros estructurales ASTM A36 y ASTM A 500 grado A.
- ❖ El acero ASTM A 36 utilizado por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. tiene un comportamiento elasto – plástico cuya resistencia máxima promedio es de 511.980 MPa.
- ❖ El acero ASTM A500 grado A utilizado por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. tiene un comportamiento elasto – plástico cuya resistencia máxima promedio es de 383.6425 MPa.
- ❖ Para verificar la validez del modelo de material utilizado del acero ASTM A36, se simularon los ensayos físicos de materiales obteniendo un error promedio de 5.99 % en el ensayo de tracción y 1.87 % en el ensayo de flexión, los cuales son valores aceptables.
- ❖ De la misma manera se realizaron simulaciones de los ensayos reales para el acero ASTM A500 grado A, obteniendo errores promedio de 6.7 % en el ensayo de tracción y 0.76% en el ensayo de flexión, los cuales son valores aceptables para validar el modelo de material utilizado.

- ❖ La calidad de mallado obtenida en los modelos para las simulaciones evaluada por medio de la relación de aspecto de elementos se encuentra dentro de los parámetros recomendados, obteniendo una relación máxima de 7 y mínima de 1.
- ❖ Ninguno de los anclajes para cinturones de seguridad de dos puntos de la estructura original del asiento es capaz de soportar el análisis de resistencia según los parámetros de evaluación establecidos en el numeral 7.1 del Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa (Anexo 3) ya que se supera por mucho los esfuerzos máximos de resistencia de los materiales a pesar de que las deformaciones plásticas efectivas se encuentran dentro de valores aceptables de acuerdo a los valores máximos obtenidos en los ensayos reales de los materiales, los resultados obtenidos en el análisis se resumen en la tabla 4.84.
- ❖ En la simulación de resistencia de anclajes para cinturones de tres puntos con la estructura original solo los anclajes superiores son capaces de soportar el ensayo, mientras que ninguno de los anclajes inferiores tuvo la resistencia suficiente porque se superan ampliamente los esfuerzos máximos de resistencia de los materiales aunque las deformaciones plásticas efectivas tienen valores bajos, los resultados obtenidos en el análisis se resumen en la tabla 4.85.
- ❖ Una vez realizadas las simulaciones de los ensayos de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad con la estructura original fabricada por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. se pudo notar que ésta no tiene una adecuada resistencia y se deforma excesivamente, teniendo deformaciones plásticas efectivas máximas de 0.616 y 0.674 en los análisis con cinturones de dos y tres puntos respectivamente, de la misma manera se tienen altos valores de desplazamientos totales máximos de 406.146 mm y 1015.17 mm lo cual compromete la resistencia de los elementos de la estructura y la seguridad de los ocupantes, por ello ha sido necesario rediseñarla añadiendo refuerzos y modificaciones en su base, pata y asientos como se muestra en las tablas 4.56, 4.57 y el Anexo 14.

- ❖ Las modificaciones realizadas en la estructura original se llevaron a cabo considerando las limitaciones reales de disponibilidad de materiales y tamaños de perfiles existentes en el mercado procurando no alterar por completo la forma original.
- ❖ Todos los anclajes de la estructura modificada para cinturones de dos y tres puntos fueron capaces de soportar el ensayo de resistencia en forma satisfactoria ya que los esfuerzos máximos producidos son menores que los esfuerzos máximos del material, además de que en la mayoría de anclajes no se tienen deformaciones plásticas efectivas, sus resultados se resumen en las tablas 4.86 y 4.87.
- ❖ La estructura rediseñada ha tenido un mejor comportamiento en el ensayo de resistencia en comparación a la estructura original ya que en el caso del análisis con cinturones de dos puntos se ha reducido la deformación plástica efectiva máxima en un 40 % y en el caso de la deformación total máxima se ha tenido una reducción del 55 %; mientras que en el análisis con cinturones de tres puntos estos valores se han reducido en un 40 y 46 % respectivamente.
- ❖ Los tiempos de procesamiento que se necesitaron para realizar cada uno de los análisis están directamente relacionados con la cantidad de elementos utilizados para el mallado ya que con un mayor número de elementos se requerirá un mayor tiempo de procesamiento, esto se pudo verificar al realizar simulaciones previas con aproximadamente 35000 elementos tipo shell, las cuales tardaron aproximadamente 14 horas; sin embargo se decidió utilizar un mayor número de elementos en los análisis finales, aproximadamente 65000, con lo cual el tiempo de procesamiento se elevó a 26 horas obteniendo una mejor calidad de malla con un mejor adaptación a la geometría del modelo y mayor exactitud en los resultados. Estas consideraciones deben hacerse en base a la capacidad de procesamiento disponible y a la diferencia de los resultados obtenidos con diferentes cantidades de elementos.

5.2. Recomendaciones

- ❖ Para realizar un análisis por elementos finitos es necesario crear un modelo digital que reproduzca de forma adecuada el modelo real que se desea evaluar.
- ❖ Se deben realizar las optimizaciones y simplificaciones necesarias en los modelos digitales con el fin de eliminar geometrías complejas, interferencias o elementos innecesarios que podrían causar conflictos o incrementar el gasto computacional.
- ❖ En el caso de estructuras o interacción entre elementos se debe poner especial atención en las conexiones y áreas de contacto entre elementos para evitar interferencias, penetraciones o espacios no deseados, lo cual puede causar alteraciones en el mallado y por lo tanto resultados inexactos.
- ❖ El mallado debe realizarse de manera uniforme, procurando que los elementos tengan una calidad aceptable y una adecuada distribución en el modelo, por medio de los parámetros de evaluación de calidad de malla.
- ❖ Se deben elegir adecuadamente el tipo de elementos que se utilizarán para el mallado en función de la geometría del modelo y del gasto computacional.
- ❖ En los análisis dinámicos explícitos se pueden utilizar formulaciones de control de Hourglass en caso de existir distorsiones excesivas luego de la solución, una forma de verificar la validez de este tipo de análisis es mediante la relación entre la energía interna del sistema y la energía de Hourglass, la cual no debe superar el 10 % de la energía interna porque esto significaría una distorsión excesiva y la pérdida de exactitud en los resultados.
- ❖ Deben verificarse cuidadosamente los resultados obtenidos en los ensayos físicos de materiales, ya que actualmente muchos de ellos se realizan con equipos que utilizan programas especializados que y sensores electrónicos que no cuentan con una adecuada precisión de medida, especialmente al inicio de

los ensayos donde las deformaciones producidas son tan pequeñas que no pueden ser registradas, causando posteriores problemas en el cálculo de ciertos resultados como el módulo de Young; en tales casos se pueden realizar ensayos utilizando otros equipos como extensómetros analógicos si se dispone de ellos y se pueden comparar los resultados obtenidos en cada caso verificando en cuál de ellos se tiene una aproximación más real a los valores nominales mostrados en normas o catálogos de fabricantes de materiales.

MATERIALES DE REFERENCIA

Bibliografía

- [1] R. Henniger, K. Hessenberger y H. Mullerschön. "Robustness Investigation of a Numerical Simulation of the ECE - R14 with particular regard to correlation analysis" en LS - DYNA Anwenderforum, Bamberg, Alemania, 2005
- [2] U. Heo et al. "Effectiveness evaluation for seat parts by seat belt anchorage strength analysis" en International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, pp. 1031-1034
- [3] C. Yuce et al. "A case study: Designing for sustainability and reliability in an automotive seat structure", *Sustainability*, Vol. 6, pp. 4608-4631. Julio 2014
- [4] A. Vatambe "Simulation and validation of automotive seat using the Regulation FMVSS 207/210" en National Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology, 2015, pp. 385-392
- [5] Organización Mundial de la Salud. "Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial" Suiza, 2013, pp. 2-10
- [6] United Press International. "Ministerio de Transportes: cifras de accidentes en buses disminuyó gracias a cinturón de seguridad" Internet: <http://www.biobiochile.cl/noticias/2012/11/27/ministerio-de-transportes-cifras-de-accidentes-en-buses-disminuyo-gracias-a-cinturon-de-seguridad.shtml>, noviembre 27 de 2012. [Junio 10 de 2016]
- [7] Comisión Económica para Europa. "Reglamento N° 14. Prescripciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos en lo que concierne a los anclajes de los cinturones de seguridad, los sistemas de anclajes ISOFIX, los anclajes superiores ISOFIX y las plazas de asiento i-Size" 2015
- [8] Code of Federal Regulations. "Federal Motor Vehicle Safety Standards. Standard No. 210: Seat belt assembly anchorages" U.S. Government, 2008

- [9] Instituto Ecuatoriano de Normalización. “Norma Técnica NTE INEN 2704. Vehículos automotores. Anclajes del cinturón de seguridad para vehículos” Quito, Ecuador, 2013
- [10] Instituto Ecuatoriano de Normalización. “Reglamento Técnico RTE INEN 043. Bus interprovincial e intraprovincial” Quito, Ecuador, 2010
- [11] Dirección General de Tráfico de España. “Cinturón de seguridad y sistemas de retención infantil” Ministerio del Interior, Gobierno de España, 2010
- [12] G. Sanabria. “Cinturones de seguridad” Internet: <http://45c75875i.blogspot.com/>, enero 9 de 2015. [Junio 10 de 2016]
- [13] L. Evans. *The Science of Traffic Safety*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1999, pp. 431
- [14] Fasching Group Safety Belts. “Componentes de cinturones de seguridad” Internet:<http://www.faschingsalzburg.com/es/cinturones-de-seguridad/componentes/>, 2015. [Junio 6 de 2016]
- [15] C. Cancela. “El cinturón de 3 puntos lleva 50 años salvando vidas” Internet: http://www.elconfidencial.com/motor/2009-03-14/el-cinturon-de-3-puntos-lleva-50-anos-salvando-vidas_703149/, marzo 14 de 2009. [Junio 6 de 2016]
- [16] X. Chen y Y. Liu. *Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015
- [17] E. Frías. “Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2004
- [18] S. Pezzotti y F. Antico. *Introducción a la teoría de elementos finitos*. La plata: Universidad Nacional de La Plata, 2007
- [19] A. Cubillos. “Introducción al método de elementos finitos” Universidad de Ibagué, 2008

- [20] Ansys Inc. “ANSYS Structural Analysis Guide” Internet: http://www.ansys.stuba.sk/html/guide_55/g-str/GSTRToC.htm, octubre 20 de 2014. [Junio 25 de 2016]
- [21] H. Lee. *Finite element simulations with ANSYS Workbench 14*”. Mission: SDC Publications, 2012
- [22] S. Fernández. “Análisis explícito” Internet: <http://sergioariasfernandez.com/analisis-explicito/>, 2014. [Junio 25 de 2016]
- [23] Dassault Systèmes SolidWorks Corp. “Comprensión del análisis no lineal” Informe técnico, 2011
- [24] B. Moreno. “Introducción a los elementos 2-D en FEMAP y NX Nastran” Internet: <http://www.iberisa.com/soporte/femap/shell.htm>, 2001. [Junio 25 de 2016]
- [25] M. Goelke. *Practical Aspects of Finite Element Simulation*. Altair University, 2015
- [26] LSTC Livermore Software Technology Corp. “Hourglass (HG) modes” Internet: <http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/hourglass.pdf>, 2012. [Septiembre 5 de 2016]
- [27] S. Hale. “Why worry about hourglassing in explicit dynamics part I” Internet: <https://caesai.com/blog/why-worry-about-hourglassing-explicit-dynamics-part-i>, enero 9 de 2015. [Septiembre 5 de 2016]
- [28] S. Hale. “Why worry about hourglassing in explicit dynamics part II” Internet: <https://caesai.com/blog/why-worry-about-hourglassing-explicit-dynamics-part-ii>, enero 16 de 2015. [Septiembre 5 de 2016]
- [29] R. Hibbeler. *Mecánica de materiales*. México: Pearson Educación, 2006
- [30] J. Gere y B. Goodno. *Mecánica de materiales*. México: Cengage Learning Editores, 2009
- [31] S. Kalpakjian y S. Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson Educación, 2008

- [32] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*. México: McGraw – Hill, 2007
- [33] E. Medina. “Ensayo de flexión” Universidad Politécnica de Cataluña, 2006
- [34] Ecuabus. “Pesos de totales y de chasis de autobuses interprovinciales” Internet: <http://www.ecuabus.net/Chasis%20Bus.html>, 2010. [Septiembre 5 de septiembre de 2016]
- [35] Comisión Económica para Europa. “Reglamento N° 678. Categorías de vehículos para transporte de pasajeros” 2015
- [36] S. Basu, “Tensile Deformation of Fibers Used in Textile Industry” Agilent Technologies, 2012

ANEXOS

ANEXO 1: Requerimientos para cinturones de seguridad en autobuses interprovinciales según el Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 043.



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO

RTE INEN 043:2010

BUS INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIAL

Primera Edición

BUS INTERPROVINCIAL AND INTRAPROVINCIAL.

First Edition

DESCRIPTORES: Ingeniería automotriz, vehículos automotores, bus interprovincial e intraprovincial.
MC 08.08-902
CDU: 656.076.2
CIU: 3843
ICS: 43.020

b.2.4.3) Cuando la altura interior, de la zona destinada a la circulación y al ingreso y egreso del conductor y del personal auxiliar sea inferior a 1 750 mm, la cabina debe tener dos (2) puertas, ubicadas una a cada lateral, con las siguientes medidas mínimas:

a) Altura: 1 250 mm;

b) Ancho: Mínimo 550 mm.

b.2.4.4) Los buses que posean cabina de conducción independiente de la zona de pasajeros puede tener máximo un asiento para un acompañante y se prohíbe la instalación de literas.

b.2.4.5) En ningún caso, la altura entre el borde superior del asiento del conductor o acompañantes, en su posición normal de trabajo, a ningún punto del techo de la cabina, podrá ser menor a 900 mm.

b.3) *Asientos para pasajeros*

b.3.1) *Asientos y disposición.* Deben ser fijos a la carrocería y estar dispuestos según el eje longitudinal del vehículo en el sentido de marcha y/o viceversa, de tal forma que se proporcione la mayor seguridad y confort a los pasajeros, respetando los diseños de los fabricantes del vehículo o chasis para la distribución de las cargas a los ejes del vehículo y cumplir con las Normas Técnicas Ecuatorianas NTE INEN vigentes (ver nota 1).

b.3.1.1) Deben ser reclinables e individuales incluidos los de la última fila, disponer de apoyacabezas y de apoyabrazos individuales. Los apoyacabezas deben cumplir con las Normas Técnicas Ecuatorianas NTE INEN vigentes (ver nota 1).

b.3.1.2) Los buses de pasajeros intraprovincial e interprovinciales deben disponer de cinturones de seguridad de tres puntos autotensables en los asientos ubicados en la primera fila y fila posterior a las puertas de salidas. En los vehículos interprovinciales se colocarán cinturones de seguridad de dos puntos (modelo pélvico), en la totalidad de los asientos destinados a los pasajeros. Los cinturones de seguridad deben cumplir con las Normas Técnicas Ecuatorianas NTE INEN vigentes (ver nota 1).

b.3.1.3) Los buses poseerán dos (2) hileras de dos asientos individuales, incluida la última fila, de las siguientes dimensiones:

a) Profundidad mínima: 420 mm para bus intraprovincial y 450 mm para bus interprovincial;

b) Ancho libre mínimo del asiento: 450 mm;

c) Altura desde el piso a la base del asiento entre 400 mm y 480 mm;

d) Distancia entre asientos medidos desde la parte posterior de un asiento y la parte anterior del siguiente (ver figura A.7):

d.1) Bus interprovincial: mínima de 750 mm

d.2) Bus intraprovincial: mínimo de 700 mm

ANEXO 2. Norma Técnica Ecuatoriana INEN 109: 2009.



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA

NTE INEN 109:2009
Primera revisión

ENSAYO DE TRACCION PARA MATERIALES METALICOS A TEMPERATURA AMBIENTE.

Primera Edición

TRACTION TEST FOR METALLIC MATERIALS TO AMBIENT TEMPERATURE.

First Edition

DESCRIPTORES: Productos metálicos, metales, ensayos, ensayos mecánicos, ensayo de tracción, determinación, elongación, extensión probetas

MC 01.02-301
CDU: 669.14:620.17
CIU: 3710
ICS: 77.040.10

<p>Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria</p>	<p>ENSAYO DE TRACCIÓN PARA MATERIALES METÁLICOS A TEMPERATURA AMBIENTE</p>	<p>NTE INEN 109:2009 Primera revisión 2009-03</p>
--	---	--

1. OBJETO

1.1 Esta norma especifica el método para el ensayo de tracción de materiales metálicos y define las propiedades mecánicas que se pueden determinar a temperatura ambiente.

2. ALCANCE

2.1 Esta norma se aplica al ensayo de tracción de todos los productos de acero de sección transversal constante.

2.2 Para ciertos materiales metálicos y aplicaciones particulares, el ensayo de tracción debe estar sujeto a normas específicas o requerimientos particulares.

3. DEFINICIONES

3.1 Para los efectos de esta norma se aplican las siguientes definiciones:

3.1.1 *Longitud calibrada (L)*. Es la longitud de la sección cilíndrica o prismática de la probeta de ensayo en la que se va a medir la elongación en cualquier momento durante el ensayo.

3.1.2 *Longitud calibrada inicial (L₀)*. Longitud calibrada antes de la aplicación de la carga.

3.1.2.1 *Longitud calibrada final (L_u)*. Longitud calibrada después de la rotura de la probeta ensayo (ver numeral 10.1)

3.1.3 *Longitud paralela (L_p)*. Longitud de la sección reducida paralela de la probeta de ensayo (ver nota 1).

3.1.4 *Elongación*. Incremento de la longitud calibrada inicial (L₀) en cualquier instante del ensayo.

3.1.4.1 *Porcentaje de elongación*. Alargamiento expresado como un porcentaje de la longitud calibrada inicial (L₀).

3.1.4.2 *Porcentaje de elongación permanente*. Incremento de la longitud calibrada inicial en una probeta de ensayo después de eliminar el esfuerzo especificado (ver numeral 3.11), expresado como un porcentaje de la longitud calibrada inicial (L₀) (ver nota 1).

3.1.4.3 *Porcentaje de elongación después de la rotura (A)*. Elongación permanente de la longitud calibrada inicial (ver nota 2) después de la rotura (L_u - L₀) expresado como un porcentaje de la longitud calibrada inicial (L₀).

NOTA 1: El concepto de longitud paralela es reemplazado por el concepto de distancia entre mordazas para probetas no maquinadas.

NOTA 2. En el caso de las probetas de ensayo proporcionales, solamente si la longitud calibrada inicial es diferente de $5,65 \sqrt{S_0}^{-1}$ en donde S₀ es el área de la sección transversal inicial de la longitud paralela, el símbolo A se complementa con un índice que indica el coeficiente de proporcionalidad usado, por ejemplo:

A_{11,3} = porcentaje de elongación en una longitud calibrada (L₀) de $11,3 \sqrt{S_0}$

En el caso de probetas de ensayo no proporcionales, el símbolo A se complementa con un índice que indica la longitud calibrada inicial usada, expresada en milímetros, por ejemplo:

A_{80 mm} = porcentaje de elongación en una longitud calibrada (L₀) de 80 mm.

$$5,65 \sqrt{S_0} = 5 \sqrt{\frac{4S_0}{\pi}}$$

(Continúa)

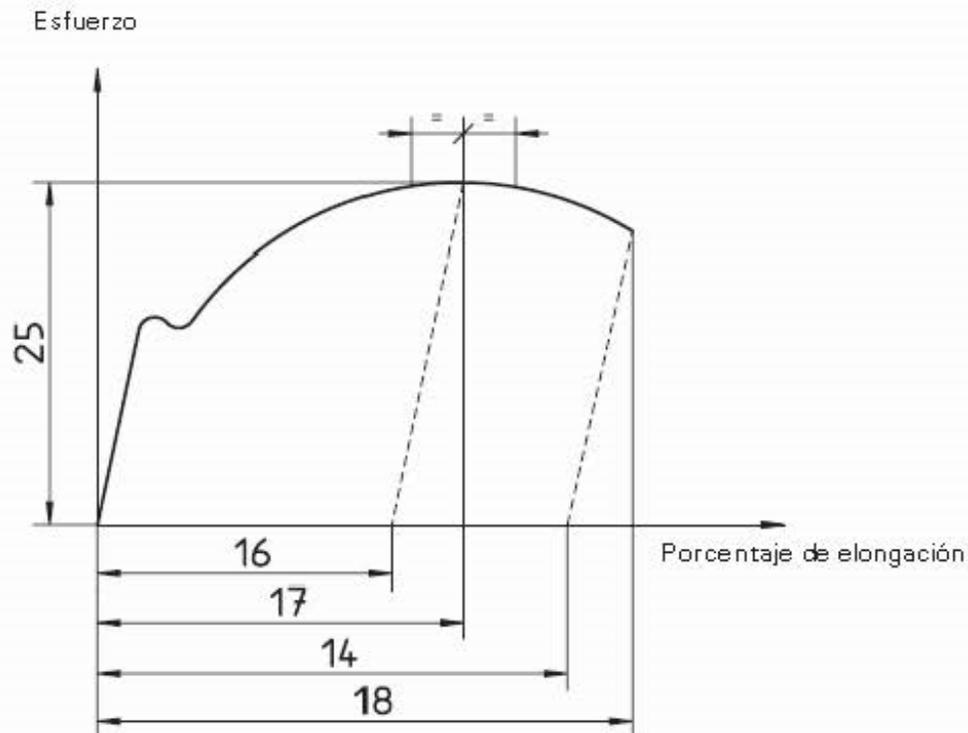
DESCRIPTORES: Productos metálicos, metales, ensayos, ensayos mecánicos, ensayo de tracción, determinación, elongación, extensión probetas.

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN – Casilla 17-01-3999 – Baquerizo Moreno E8-29 y Almagro – Cuito-Ecuador – Prohibida la reproducción

3.1.4.4 *Porcentaje de elongación total a la rotura (A_r)*. Es el alargamiento total (elongación elástica más elongación plástica) de la longitud calibrada en el momento de la rotura, expresado como un porcentaje de la longitud calibrada inicial (L_0).

3.1.4.5 *Porcentaje de elongación al esfuerzo máximo*. Es el aumento en la longitud calibrada inicial de la probeta cuando la fuerza es máxima, expresado como un porcentaje de la longitud calibrada inicial (L_0). Se hace una distinción entre el porcentaje de elongación total a la carga máxima (A_g) y el porcentaje de elongación no proporcional a la carga máxima (A_g) (ver figura 1).

FIGURA 1. Definiciones de elongación (ver nota 3)



3.1.5 *Longitud calibrada del extensómetro (L_e)*. Longitud de la sección paralela de la probeta de ensayo usada para la medición del alargamiento por medio de un extensómetro.

3.1.5.1 Se recomienda la medición del límite de fluencia y el esfuerzo de prueba, para el parámetro

$$L_e \approx \frac{L_0}{2}$$

3.1.5.2 Además se recomienda que para las medidas de los parámetros durante y después de la fuerza máxima, L_e será aproximadamente igual a L_0 .

3.1.6 *Extensión*. Incremento de la longitud calibrada (L_0) del extensómetro en un momento dado del ensayo.

3.1.6.1 *Porcentaje permanente de extensión*. Incremento de la longitud calibrada en el extensómetro después de suspender un esfuerzo especificado en la probeta de ensayo, se expresa como un porcentaje de la longitud calibrada del extensómetro (L_0).

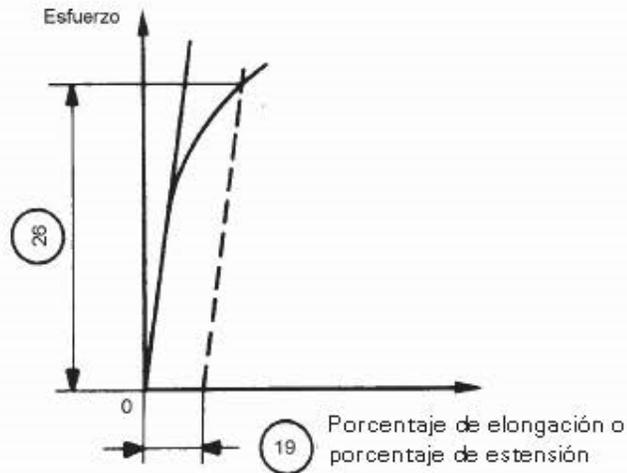
NOTA 3: Ver tabla 1 para efectos de la explicación de los números indicados.

(Continúa)

b) *Límite de fluencia inferior (R_{eL})*. El valor más bajo del esfuerzo en el campo plástico, ignorando cualquier efecto transitorio (ver figura 2).

3.1.9.3 *Esfuerzo de prueba con alargamiento no proporcional (R_p)*: El esfuerzo al cual la extensión no proporcional es igual al porcentaje especificado en la longitud calibrada del extensómetro (L_g) (ver figura 3). El símbolo que se usa es seguido por un sufijo que indica el porcentaje prescrito de la longitud calibrada del extensómetro, por ejemplo $R_{p0,2}$

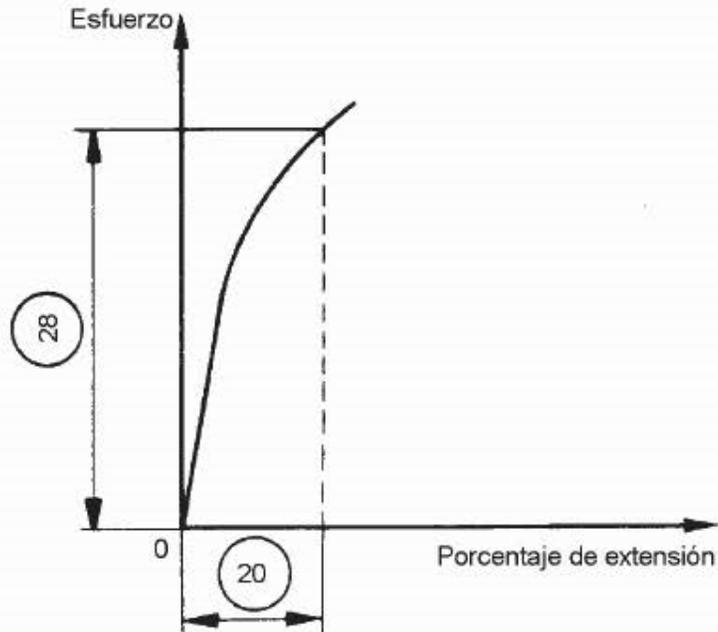
FIGURA 3. Prueba de resistencia con alargamiento no proporcional (R_p) (ver nota 5)



NOTA 5. Ver tabla 1. Para la explicación respectiva a los números indicados.

3.1.9.4 *Esfuerzo de prueba con extensión total (R_t)*: El esfuerzo al cual la extensión total (extensión elástica más extensión plástica) es igual al porcentaje especificado en la longitud calibrada del extensómetro (L_g) (ver figura 4). El símbolo es seguido por un sufijo que indica el porcentaje prescrito de la longitud calibrada inicial del extensómetro por ejemplo: $R_{t0,5}$

FIGURA 4. Esfuerzo de prueba, extensión total (R_t) (ver nota 6)

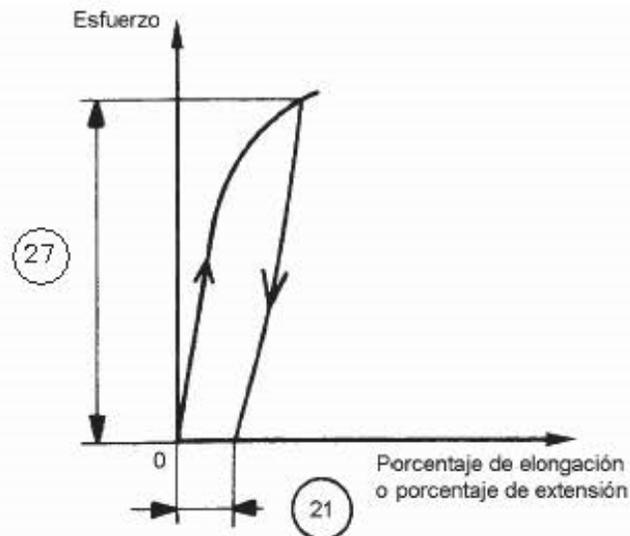


NOTA 6. Ver tabla 1. Para la explicación respectiva a los números indicados.

(Continúa)

3.1.9.5 Esfuerzo a la deformación permanente (R_p): Es el esfuerzo al cual, después de eliminar la carga, una elongación o extensión permanente especificada, expresada como un porcentaje de la longitud calibrada inicial (L_0) o una longitud calibrada del extensómetro (L_e), respectivamente, no ha sido excedido (ver figura 5). El símbolo utilizado es seguido por un sufijo que indica el porcentaje especificado de la longitud calibrada inicial (L_0), o de la longitud calibrada del extensómetro (L_e), por ejemplo $R_{p,0.2}$.

FIGURA 5. Esfuerzo a la deformación permanente (R_p) (ver nota 7)



4. SIMBOLOGÍA Y DESIGNACIONES

4.1 En el contenido de esta norma se utilizarán los símbolos y sus correspondientes designaciones que se establecen en la tabla 1.

TABLA 1. Símbolos y designaciones.

Número de Referencia ¹⁾	Símbolo	Unidades	Designación
Probeta			
1	$a^{2)}$	mm	Espesor de la probeta de ensayo plana o de la pared de un tubo
2	b	mm	Ancho de la longitud paralela de la probeta de ensayo plana o ancho promedio de una tira longitudinal tomada de un tubo o ancho de un alambre plano
3	d	mm	Diámetro de la longitud paralela de una probeta circular o diámetro de un alambre redondo o diámetro interno de un tubo
4	D	mm	Diámetro externo de un tubo
5	L_0	mm	Longitud calibrada inicial
-	L_0'	mm	Longitud calibrada inicial para determinar A_0
6	L_c	mm	Longitud paralela
-	L_e	mm	Longitud calibrada del extensómetro
7	L_t	mm	Longitud total de la probeta
8	L_u	mm	Longitud final calibrada después de la rotura
-	L_u'	mm	Longitud calibrada final después de la rotura para determinar A_0 (Ver anexo H)

NOTA 7. Ver la tabla 1. Para la explicación respectiva a los números indicados.

(Continúa)

(Continuación tabla 1)

Número de Referencia ¹⁾	Símbolo	Unidades	Designación
Probeta			
9	S_o	mm ²	Área de la sección transversal inicial de la longitud paralela.
10	S_u	mm ²	Área mínima de la sección transversal después de la rotura.
	k		Coefficiente de proporcionalidad
11	Z	%	Porcentaje de reducción de área $\frac{S_o - S_u}{S_o} \times 100$
12	-	-	Superficie de agarre de la probeta para las mordazas
Elongación			
13	-	mm	Elongación después de la rotura $L_u - L_o$
14	$A^{2)}$	%	Porcentaje de elongación después de la rotura $\frac{L_u - L_o}{L_o} \times 100$
15	A_e	%	Porcentaje de extensión en el punto de fluencia
	ΔL_m	mm	Extensión a la carga máxima
16	A_g	%	Porcentaje de elongación no proporcional, a la carga máxima (F_m)
17	A_{gt}	%	Porcentaje de elongación total, a la carga máxima (F_m)
18	A_t	%	Porcentaje de elongación total, a la rotura
19	-	%	Porcentaje especificado de extensión no proporcional
20	-	%	Porcentaje de extensión total. (Ver 28)
21	-	%	Porcentaje especificado de extensión a la deformación permanente o elongación.
Carga			
22	F_m	N	Carga Máxima
Límite de fluencia – Esfuerzo de prueba – Resistencia a la Tracción			
23	R_{eH}	MPa	Límite de fluencia superior ⁴⁾
24	R_{eL}	MPa	Límite de fluencia inferior
25	R_m	MPa	Resistencia a la tracción
26	R_p	MPa	Esfuerzo de prueba con extensión no proporcional
27	R_r	MPa	Esfuerzo a la deformación permanente
28	R_t	MPa	Esfuerzo de prueba con extensión total
-	E	MPa	Módulo de elasticidad
1)	Ver figuras de la 1 a la 13		
2)	El símbolo T también se usa en tubos de acero, productos estándar.		
3)	Ver 3.1.4.3		
4)	1 N/mm ² = 1 MPa		

5. FUNDAMENTO

5.1 El ensayo comprende el estiramiento de una probeta por una fuerza axial de tracción proporcional a sus dimensiones, mediante una máquina para ensayo de tracción para determinar durante su deformación una o más características mecánicas definidas en el punto 3.

5.1.1 El ensayo se llevara a cabo a temperatura ambiente comprendida entre + 10°C y + 35°C, a menos que se especifique de otra manera.

5.2 Instrumental

5.2.1 Máquina para ensayo de tracción.

5.2.1.1 *Precisión de las máquinas de ensayo.* Las máquinas de ensayo deben ser verificadas de acuerdo a las NTE INEN 1 502 y la NTE INEN 1 503.

(Continúa)

5.2.1.2 El extensómetro debe ser de Clase 1 para la determinación de los límites de fluencia inferior y superior y resistencia de prueba (extensiones no proporcionales); para otras características (con mayor extensión) se pueden usar un extensómetro Clase 2.

5.2.1.3 *Características de la máquina.*

- a) Debe estar provista de dispositivos que aseguren la aplicación axial de los esfuerzos en la probeta.
- b) Debe permitir la aplicación de las cargas progresivamente, sin choques ni vibraciones.
- c) Debe estar provista de dispositivos de regulación y comando que permitan ejecutar el ensayo, con las velocidades especificadas en el numeral 7.1.
- d) Debe permitir un error máximo del 1% de la carga indicada.

6. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

6.1 Forma y dimensiones de las probetas

6.1.1 Generalidades

6.1.1.1 La forma y las dimensiones de las probetas, dependen de la forma y dimensiones de los productos metálicos de los cuales se tomó la probeta y de las propiedades mecánicas que se van a determinar.

6.1.1.2 La probeta, se obtiene generalmente por maquinado de una muestra del producto, de un elemento estampado o de un elemento fundido. Sin embargo, los productos de sección transversal uniforme (perfiles, barras, alambres, etc.) y también los elementos fundidos (fundiciones de hierro y aleaciones no ferrosas) pueden ser sometidas a ensayo sin maquinado.

6.1.1.3 La sección transversal de las probetas puede ser circular, cuadrada, rectangular, anular o en casos especiales de alguna otra forma.

6.1.1.4 Las probetas cuya longitud calibrada inicial se relaciona con el área inicial de la sección transversal por la ecuación $L_0 = k\sqrt{S_0}$, son llamadas probetas proporcionales. El valor adoptado para esta norma es $k = 5,65$. La longitud calibrada inicial no debe ser menor de 20 mm. Cuando el área de la sección transversal inicial de la probeta es demasiado pequeña es necesario convenir un valor del coeficiente k más alto (preferiblemente 11,3) o se puede usar una probeta no proporcional.

6.1.1.5 En el caso en que se usen probetas no proporcionales, la longitud calibrada inicial (L_0) se toma independientemente del área de la sección transversal inicial (S_0).

6.1.1.6 Las tolerancias dimensionales de las probetas deben estar de acuerdo con los anexos referenciados (ver numeral 6.2).

6.1.2 Probetas maquinadas.

6.1.2.1 Las probetas maquinadas deben tener una curva de transición entre las superficies de agarre de las mordazas y la longitud paralela si estas son de diferentes dimensiones. Las dimensiones de este radio de transición pueden ser importantes y se recomienda que se definan en la especificación del material, si no están especificadas en el anexo indicado (ver numeral 6.2).

6.1.2.2 Las superficies de agarre pueden ser de cualquier forma, siempre y cuando se adapten a las mordazas de la máquina de tracción.

6.1.2.3 El eje de la probeta deberá coincidir con o ser paralelo al eje de aplicación de la fuerza.

(Continúa)

6.1.2.4 La longitud paralela (L_0) o en el caso en donde la probeta no tiene curva de transición, la longitud libre entre las mordazas siempre debe ser mayor que la longitud inicial calibrada. (L_0).

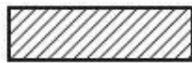
6.1.3 Probetas no maquinadas.

6.1.3.1 Si la probeta es de una longitud no maquinada del producto o una barra de ensayo sin maquinar, la longitud libre entre las mordazas debe ser suficiente para que las marcas calibradas queden a una distancia razonable de las mordazas (ver anexo A y D).

6.1.3.2 Las probetas de ensayo fundidas, incorporarán un radio de transición entre las superficies de agarre y la longitud paralela. Las dimensiones de este radio de transición son importantes y se recomienda que se definan en la norma del producto. Las superficies de agarre pueden tener cualquier forma siempre y cuando se adapten a las mordazas de la máquina de tracción. La longitud paralela (L_0) siempre debe ser mayor que la longitud calibrada inicial (L_0).

6.2 Tipos de probetas. Los principales tipos de probetas de ensayo están definidos en los anexos A-D de acuerdo con la forma y tipo del producto, como se indica en la tabla 2. Se pueden especificar otros tipos de probetas según las normas de producto.

TABLA 2. Tipos de producto

Tipo de producto		Anexos correspondientes
Laminas - Planos  Espesor "e" en mm	Alambres – Barras – Secciones  Diámetro o lado en mm	
0,1 ≤ e < 3	-----	A
---	< 4	B
≥ 3	≥ 4	C
Tubos		D

6.3 Preparación de probetas para ensayo. Las probetas de ensayo se deben tomar y preparar de acuerdo con los requerimientos de las normas para los diferentes materiales que se indica en la Norma ISO - INEN 377.

6.4 Determinación del área de la sección transversal inicial (S_0). El área de la sección transversal inicial se calcula a partir de las medidas de las dimensiones apropiadas. La precisión de estos cálculos depende de la naturaleza y del tipo de la probeta. Esta se indica en los anexos A - D para los diferentes tipos de probetas.

6.5 Marcado de la longitud calibrada inicial (L_0)

6.5.1 Cada extremo de la longitud calibrada inicial se debe marcar por medio de marcas finas o rayaduras, pero no por medio de indentaciones que puedan producir fracturas prematuras.

6.5.2 Para probetas proporcionales, el valor calculado de la longitud calibrada inicial puede aproximarse al múltiplo más cercano de 5 mm, cuidando que la diferencia entre la longitud calibrada inicial calculada y la marcada sea menor del 10% de L_0 . La longitud calibrada inicial se debe marcar con una precisión de $\pm 1\%$. El anexo F indica un nomograma para determinar la longitud calibrada inicial correspondiente a una probeta de sección transversal inicial rectangular.

6.5.3 Si la longitud paralela (L_0) es mucho mayor que la longitud calibrada inicial, como por ejemplo en probetas no maquinadas, se pueden marcar una serie de longitudes calibradas, algunas de ellas se pueden extender hasta las mordazas.

6.5.4 En algunos casos, puede ser útil marcar sobre la superficie total de la probeta, en una línea paralela al eje longitudinal.

(Continúa)

ANEXO A
(Normativo)

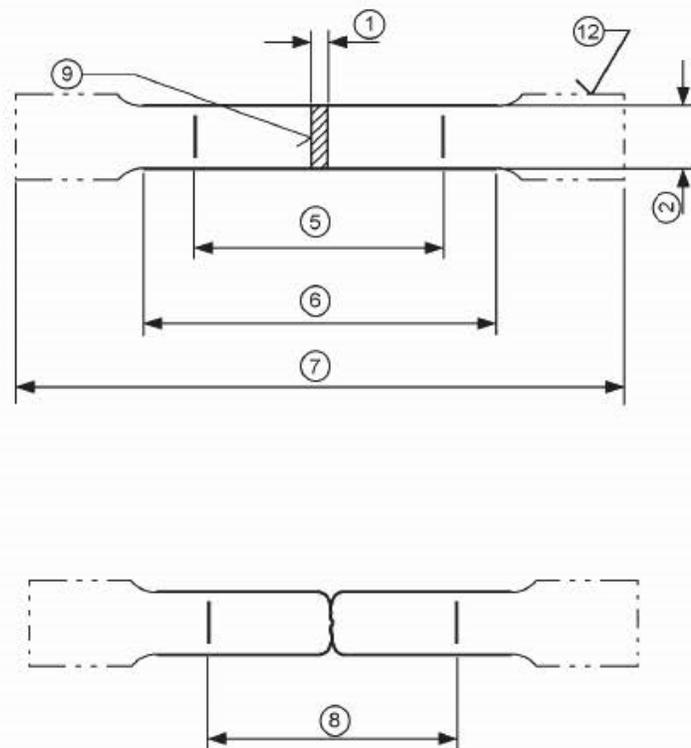
TIPOS DE PROBETAS DE ENSAYO PARA PRODUCTOS DELGADOS: LÁMINAS, FLEJES Y PRODUCTOS PLANOS 0,1 mm Y 3,0 mm DE ESPESOR

A.1 Para productos con espesor menor de 0,5 mm, es necesario tener precauciones especiales.

A.1.1 *Forma de la probeta*

A.1.1 Generalmente, la probeta tiene los extremos para sujetarse a las mordazas, con extremos más anchos que su sección paralela. La longitud paralela (L_0) se une con los extremos de la probeta por medio de curvas de transición con un radio de por lo menos 20 mm (ver figura 9). El ancho de estos extremos debe ser por lo menos de 20 mm y de no más de 40 mm.

FIGURA 9. Probetas maquinadas de sección transversal rectangular (ver notas)



A.1.2 Por acuerdo la probeta también puede consistir de un fleje con caras paralelas. Para productos de ancho igual o menor que 20 mm, el ancho de la probeta debe ser el mismo que el del producto.

A.2 Dimensiones de la probeta

A.2.1 *Probetas no proporcionales*

A.2.1.1 La longitud paralela no debe ser inferior de $L_0 + \frac{b}{2}$

A.2.1.2 En caso de desacuerdo, siempre se debe usar una longitud de $L_0 + 2b$ a menos que el material sea insuficiente.

A.2.1.3 En caso de probetas de lados paralelos de menos de 20 mm de ancho, y a menos que la norma del producto especifique otra cosa, la longitud calibrada inicial (L_0) debe ser igual a 50 mm. Para este tipo de probetas, la longitud libre entre las mordazas debe ser igual a $L_0 + 3b$.

(Continúa)

A.2.1.4 Existen dos tipos de probetas no proporcionales cuyas dimensiones se establecen en la tabla A.1.

TABLA A.1 Dimensiones de las probetas (mm)

Tipo de probeta	Ancho b	Longitud calibrada inicial L_o	Longitud paralela L_c	Mínima longitud libre entre las mordazas para probetas de lados paralelos
1	12,5 ±1	50	75	87,5
2	20 ±1	80	120	140

A.2.1.5 Cuando se determinan las dimensiones de las probetas, se aplican las tolerancias dadas en la tabla A.2.

TABLA A.2 Tolerancias en el ancho de la probeta (mm)

Ancho nominal de la probeta	Tolerancias de maquinado ¹⁾	Tolerancias de forma ²⁾
12,5	± 0,09	± 0,043
20	± 0,105	± 0,052

¹⁾ Tolerancias js 12. Estas tolerancias están en concordancia con la ISO 286-2, son aplicables si el valor nominal del área transversal (S_o), se incluye en el cálculo sin necesidad de medir su valor.

²⁾ Tolerancias IT 9. (Ver ISO 286-2). Máxima desviación entre la medida del ancho a lo largo de toda la longitud paralela (L_c) de la probeta.

A.2.1.6 En el caso en que las probetas sean del mismo ancho del producto, el área inicial de la sección transversal (S_o) se debe calcular en base de las dimensiones medidas de la probeta.

A.2.1.7 Se puede tomar como ancho nominal de la probeta el que resulte del maquinado con sus tolerancias, siempre y cuando cumpla las tolerancias de forma que se dan en la tabla A.2, con el fin de tener la medida del ancho de la probeta para efectos del ensayo.

A.3 Preparación de las probetas

A.3.1 Las probetas se deben preparar de tal manera, que no afecten las propiedades del metal. Si algunas áreas se han endurecido por efectos de corte o prensado, se deben eliminar por maquinado.

A.3.2 Para materiales muy delgados, se recomienda que las piezas del mismo ancho se corten ensambladas formando un paquete con separadores intermedios de papel que sea resistente al aceite de corte. Se recomienda que cada paquete se ensamble con sujetadores a cada lado antes del maquinado para darle las dimensiones finales a las probetas.

A.3.3 El valor dado en A.2, por ejemplo ±0,09 mm para un ancho nominal de 12,5 mm significa que ninguna probeta debe tener un ancho fuera de los dos valores dados abajo, si el valor nominal del área de la sección transversal inicial (S_o) es incluido sin tener que medirlo:

$$12,5 + 0,09 = 12,59 \text{ mm}$$

$$12,5 - 0,09 = 12,41 \text{ mm}$$

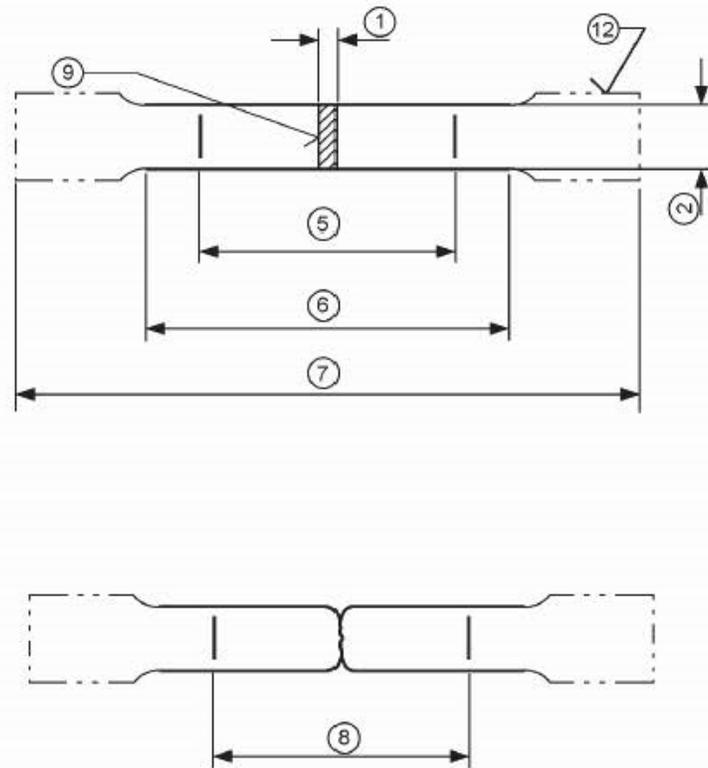
A.4 Determinación del área de la sección transversal inicial (S_o)

A.4.1 El área de la sección transversal inicial se calcula a partir de las medidas de las dimensiones de la probeta.

(Continúa)

A.4.2 El error en la determinación del área de la sección transversal inicial de la probeta no debe ser mayor de $\pm 2\%$. La mayor parte de este error, generalmente se debe a la medición de los espesores de la probeta, el error en la medición del ancho no debe ser mayor de $\pm 0,2\%$.

Figura 9. Probetas maquinadas de sección transversal rectangular



NOTA A.1: La forma de la cabeza de la probeta se indica a manera de guía.
 NOTA A.2: Ver tabla 1 para la explicación de los números indicados

(Continúa)

ANEXO 3: Condiciones de ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad según el Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa.

ACTOS ADOPTADOS POR ÓRGANOS CREADOS MEDIANTE ACUERDOS INTERNACIONALES

Solo los textos originales de la CEPE surten efectos jurídicos con arreglo al Derecho internacional público. La situación y la fecha de entrada en vigor del presente Reglamento deben verificarse en la última versión del documento de la CEPE sobre la situación TRANS/WP.29/343, disponible en:

<http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html>

Reglamento n° 14 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) — Prescripciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos en lo que concierne a los anclajes de los cinturones de seguridad, los sistemas de anclajes ISOFIX, los anclajes superiores ISOFIX y las plazas de asiento i-Size [2015/1406]

Incluye todos los textos válidos hasta:

El suplemento 5 de la serie 07 de modificaciones. Fecha de entrada en vigor: 10 de junio de 2014

ÍNDICE

REGLAMENTO

1. Ámbito de aplicación
2. Definiciones
3. Solicitud de homologación
4. Homologación
5. Especificaciones
6. Ensayos
7. Inspección durante los ensayos estáticos y después de los mismos para anclajes del cinturón de seguridad
8. Modificación y extensión de la homologación del tipo de vehículo
9. Conformidad de la producción
10. Sanciones por disconformidad de la producción
11. Instrucciones de funcionamiento
12. Cese definitivo de la producción
13. Nombres y direcciones de los servicios técnicos responsables de la realización de los ensayos de homologación y de los organismos de homologación de tipo
14. Disposiciones transitorias

ANEXOS

- | | |
|---------|---|
| Anexo 1 | Comunicación |
| Anexo 2 | Disposición de la marca de homologación |
| Anexo 3 | Emplazamiento de los anclajes efectivos |
| Anexo 4 | Procedimiento de determinación del punto H y del ángulo real del torso de las plazas sentadas en vehículos de motor |
| Anexo 5 | Dispositivo de tracción |
| Anexo 6 | Número mínimo de puntos de anclaje y emplazamiento de los anclajes inferiores |

- Anexo 7 Ensayo dinámico por el que puede optarse en lugar del ensayo estático de resistencia de los anclajes de los cinturones de seguridad
- Anexo 8 Especificaciones del maniquí
- Anexo 9 Sistemas de anclajes ISOFIX y anclajes superiores ISOFIX
- Anexo 10 Plaza de asiento i-Size

1. ÁMBITO DE APLICACIÓN

El presente Reglamento se aplica a:

- a) los vehículos de las categorías M y N ⁽¹⁾ en lo referente a los anclajes de los cinturones de seguridad destinados a los ocupantes adultos de los asientos, orientados en el sentido de la marcha, en sentido contrario a la marcha u orientados hacia un lado;
- b) los vehículos de las categorías M₁ en lo referente a los sistemas de anclajes ISOFIX y los anclajes superiores ISOFIX destinados a sistemas de retención infantil. Los vehículos de otras categorías que estén equipados con anclajes ISOFIX también deben cumplir lo dispuesto en el presente Reglamento;
- c) los vehículos de todas las categorías con respecto a las plazas de asiento i-Size, si el fabricante del vehículo ha previsto alguna.

2. DEFINICIONES

A efectos del presente Reglamento, se entenderá por:

- 2.1. «Homologación del vehículo»: la homologación de un tipo de vehículo equipado con anclajes para tipos de cinturones de seguridad determinados.
- 2.2. «Tipo de vehículo»: una categoría de vehículos automóviles que no presentan entre sí diferencias esenciales por lo que respecta a las dimensiones, formas y materiales de los componentes de la estructura del vehículo o del asiento a la que estén fijados los anclajes del cinturón de seguridad y los sistemas de anclajes ISOFIX y los anclajes superiores ISOFIX, en su caso, ni, si la resistencia de los anclajes se somete al ensayo dinámico, así como la resistencia del suelo del vehículo cuando se la somete al ensayo estático en el caso de las plazas de asiento i-Size, por lo que respecta a las características de los componentes del sistema de retención, en especial la función de limitador de carga, que influyen en las fuerzas aplicadas a los anclajes de los cinturones de seguridad.
- 2.3. «Anclajes»: las partes de la estructura del vehículo o del asiento o de cualquier otra parte del vehículo a las cuales se deban sujetar los cinturones de seguridad.
- 2.4. «Anclaje efectivo»: el punto utilizado para determinar convencionalmente el ángulo de cada parte del cinturón de seguridad con respecto al usuario, según se prevé en el punto 5.4, es decir, el punto donde una correa debería sujetarse para obtener la misma posición prevista para cuando se use el cinturón, y que podrá ser o no el anclaje real, según la configuración del cinturón y la forma en que esté fijado a dicho punto.
 - 2.4.1. Por ejemplo:
 - 2.4.1.1. en caso de que en la estructura del vehículo o del asiento se utilice una guía de correa, se considerará anclaje efectivo el punto medio de la guía en el lugar donde la correa se separa de ella, del lado del usuario del cinturón, y
 - 2.4.1.2. en caso de que el cinturón pase directamente del usuario a un retractor fijado a la estructura del vehículo o a la estructura del asiento, sin intervención de una guía de correa, se considerará anclaje efectivo la intersección del eje del cilindro del retractor con el plano medio de la correa sobre el cilindro.
- 2.5. «Suelo»: la parte inferior de la carrocería del vehículo que une las paredes laterales de este. Tomado en este sentido, el suelo comprende las nervaduras, relieves embutidos y demás elementos eventuales de refuerzo, aunque estén por debajo del suelo, como, por ejemplo, los largueros y travesaños.

⁽¹⁾ Con arreglo a la definición de la Resolución consolidada sobre la construcción de vehículos (R.E.3), documento ECE/TRANS/WP.29/78/Rev.2, punto 2.

- 2.6. «Asiento»: una estructura que puede ser parte integrante de la estructura del vehículo, recubierta con tapicería y proyectada para acomodar a una persona adulta. El término engloba tanto un asiento individual como una parte de un asiento corrido diseñada para que se siente una persona.
- 2.6.1. «Asiento delantero para pasajeros»: el asiento cuyo punto H de su posición más avanzada se encuentra en el plano vertical transversal que pasa por el punto R del conductor o por delante del mismo.
- 2.6.2. «Asiento orientado hacia delante»: aquel que puede utilizarse con el vehículo en movimiento y que mira hacia la parte delantera del vehículo de manera que su plano vertical de simetría forma un ángulo de menos de $+ 10^\circ$ o $- 10^\circ$ Con el plano vertical de simetría del vehículo.
- 2.6.3. «Asiento orientado hacia atrás»: aquel que puede utilizarse con el vehículo en movimiento y que mira hacia la parte trasera del vehículo de manera que su plano vertical de simetría forma un ángulo de menos de $+ 10^\circ$ o $- 10^\circ$ Con el plano vertical de simetría del vehículo.
- 2.6.4. «Asiento orientado hacia un lado»: aquel que puede utilizarse con el vehículo en movimiento y que mira hacia un lado del vehículo de manera que su plano vertical de simetría forma un ángulo de $90 \pm 10^\circ$ Con el plano vertical de simetría del vehículo.
- 2.7. «Grupo de asientos»: bien un asiento corrido, bien asientos separados pero montados uno al lado del otro (es decir, con los anclajes delanteros de uno de los asientos alineados con los anclajes traseros de otro asiento o delante de los mismos, y alineados con los anclajes delanteros de otro asiento o detrás de los mismos), que ofrezcan una o varias plazas de asiento para adultos.
- 2.8. «Asiento corrido»: una estructura recubierta con tapicería y proyectada para que se siente más de una persona adulta.
- 2.9. «Tipo de asiento»: una categoría de asientos que no difieren entre sí en los siguientes aspectos esenciales:
- 2.9.1. forma, dimensiones y materiales de la estructura del asiento;
- 2.9.2. tipo y dimensiones de los sistemas de regulación y de todos los sistemas de bloqueo;
- 2.9.3. tipo y dimensiones de los anclajes del cinturón en el asiento, del anclaje del asiento y de las partes que forman parte de la estructura del vehículo.
- 2.10. «Anclaje del asiento»: el sistema de fijación del conjunto del asiento a la estructura del vehículo, con inclusión de las partes afectadas de dicha estructura.
- 2.11. «Sistema de regulación»: el dispositivo que permite ajustar el asiento o sus partes a una posición del ocupante sentado adaptada a su morfología; este dispositivo puede, en particular, permitir:
- 2.11.1. el desplazamiento longitudinal;
- 2.11.2. el desplazamiento vertical;
- 2.11.3. el desplazamiento angular;
- 2.12. «Sistema de desplazamiento»: un dispositivo que permite un desplazamiento angular o longitudinal, sin posición intermedia fija, del asiento o de una de sus partes, para facilitar el acceso al espacio situado detrás de dicho asiento.
- 2.13. «Sistema de bloqueo»: un dispositivo destinado a mantener inmóvil el asiento y sus partes en cualquier posición de uso y que incluya mecanismos para el bloqueo del respaldo con respecto al asiento y del asiento con respecto al vehículo.
- 2.14. «Zona de referencia»: el espacio entre dos planos longitudinales verticales, con una separación de 400 mm y simétricos respecto al punto H, y definidos por rotación del aparato en forma de cabeza descrito en el anexo 1 de Reglamento n° 21, de la vertical a la horizontal. El aparato deberá colocarse con arreglo a lo descrito en dicho anexo del Reglamento n° 21 y se regulará en su longitud máxima de 840 mm.
- 2.15. «Función de limitador de carga sobre el tórax»: la parte del cinturón de seguridad, del asiento o del vehículo destinada a limitar la intensidad de la fuerza de retención ejercida sobre el tórax del ocupante en caso de colisión.

- 5.5.2. Si el fabricante ha equipado el vehículo con cinturones de seguridad fijados a todos los anclajes prescritos para el asiento de que se trate, no será necesario que dichos anclajes se ajusten al requisito que figura en el punto 5.5.1, siempre que se ajusten a los demás requisitos del presente Reglamento. Además, el requisito al que se refiere el punto 5.5.1 no se aplicará a los anclajes adicionales que cumplan el requisito al que se refiere el punto 5.4.3.7.3.
- 5.5.3. Deberá ser posible retirar el cinturón de seguridad sin dañar el anclaje.
6. ENSAYOS
- 6.1. Ensayos generales para anclajes de cinturones de seguridad
- 6.1.1. Sin perjuicio de que se aplique lo dispuesto en el punto 6.2 y a petición del fabricante:
- 6.1.1.1. los ensayos se podrán realizar en una estructura del vehículo o en un vehículo completamente terminado;
- 6.1.1.2. los ensayos podrán limitarse a los anclajes correspondientes a un solo asiento o un solo grupo de asientos, siempre que:
- los anclajes de que se trate tengan las mismas características estructurales que los anclajes correspondientes a los demás asientos o grupos de asientos; y
 - cuando el asiento o grupo de asientos vaya provisto total o parcialmente de tales anclajes, las características estructurales del asiento o grupo de asientos sean las mismas que las de los demás asientos o grupos de asientos.
- 6.1.1.3. las ventanillas y las puertas podrán estar montadas o no estarlo, y estar cerradas o no estarlo;
- 6.1.1.4. se podrá montar cualquier elemento previsto normalmente y que pueda contribuir a la rigidez de la estructura del vehículo.
- 6.1.2. Los asientos deberán estar montados y colocados en la posición de conducción o de uso escogida por el servicio técnico encargado de realizar los ensayos de homologación, que será la menos favorable desde el punto de vista de la resistencia del sistema. La posición de los asientos deberá estar indicada en el acta. Si el asiento tiene un respaldo cuya inclinación es regulable, dicho respaldo deberá bloquearse de acuerdo con las especificaciones del fabricante o, a falta de dichas especificaciones, de manera que forme un ángulo efectivo lo más próximo posible a 25° en el caso de los vehículos de las categorías M₁ y N₁ y a 15° en el caso de los vehículos de las demás categorías.
- 6.2. Inmovilización del vehículo para los ensayos de anclajes de cinturones de seguridad y para los ensayos de anclajes ISOFIX
- 6.2.1. El método que se utilice para inmovilizar el vehículo durante el ensayo no deberá reforzar los anclajes de los cinturones de seguridad, o los anclajes ISOFIX y su zona de anclaje, ni atenuar la deformación normal de la estructura.
- 6.2.2. Se considerará que un dispositivo de inmovilización es apropiado cuando no ejerza efecto alguno sobre una zona que se extienda a lo largo de toda la anchura de la estructura y cuando dicho dispositivo se acople al vehículo o a la estructura a un mínimo de 500 mm por delante y 300 mm por detrás de dicho anclaje.
- 6.2.3. Se recomienda hacer descansar la estructura sobre unos soportes dispuestos aproximadamente en la vertical de los ejes de las ruedas o, si ello no es posible, en la vertical de los puntos de fijación de la suspensión.
- 6.2.4. Si se utiliza un método de inmovilización diferente del que se estipula en los puntos 6.2.1 y 6.2.3 del presente Reglamento, deberá demostrarse que es equivalente.
- 6.3. Requisitos generales de ensayo para anclajes de cinturones de seguridad
- 6.3.1. Todos los anclajes de los cinturones de seguridad del mismo grupo de asientos serán sometidos a ensayo simultáneamente. No obstante, si existe el riesgo de que una carga asimétrica de los asientos o anclajes pueda producir fallos, podrá realizarse un ensayo suplementario con carga asimétrica.
- 6.3.2. La fuerza de tracción deberá aplicarse en un ángulo de 10 ± 5° por encima de la horizontal en un plano paralelo al plano longitudinal medio del vehículo.

Deberá aplicarse una carga previa del 10 % con una tolerancia del ± 30 % de la carga objetivo; esta carga se incrementará al 100 % de la carga objetivo pertinente.

- 6.3.3. La aplicación completa de la carga deberá efectuarse en el tiempo más breve posible, y en un tiempo máximo de aplicación de la carga de 60 segundos.

No obstante, el fabricante puede solicitar que la aplicación de la carga se consiga en 4 segundos.

Los anclajes deberán resistir la carga especificada durante, por lo menos, 0,2 segundos.

- 6.3.4. Los dispositivos de tracción que se deberán utilizar en los ensayos descritos en el punto 6.4 figuran en el anexo 5. Los dispositivos mostrados en la figura 1 del anexo 5 deben colocarse en el cojín del asiento y, a continuación, cuando sea posible, deben apretarse contra el respaldo del asiento mientras se tensa la correa del cinturón a su alrededor. El dispositivo mostrado en la figura 2 del anexo 5 debe colocarse en su posición, y la correa del cinturón debe instalarse sobre el dispositivo y tensarse. No deberá ejercerse ninguna carga previa en los anclajes de los cinturones de seguridad que supere el mínimo necesario para un emplazamiento correcto del dispositivo de ensayo durante esta operación.

La anchura del dispositivo de tracción de 254 mm o de 406 mm utilizado en cada plaza de asiento deberá ser lo más cercana posible a la distancia entre los anclajes inferiores.

El emplazamiento del dispositivo de tracción deberá evitar cualquier influencia mutua durante el ensayo de tracción que tenga un efecto negativo en la carga y la distribución de la misma.

- 6.3.5. Los anclajes de los asientos que lleven anclajes superiores deberán someterse a ensayo en las siguientes condiciones:

- 6.3.5.1. Asientos laterales delanteros:

Los anclajes deberán someterse al ensayo que se establece en el punto 6.4.1, durante el cual la fuerza les será transmitida mediante un dispositivo que reproducirá la geometría de un cinturón de seguridad de tres puntos provisto de retractor con polea de reenvío o de guía de correa en el anclaje superior. Además, en caso de que el número de anclajes sea superior al establecido en el punto 5.3, dichos anclajes deberán someterse al ensayo especificado en el punto 6.4.5, en el cual la fuerza les será transmitida mediante un dispositivo que reproduzca la geometría del tipo de cinturón de seguridad destinado a fijarse en dichos anclajes.

- 6.3.5.1.1. Si el retractor no está fijado al anclaje inferior lateral prescrito, o si está fijado al anclaje superior, los anclajes inferiores deberán someterse también al ensayo que se establece en el punto 6.4.3.

- 6.3.5.1.2. En tal caso, los ensayos que se establecen en los puntos 6.4.1 y 6.4.3 podrán realizarse, si así lo solicita el fabricante, en dos estructuras diferentes.

- 6.3.5.2. Asientos laterales traseros y todos los asientos centrales:

Los anclajes deberán someterse al ensayo que se establece en el punto 6.4.2, durante el cual la fuerza les será transmitida mediante un dispositivo que reproduzca la geometría de un cinturón de seguridad de tres puntos sin retractor, y al ensayo que se establece en el punto 6.4.3, durante el cual la fuerza se transmitirá a los dos anclajes inferiores mediante un dispositivo que reproduzca la geometría de un cinturón subabdominal. Ambos ensayos podrán realizarse, si así lo solicita el fabricante, en dos estructuras diferentes.

- 6.3.5.3. Cuando el fabricante entregue su vehículo con cinturones de seguridad, los anclajes correspondientes, a petición del fabricante, podrán someterse únicamente a un ensayo en el que se les transmitan las cargas mediante un dispositivo que reproduzca la geometría de los tipos de cinturones que se han de fijar a dichos anclajes.

- 6.3.6. Si no se han previsto anclajes superiores para los asientos laterales y centrales, los anclajes inferiores se someterán al ensayo que se establece en el punto 6.4.3, en el que las cargas se transmiten a dichos anclajes mediante un dispositivo que reproduce la geometría de un cinturón subabdominal.

- 6.3.7. Si el vehículo está proyectado para admitir otros dispositivos que no permitan que las correas se ajusten directamente a los anclajes sin la intervención de rodillos, etc., o que necesiten, además de los anclajes que

- se mencionan en el punto 5.3, otros anclajes suplementarios, el cinturón de seguridad o el sistema de cables, rodillos, etc., que represente el equipo del cinturón de seguridad se ajustará mediante tales dispositivos a los anclajes del vehículo y estos se someterán a los ensayos establecidos en el punto 6.4, según proceda.
- 6.3.8. Se podrán utilizar métodos de ensayo distintos a los establecidos en el punto 6.3 siempre y cuando se demuestre su equivalencia.
- 6.4. Requisitos específicos de ensayo para anclajes de cinturones de seguridad
- 6.4.1. Ensayo en configuración de un cinturón de seguridad de tres puntos provisto de retractor con polea de reenvío o guía de correa en el anclaje superior
- 6.4.1.1. En el anclaje superior se instalará o bien una polea de reenvío o una guía para cable o correa especialmente adaptada para transmitir la fuerza procedente del dispositivo de tracción, o la polea de reenvío o guía de correa suministrada por el fabricante.
- 6.4.1.2. Se aplicará una carga de ensayo de $1\,350 \pm 20$ daN a un dispositivo de tracción (véase la figura 2 del anexo 5) acoplado a los anclajes del mismo tipo de cinturón, mediante un dispositivo que reproduzca la geometría de la correa superior de torso de dicho cinturón de seguridad. Para los vehículos de categorías distintas de M_1 y N_1 , la carga de ensayo será de 675 ± 20 daN, excepto en el caso de los vehículos de las categorías M_3 y N_3 , cuya carga de ensayo será de 450 ± 20 daN.
- 6.4.1.3. Simultáneamente, se aplicará una fuerza de tracción de $1\,350 \pm 20$ daN a un dispositivo de tracción (véase la figura 1 del anexo 5) fijado a los dos anclajes inferiores. Para los vehículos de categorías distintas de M_1 y N_1 , la carga de ensayo será de 675 ± 20 daN, excepto en el caso de los vehículos de las categorías M_3 y N_3 , cuya carga de ensayo será de 450 ± 20 daN.
- 6.4.2. Ensayo en configuración de un cinturón de seguridad de tres puntos sin retractor o con retractor en el anclaje superior
- 6.4.2.1. Se aplicará una carga de ensayo de $1\,350 \pm 20$ daN a un dispositivo de tracción (véase la figura 2 del anexo 5) fijado al anclaje superior y al anclaje inferior opuesto del mismo cinturón, utilizando un retractor fijado al anclaje superior, si lo suministra el fabricante. Para los vehículos de categorías distintas de M_1 y N_1 , la carga de ensayo será de 675 ± 20 daN, excepto en el caso de los vehículos de las categorías M_3 y N_3 , cuya carga de ensayo será de 450 ± 20 daN.
- 6.4.2.2. Simultáneamente, se aplicará una fuerza de tracción de $1\,350 \pm 20$ daN a un dispositivo de tracción (véase la figura 1 del anexo 5) fijado a los anclajes inferiores. Para los vehículos de categorías distintas de M_1 y N_1 , la carga de ensayo será de 675 ± 20 daN, excepto en el caso de los vehículos de las categorías M_3 y N_3 , cuya carga de ensayo será de 450 ± 20 daN.
- 6.4.3. Ensayo en configuración de un cinturón subabdominal
- Se aplicará una carga de ensayo de $2\,225 \pm 20$ daN a un dispositivo de tracción (véase la figura 1 del anexo 5) fijado a los dos anclajes inferiores. Para los vehículos de categorías distintas de M_1 y N_1 , la carga de ensayo será de $1\,110 \pm 20$ daN, excepto en el caso de los vehículos de las categorías M_3 y N_3 , cuya carga de ensayo será de 740 ± 20 daN.
- 6.4.4. Ensayo de los anclajes dispuestos en su totalidad en la estructura del asiento o repartidos entre la estructura del vehículo y la del asiento
- 6.4.4.1. Se realizarán, según el caso, los ensayos que se especifican en los puntos 6.4.1 a 6.4.3, añadiendo, para cada asiento y para cada grupo de asientos, la carga suplementaria que abajo se indica.
- 6.4.4.2. Las cargas indicadas en los puntos 6.4.1 a 6.4.3 se complementarán con una fuerza igual a 20 veces la masa del asiento completo. La carga inercial se aplicará al asiento o a las partes pertinentes del asiento que correspondan al efecto físico de la masa del asiento de que se trate en los anclajes del mismo. El fabricante determinará la carga o cargas adicionales aplicadas y la distribución de las mismas. Todo ello se someterá a la aprobación del servicio técnico.
- Por lo que se refiere a los vehículos de las categorías M_2 y N_2 , esta fuerza deberá ser igual a 10 veces la masa del asiento completo; para los vehículos de las categorías M_3 y N_3 , la fuerza deberá ser igual a 6,6 veces la masa del asiento completo.

- 6.4.5. Ensayo en configuración de cinturones de seguridad de tipos especiales
- 6.4.5.1. Se aplicará una carga de ensayo de $1\,350 \pm 20$ daN a un dispositivo de tracción (véase la figura 2 del anexo 5) acoplado a los anclajes de tales cinturones de seguridad mediante un dispositivo que reproduzca la geometría de la correa o correas superiores de torso.
- 6.4.5.2. Simultáneamente, se aplicará una fuerza de tracción de $1\,350 \pm 20$ daN a un dispositivo de tracción (véase la figura 3 del anexo 5) fijado a los dos anclajes inferiores.
- 6.4.5.3. Para los vehículos de categorías distintas de M_1 y N_1 , esta carga de ensayo será de 675 ± 20 daN, excepto en el caso de los vehículos de las categorías M_3 y N_3 , cuya carga de ensayo será de 450 ± 20 daN.
- 6.4.6. Ensayo en el caso de los asientos orientados en sentido contrario a la marcha
- 6.4.6.1. Los puntos de anclaje se someterán a ensayo de acuerdo con las fuerzas prescritas en los puntos 6.4.1 a 6.4.3, según convenga. En cada caso, la carga de ensayo se corresponderá con la carga prescrita para los vehículos de las categorías M_3 o N_3 .
- 6.4.6.2. La carga de ensayo se dirigirá hacia delante en relación con la plaza de asiento de que se trate, de acuerdo con el procedimiento descrito en el punto 6.3.
- 6.4.7. Ensayo en el caso de los asientos orientados hacia un lado
- 6.4.7.1. Los puntos de anclaje se someterán a ensayo de acuerdo con las fuerzas prescritas en el punto 6.4.3 para los vehículos M_3 .
- 6.4.7.2. La carga de ensayo se dirigirá hacia delante en relación con el vehículo, de acuerdo con el procedimiento descrito en el punto 6.3. En el caso de que los asientos orientados hacia un lado estén agrupados en una estructura básica, los puntos de anclaje del cinturón de seguridad de cada plaza de asiento del grupo se someterán a ensayo por separado. Además, la estructura básica se someterá a ensayo conforme a lo dispuesto en el punto 6.4.8.
- 6.4.7.3. En la figura 1b del anexo 5 se muestra el dispositivo de tracción adaptado para el ensayo de los asientos orientados hacia un lado.
- 6.4.8. Ensayo de la estructura básica de los asientos orientados hacia un lado
- 6.4.8.1. La estructura básica de un asiento orientado hacia un lado o de un grupo de dichos asientos se someterá a ensayo de acuerdo con las fuerzas prescritas en el punto 6.4.3 para los vehículos M_3 .
- 6.4.8.2. La carga de ensayo se dirigirá hacia delante en relación con el vehículo, de acuerdo con el procedimiento descrito en el punto 6.3. En el caso de que los asientos orientados hacia un lado estén agrupados, la estructura básica se someterá a ensayo simultáneamente para cada plaza de asiento del grupo.
- 6.4.8.3. El punto de aplicación de las fuerzas prescritas en los puntos 6.4.3 y 6.4.4 estará lo más cerca posible del punto H y en la recta definida por un plano horizontal y un plano vertical transversal que pase por el punto H de cada plaza sentada.
- 6.5. Cuando se trate de un grupo de asientos con arreglo a lo descrito en el punto 1 del anexo 7, el fabricante del vehículo podrá optar por realizar el ensayo dinámico al que se refiere el anexo 7, como alternativa al ensayo estático que se establece en los puntos 6.3 y 6.4.
- 6.6. Requisitos del ensayo estático
- 6.6.1. Se someterá a ensayo la resistencia de los sistemas de anclajes ISOFIX aplicando las fuerzas prescritas en el punto 6.6.4.3 al dispositivo de aplicación de fuerza estática (SFAD) con las fijaciones ISOFIX bien aseguradas.
- Cuando se trate de un anclaje superior ISOFIX, deberá efectuarse un ensayo adicional tal como se prescribe en el punto 6.6.4.4.
- En el caso de una plaza de asiento i-Size, deberá efectuarse un ensayo adicional tal como se prescribe en el punto 6.6.4.5.

Si el anclaje superior está integrado en el asiento del vehículo, este ensayo deberá realizarse con la correa de anclaje superior ISOFIX.

No deberá producirse ningún rompimiento y deberán cumplirse los requisitos en materia de desplazamiento presentados en el cuadro 2.

Nota: Este ensayo no debe efectuarse en caso de que algún anclaje del sistema de cinturones de seguridad del vehículo esté integrado en la estructura del asiento del vehículo, y el asiento del vehículo ya haya sido sometido a ensayo y homologado en cuanto al cumplimiento de los ensayos de carga del anclaje requeridos por el presente Reglamento para la retención de pasajeros adultos.

7. INSPECCIÓN DURANTE LOS ENSAYOS ESTÁTICOS Y DESPUÉS DE LOS MISMOS PARA ANCLAJES DEL CINTURÓN DE SEGURIDAD

7.1. Todos los anclajes deberán poder resistir el ensayo descrito en los puntos 6.3 y 6.4. Se podrá admitir una deformación permanente, incluida una ruptura parcial o el rompimiento de un anclaje o de la zona circundante, siempre que la carga prescrita se haya mantenido durante el tiempo previsto. Durante el ensayo deberán respetarse las distancias mínimas para los anclajes efectivos inferiores recogidas en el punto 5.4.2.5 y los requisitos mencionados en el punto 5.4.3.6 para los anclajes efectivos superiores.

7.1.1. Para los vehículos de la categoría M_1 cuya masa total admisible no supere las 2,5 toneladas, en caso de que el anclaje superior del cinturón de seguridad esté fijado a la estructura del asiento, el anclaje superior efectivo no deberá traspasar durante el ensayo un plano transversal que pasa por los puntos R y C del asiento en cuestión (véase la figura 1 del anexo 3 del presente Reglamento).

Para los vehículos distintos de los mencionados, el anclaje superior efectivo del cinturón de seguridad no deberá traspasar durante el ensayo un plano transversal con una inclinación de 10° hacia delante que pasa por el punto R del asiento.

En el ensayo deberá medirse el desplazamiento máximo del punto de anclaje superior efectivo.

Si el desplazamiento del punto de anclaje superior efectivo sobrepasa la mencionada limitación, el fabricante deberá demostrar a satisfacción del servicio técnico que no existe peligro para el ocupante. Por ejemplo, para demostrar que hay suficiente espacio de supervivencia, puede realizarse un ensayo según el procedimiento recogido en el Reglamento n° 94 o un ensayo mediante carro con el impulso correspondiente.

7.2. En los vehículos que estén dotados de sistemas de desplazamiento y de bloqueo de los asientos que permitan salir del vehículo a los ocupantes de todos los asientos, dichos sistemas deberán poderse seguir accionando manualmente una vez que haya cesado de aplicarse la fuerza de tracción.

7.3. Después de los ensayos se tomará nota de cualquier deterioro de los anclajes y de las estructuras que hayan soportado la carga durante los ensayos.

7.4. Excepcionalmente, no será necesario que los anclajes superiores instalados en uno o más asientos de vehículos de la categoría M_3 y de la categoría M_2 de más de 3,5 toneladas que se ajusten a los requisitos establecidos en el Reglamento n° 80, cumplan los requisitos establecidos en el punto 7.1 en relación con la conformidad con el punto 5.4.3.6.

8. MODIFICACIÓN Y EXTENSIÓN DE LA HOMOLOGACIÓN DEL TIPO DE VEHÍCULO

8.1. Toda modificación del tipo de vehículo deberá notificarse al organismo de homologación de tipo que homologó el tipo de vehículo. A continuación, este podrá optar por una de las posibilidades siguientes:

8.1.1. considerar que las modificaciones probablemente no tendrán consecuencias negativas apreciables y que en cualquier caso el vehículo sigue cumpliendo los requisitos, o bien

8.1.2. exigir una nueva acta de ensayo al servicio técnico responsable de realizar los ensayos.

8.2. La confirmación o denegación de la homologación se comunicará a las Partes del Acuerdo que apliquen el presente Reglamento, especificándose las modificaciones, mediante el procedimiento indicado en el punto 4.3.

8.3. El organismo competente que expida la extensión de la homologación asignará un número de serie a dicha extensión e informará de ello a las demás Partes del Acuerdo de 1958 que apliquen el presente Reglamento por medio de un formulario de notificación conforme al modelo que figura en el anexo 1 del presente Reglamento.

ANEXO 5

DISPOSITIVO DE TRACCIÓN

Figura 1

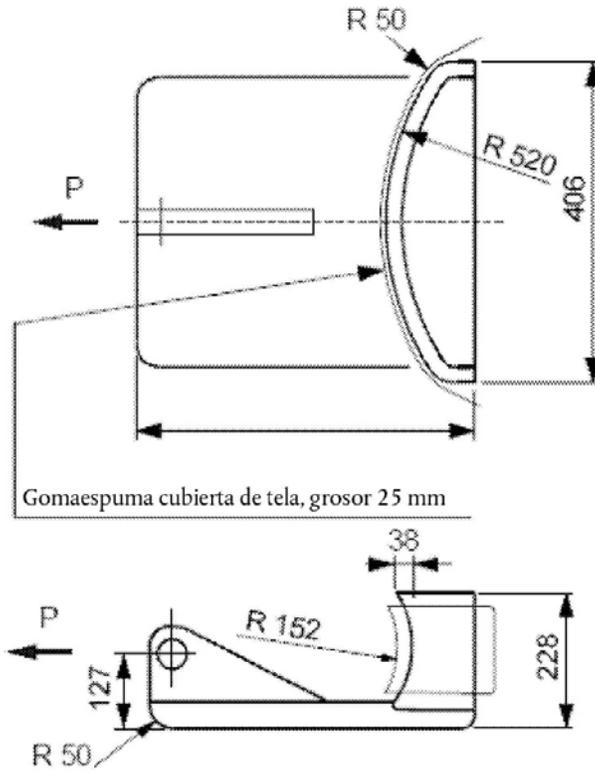


Figura 1a

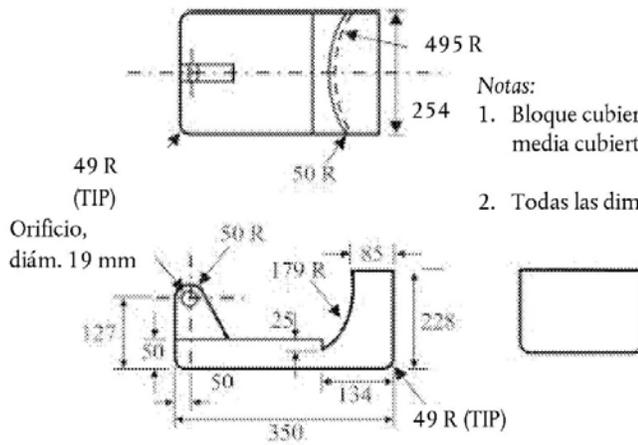
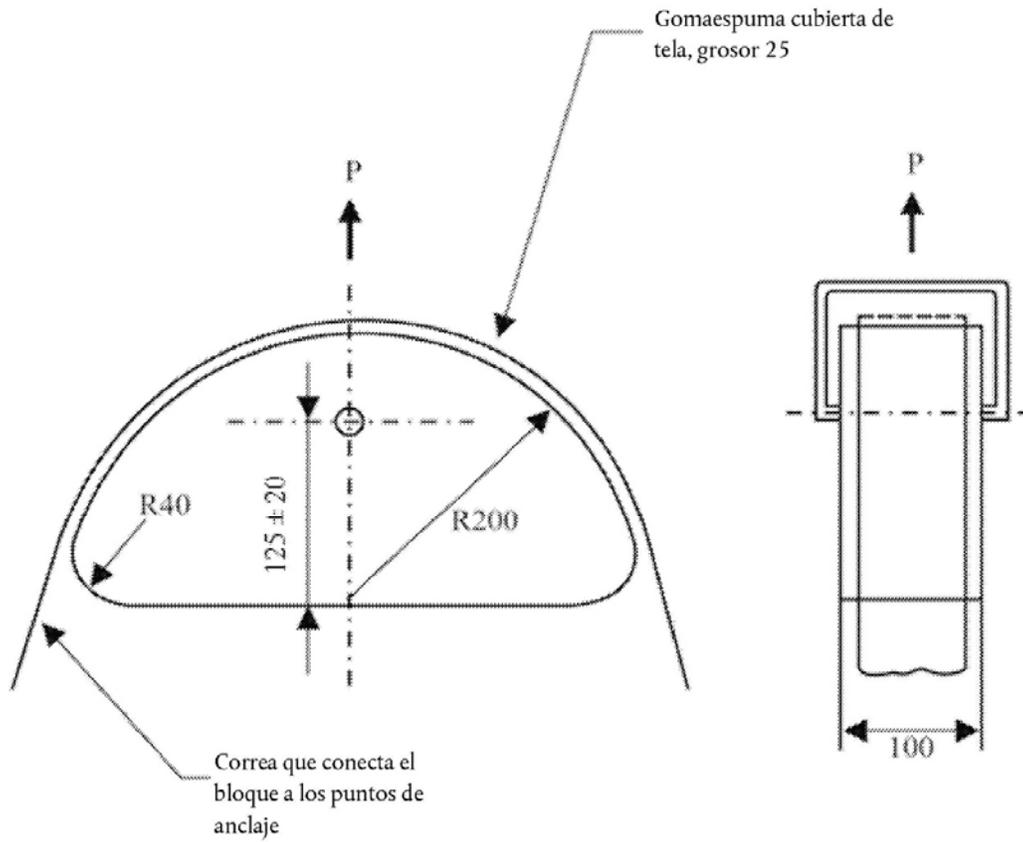


Figura 2

(Dimensiones en milímetros)



Para la fijación de la correa, el dispositivo de tracción del cinturón del hombro puede modificarse añadiendo dos rebordes y/o algunos pernos para evitar que la correa se desprenda durante el ensayo de tracción.

ANEXO 6

NÚMERO MÍNIMO DE PUNTOS DE ANCLAJE Y EMPLAZAMIENTO DE LOS ANCLAJES INFERIORES

Categoría de vehículo	Plazas de asiento orientadas hacia delante				Orientadas hacia atrás	Hacia un lado
	Lateral		Central			
	Parte delantera	Las demás	Parte delantera	Las demás		
M ₁	3	3	3	3	2	—
M ₂ ≤ 3,5 toneladas	3	3	3	3	2	—
M ₂ > 3,5 toneladas	3 ⊕	3 o 2 ‡	3 o 2 ‡	3 o 2 ‡	2	—
M ₃	3 ⊕	3 o 2 ‡	3 o 2 ‡	3 o 2 ‡	2	2
N ₁	3	3 o 2 ∅	3 o 2 *	2	2	—
N ₂ y N ₃	3	2	3 o 2 *	2	2	—

Explicación de los símbolos utilizados:

2: dos anclajes inferiores que permiten la instalación de un cinturón de seguridad de tipo B o, cuando así lo exija el anexo 13, apéndice 1, de la Resolución consolidada sobre la construcción de vehículos (R.E.3), de tipo Br, Br3, Br4m o Br4Nm.

3: dos anclajes inferiores y un anclaje superior que permitan la instalación de un cinturón de seguridad de tres puntos de tipo A o, cuando así lo exija el anexo 13, apéndice 1, de la Resolución consolidada sobre la construcción de vehículos (R.E.3), de tipo Ar, Ar4m o Ar4Nm.

∅: remite al punto 5.3.3 (se toleran dos anclajes si el asiento es contiguo a una zona de paso).

*: remite al punto 5.3.4 (se toleran dos anclajes si el parabrisas está fuera de la zona de referencia).

‡: remite al punto 5.3.5 (se toleran dos anclajes si no hay nada en la zona de referencia).

⊕: remite al punto 5.3.7 (disposición particular para el piso superior de un vehículo de dos pisos).

ANEXO 4: Propiedades de la pletina utilizada en la construcción de la estructura.



PLATINAS

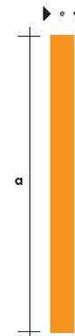
**PERFILES LAMINADOS
PLATINAS**

Especificaciones Generales

Calidad	ASTM A36 / SAE 1008
Otras calidades	Previa Consulta
Large normal	6,00 m
Otros largos	Previa Consulta
Acabado	Natural
Otro acabado	Previa Consulta



DENOMINACION	DIMENSIONES		PESO		AREA
	mm		kg/m	kg/6m	cm2
	a	e			
PLT 12X3	12	3	0.28	1.70	0.36
PLT 12X4	12	4	0.38	2.45	0.48
PLT 12X6	12	6	0.57	3.40	0.72
PLT 19X3	19	3	0.45	2.68	0.57
PLT 19X4	19	4	0.60	3.58	0.76
PLT 19X6	19	6	0.89	5.37	1.15
PLT 25X3	25	3	0.59	3.53	0.75
PLT 25X4	25	4	0.79	4.71	1.00
PLT 25X3	25	6	1.18	7.07	1.50
PLT 25X12	30	3	0.71	4.24	0.90
PLT 30X4	30	4	0.94	5.65	1.20
PLT 30X6	30	6	1.41	8.47	1.80
PLT 30X9	30	9	2.12	12.71	2.70
PLT 30X12	30	12	2.83	16.95	3.60
PLT 38X3	38	3	0.89	5.37	1.15
PLT 38X4	38	4	1.19	7.16	1.52
PLT 38X6	38	6	1.79	11.40	2.28
PLT 38X9	38	9	2.69	16.11	3.42
PLT 38X12	38	12	3.58	21.48	4.56
PLT 50X3	50	3	1.18	7.08	1.50
PLT 50X4	50	4	1.58	9.42	2.00
PLT 50X6	50	6	2.26	14.16	3.00
PLT 50X9	50	9	3.53	21.20	4.50
PLT 50X12	50	12	4.71	28.26	6.00
PLT 65X6	65	6	3.06	18.37	3.90
PLT 65X9	65	9	4.59	27.55	5.85
PLT 65X12	65	12	6.12	36.73	7.80
PLT 75X6	75	6	3.53	21.20	4.50
PLT 75X9	75	9	5.30	31.80	6.75
PLT 75X8	75	8	7.07	28.26	9.00
PLT 75X12	75	12	7.07	42.39	9.00
PLT 100X6	100	6	4.71	28.26	6.00
PLT 100X8	100	8	7.07	37.68	9.00
PLT 100X9	100	9	7.07	43.00	9.00
PLT 100X12	100	12	9.42	58.00	12.00
PLT 120X12	120	12	67.82	67.82	14.40
PLT 150X15	150	15	105.88	105.88	22.50
PLT 150X20	150	20	145.44	145.00	30.00



ANEXO 5: Propiedades del tubo estructural cuadrado utilizado en la construcción de la estructura.



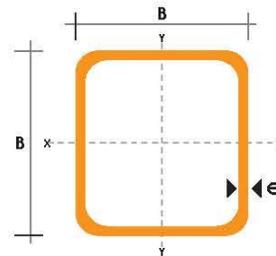
TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO

Especificaciones Generales

Norma	ASTM A-500
Recubrimiento	Negro o galvanizado
Largo normal	6 mts.
Otros largos	Previa Consulta
Dimensiones	Desde 20mm a 100mm
Espesor	Desde 2,0mm a 3,0mm



DIMENSIONES			AREA	EJES X-Xe Y-Y		
A	ESPEJOR	PESO	AREA	I	W	i
mm	mm	Kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
30	1,5	1,35	1,65	2,19	1,46	1,15
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97
50	2,0	3,03	3,74	14,13	5,65	1,94
50	3,0	4,48	5,61	21,20	8,48	1,91
60	2,0	3,66	3,74	21,26	7,09	2,39
60	3,0	5,42	6,61	35,06	11,69	2,34
75	2,0	4,52	5,74	50,47	13,46	2,97
75	3,0	6,71	8,41	71,54	19,08	2,92
75	4,0	8,59	10,95	89,98	24,00	2,87
100	2,0	6,17	7,74	122,99	24,60	3,99
100	3,0	9,17	11,41	176,95	35,39	3,94
100	4,0	12,13	14,95	226,09	45,22	3,89
100	5,0	14,40	18,36	270,57	54,11	3,84



ANEXO 6: Propiedades del tubo estructural redondo utilizado en la construcción de la estructura.



DIPAC[®]
PRODUCTOS DE ACERO

TUBO POSTE

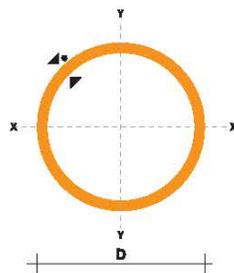
TUBO POSTE
Cerramientos, Estructuras y Funiculares

Especificaciones Generales

Norma	ASTM A-500
Recubrimiento	Galvanizado
Largo normal	6 mts.
Otros largos	Previa Consulta
Dimensiones	Desde 1/2" a 4"
Espesor	Desde 1,8mm a 2,0mm



DIMENSIONES				PROPIEDADES			
DIAMETRO EXTERIOR		ESPESOR	PESO	AREA	I	W	I
D	e	P	A	I	W	I	
Pulg.	mm	mm	Kg/m	cm ²	cm ³	cm ³	cm
1"	25.40	1.80	1.09	1.34	0.93	0.73	0.83
1"	25.40	2.00	1.21	1.47	1.01	0.79	0.83
1 1/4"	31.75	1.80	1.37	1.69	1.90	1.20	1.06
1 1/4"	31.75	2.00	1.52	1.87	2.07	1.30	1.05
1 1/2"	38.10	1.80	1.65	2.05	3.38	1.78	1.28
1 1/2"	38.10	2.00	1.84	2.27	3.70	1.94	1.28
1 3/4"	44.45	1.80	1.98	2.41	5.48	2.47	1.51
1 3/4"	44.45	2.00	2.20	2.67	6.01	2.70	1.50
1 7/8"	47.63	1.80	2.11	2.59	6.80	2.86	1.62
1 7/8"	47.63	2.00	2.34	2.87	7.46	3.13	1.61
2"	50.80	1.80	2.22	2.77	8.32	3.27	1.73
2"	50.80	2.00	2.48	3.07	9.13	3.59	1.73
2 3/8"	60.33	2.00	2.92	3.67	15.58	5.17	2.06
2 1/2"	63.50	2.00	3.09	3.86	18.27	5.75	2.17
2 7/8"	73.03	2.00	3.56	4.46	28.14	7.71	2.51
3"	88.90	2.00	4.35	5.46	51.54	11.60	3.07
4"	114.30	2.00	5.67	7.06	111.23	19.46	3.97



NOMENCLATURA

A=	Area de la selección transversal del tubo, cm ²
I=	Momento de inercia de la sección, cm ⁴
W=	Módulo resistente de la sección, cm ³
i=	Radio de giro de la sección cm

ANEXO 7: Resultados de los ensayos de flexión de acero ASTM A36.



Centro de Fomento Productivo
Metalmecánico Carrocero



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

RECEPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

DATOS DEL CLIENTE	
Empresa / Cliente: Luis Antonio Martínez Calderón	
DIRECCIÓN: Ingahurco- Ambato	
NÚM. DE CEDULA / RUC: 1804626909	TELÉFONO: 0986790983
E-MAIL: lmartin_1097@hotmail.com	

DATOS INFORMATIVOS	
Laboratorio: Resistencia de Materiales	
Designación del material: Material metálico ASTM A-36.	

ENSAYO SOLICITADO				
No.	No. DE MUESTRA	DESCRIPCIÓN	FECHAS	
			RECEPCIÓN	ENSAYO
1	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-1	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016
2	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-2	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016
3	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-3	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016
4	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-4	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016
5	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-5	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016



DATOS INFORMATIVOS: De acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo las probetas cumplen con el número mínimo de muestras y dimensiones.

	
Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Fernando Galarza Chacón	Ing. Esteban López Espinel
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC
	
Cliente	

NOTA: LA INFORMACIÓN CONSIGNADA EN ESTE FORMULARIO ES DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL CLIENTE. POSTERIORMENTE A LA EJECUCIÓN DEL(LOS) ENSAYO(S) NO SE ADMITIRÁ ARREGLOS DE ESTA INFORMACIÓN, NI DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. FAVOR REVISAR ANTES DE SU FIRMA.



LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

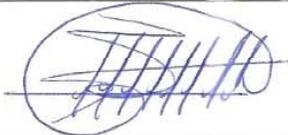
ENSAYO DE FLEXIÓN DE MATERIALES METALICOS

Designación del material: Tubo estructural cuadrado.
Método de ensayo: Método normalizado y no normalizado.
Empresa / Cliente: Luis Antonio Martínez Calderón
Fecha de Inicio de Ensayo: 09 de Agosto de 2016.
Fecha de Finalización de Ensayo: 15 de Agosto de 2016.

Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de materiales metálicos. Las muestras fueron entregadas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del CFPMC del H.G.P. Tungurahua.

Número de Probetas cuantificadas

Nº	Identificación de muestra	Producto	Material	Dimensiones (mm)	Cantidad
1	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ - ASTM A-36	Platina	ASTM A-36	30x4	5

	
Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Fernando Galarza Chacón	Ing. Esteban López Espinel
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

Ambato, 19 de Agosto de 2016.

Nº. Factura. 001-002-000001282



Centro de Fomento Productivo
Metalmecánico Carrocero



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

Resultados

Muestra	Identificación de muestra	Designación del material	Método	Temperatura y humedad	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Carga fluencia (N)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Deflexión (mm)
1	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-1	ASTM A-36	No normalizado	13°C, 82%	6011,44	50,10	5572,814	46,44	7,988
2	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-2	ASTM A-36	No normalizado	13°C, 82%	5867,66	48,90	5416,61	45,13	7,671
3	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-3	ASTM A-36	No normalizado	13°C, 82%	5888,38	49,07	5415,03	45,13	8,017
4	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-4	ASTM A-36	No normalizado	13°C, 82%	5864,71	48,87	5392,94	44,94	7,872
5	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-5	ASTM A-36	No normalizado	13°C, 82%	5833,15	48,61	5415,03	45,13	7,906

Código: RG-RM-001

Fecha de Elaboración: 08-08-2016

Fecha de última aprobación: 15-08-2016

Revisión: 1

INFORME DE ENSAYO DE
FLEXIÓN MATERIALES
METÁLICOS

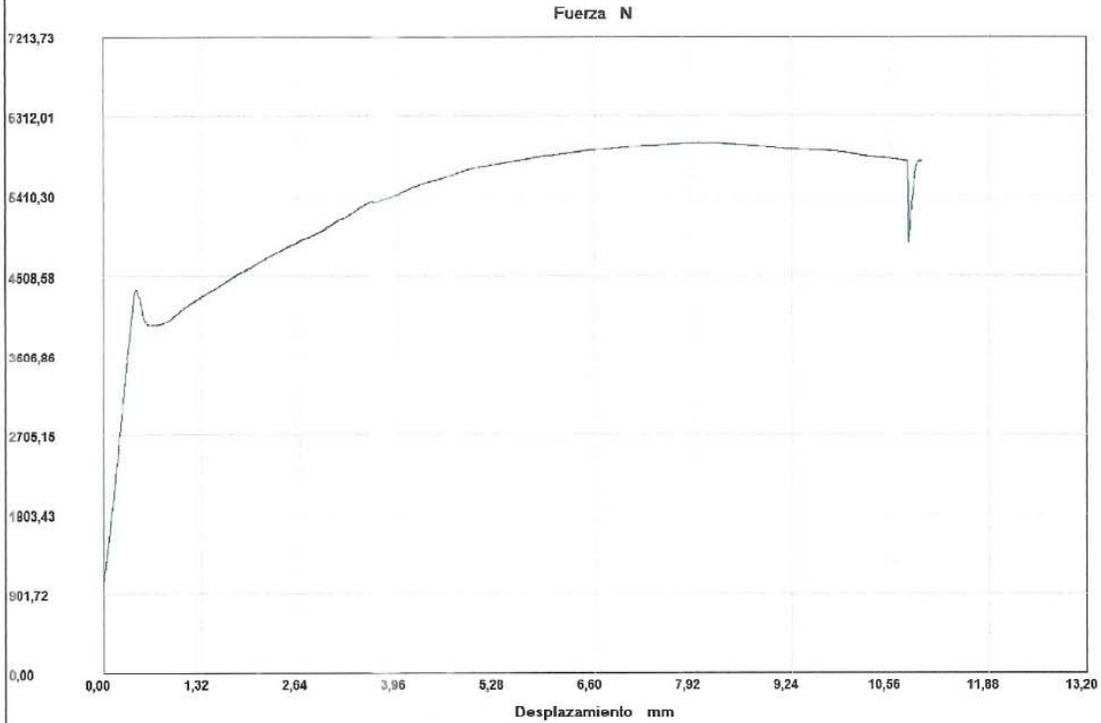
Página 2 de 2

INFORME :
ENSAYO :

EFM 01-LUIS MARTINEZ
FLEXION 3P



Referencia : ASTM A36 30X4
Cliente :
Calidad :
Operario : ING. F. GALARZA
Norma : ASTM E290-14
Fecha : 11/08/2016
Hora : 11:06:08
Temperatura : 13
H.R.% : 82
Pedido : UTA



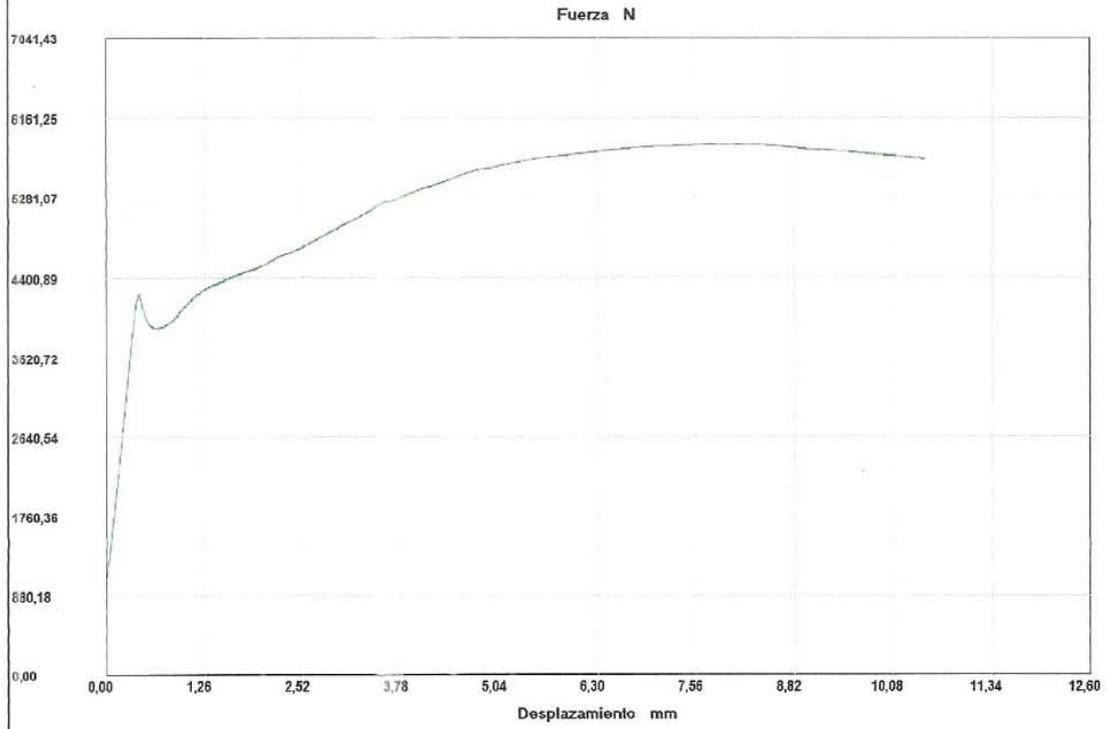
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 1	6011,44	50,10	5572,81	46,44
Media	6011,440	50,095	5572,810	46,440
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	6011,440	50,095	5572,810	46,440

INFORME :
ENSAYO :

EFM 01-LUIS MARTINEZ
FLEXION 3P



Referencia : ASTM A36 30X4
Cliente :
Calidad :
Operario : ING. F. GALARZA
Norma : ASTM E290-14
Fecha : 11/08/2016
Hora : 11:06:08
Temperatura : 13
H.R.% : 82
Pedido : UTA



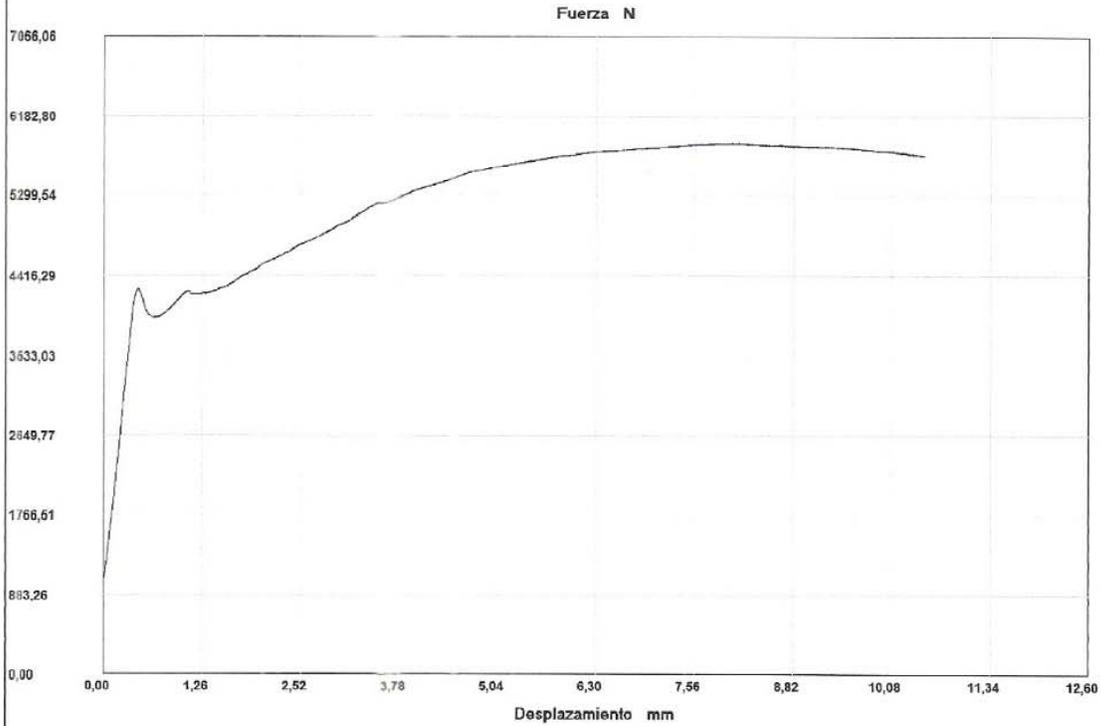
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 2	5867,86	48,90	5416,61	45,13
Media	5867,860	48,899	5416,610	45,125
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	5867,860	48,899	5416,610	45,125

INFORME :
ENSAYO :

EFM 01-LUIS MARTINEZ
FLEXION 3P



Referencia : ASTM A36 30X4
Cliente :
Calidad :
Operario : ING. F. GALARZA
Norma : ASTM E290-14
Fecha : 11/08/2016
Hora : 11:06:08
Temperatura : 13
H.R.% : 82
Pedido : UTA



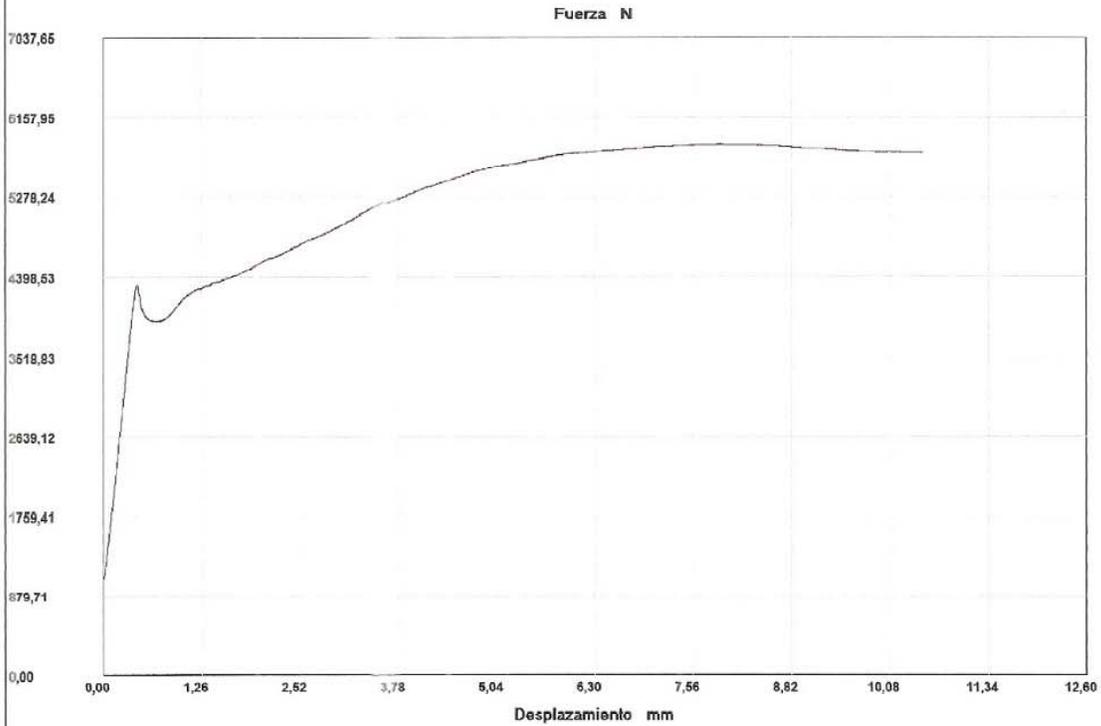
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 3	5888,38	49,07	5415,03	45,13
Media	5888,380	49,070	5415,030	45,125
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	5888,380	49,070	5415,030	45,125

INFORME :
ENSAYO :

EFM 01-LUIS MARTINEZ
FLEXION 3P



Referencia : ASTM A36 30X4
Cliente :
Calidad :
Operario : ING. F. GALARZA
Norma : ASTM E290-14
Fecha : 11/08/2016
Hora : 11:06:08
Temperatura : 13
H.R.% : 82
Pedido : UTA



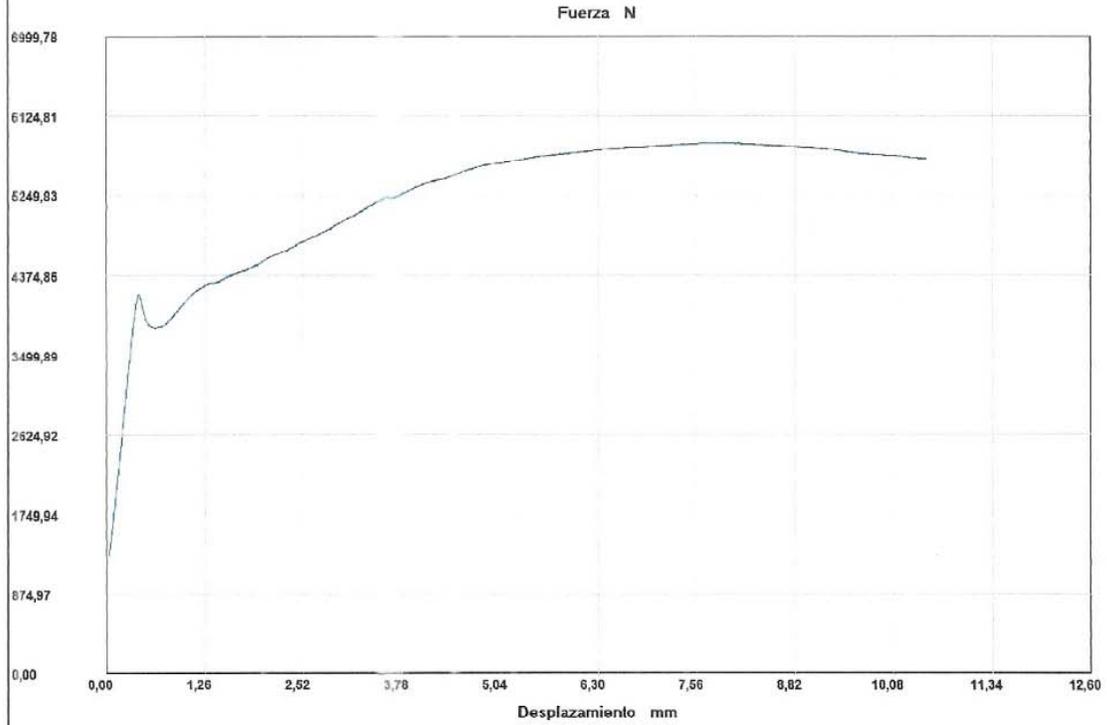
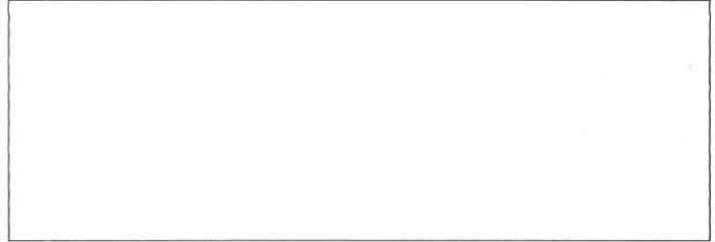
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 4	5864,71	48,87	5392,94	44,94
Media	5864,710	48,873	5392,940	44,941
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	5864,710	48,873	5392,940	44,941

INFORME :
ENSAYO :

EFM 01-LUIS MARTINEZ
FLEXION 3P



Referencia : ASTM A36 30X4
Cliente :
Calidad :
Operario : ING. F. GALARZA
Norma : ASTM E290-14
Fecha : 11/08/2016
Hora : 11:06:08
Temperatura : 13
H.R.% : 82
Pedido : UTA



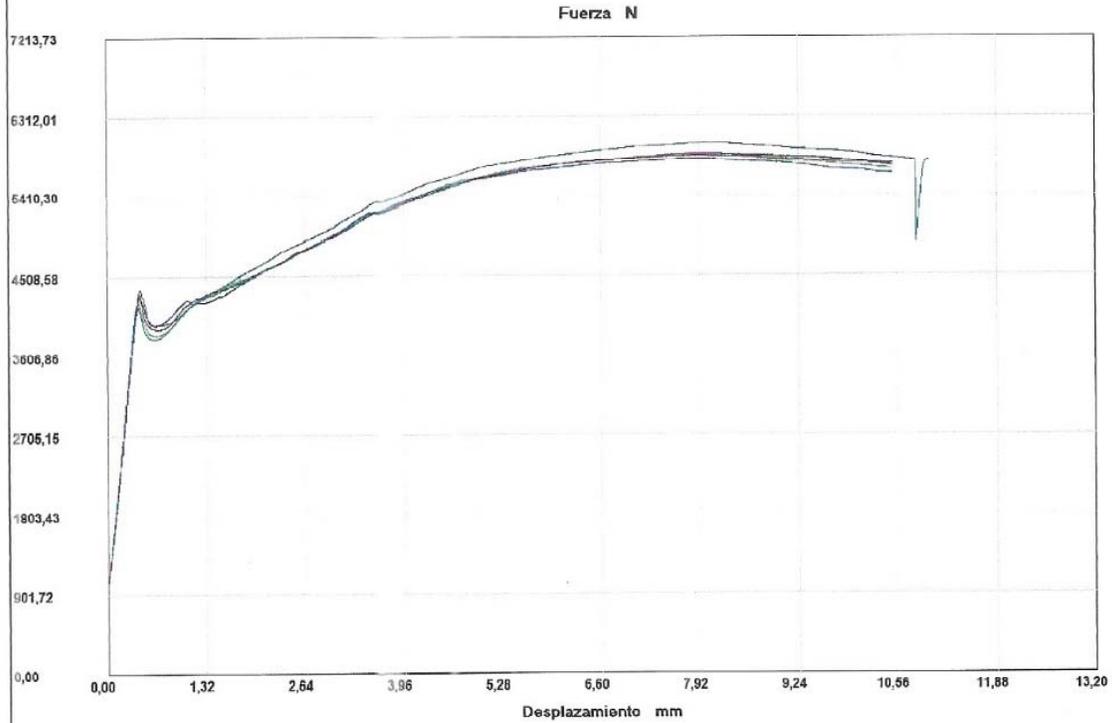
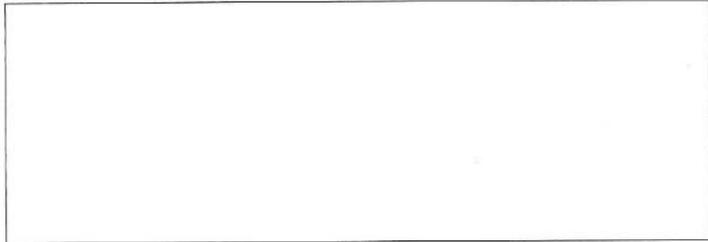
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 5	5833,15	48,61	5415,03	45,13
Media	5833,150	48,610	5415,030	45,125
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	5833,150	48,610	5415,030	45,125

INFORME :
ENSAYO :

EFM 01-LUIS MARTINEZ
FLEXION 3P



Referencia : ASTM A36 30X4
Cliente :
Calidad :
Operario : ING. F. GALARZA
Norma : ASTM E290-14
Fecha : 11/08/2016
Hora : 11:06:08
Temperatura : 13
H.R.% : 82
Pedido : UTA



Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
1	6011,44	50,10	5572,81	46,44
2	5867,86	48,90	5416,61	45,13
3	5888,38	49,07	5415,03	45,13
4	5864,71	48,87	5392,94	44,94
5	5833,15	48,61	5415,03	45,13
Media	5893,108	49,109	5442,484	45,351
Desv. Std	69,036	0,575	73,513	0,614
Coef. V.	0,012	0,012	0,014	0,014
+3 Sigma	6100,215	50,835	5663,022	47,193

ANEXO 8: Resultados de los ensayos de tracción de acero ASTM A500 grado A.



Centro de Fomento Productivo
Metalmeccánico Carrocero



RECEPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

DATOS DEL CLIENTE	
Empresa / Cliente: Luis Antonio Martínez Calderón	
DIRECCIÓN: Ingahurco- Ambato	
NÚM. DE CEDULA / RUC: 1804626909	TELÉFONO: 0986790983
E-MAIL: lmartin_1097@hotmail.com	

DATOS INFORMATIVOS	
Laboratorio: Resistencia de Materiales	
Designación del material: Material metálico ASTM A500.	
Método de ensayo: INEN 109.	

ENSAYO SOLICITADO				
No.	No. DE MUESTRA	DESCRIPCIÓN	FECHAS	
			RECEPCIÓN	ENSAYO
1	UTA-ETM 01-LUIS MARTINEZ-1	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	16/08/2016
2	UTA-ETM 01-LUIS MARTINEZ-2	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	16/08/2016
3	UTA-ETM 01-LUIS MARTINEZ-3	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	16/08/2016
4	UTA-ETM 01-LUIS MARTINEZ-4	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	16/08/2016
5	UTA-ETM 01-LUIS MARTINEZ-5	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	16/08/2016



DATOS INFORMATIVOS: De acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo las probetas cumplen con el número mínimo de muestras y dimensiones.

	
Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Fernando Galarza Chacón	Ing. Esteban López Espinel
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC
	
Cliente	

NOTA: LA INFORMACIÓN CONSIGNADA EN ESTE FORMULARIO ES DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL CLIENTE. POSTERIORMENTE A LA EJECUCIÓN DEL(LOS) ENSAYO(S) NO SE ADMITIRÁ ARREGLOS DE ESTA INFORMACIÓN, NI DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. FAVOR REVISAR ANTES DE SU FIRMA.

LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE TRACCIÓN DE MATERIALES METALICOS

Designación del material: Tubo estructural cuadrado.
Método de ensayo: NTE INEN 109:2009.
Empresa / Cliente: Luis Antonio Martínez Calderón
Fecha de Inicio de Ensayo: 09 de Agosto de 2016.
Fecha de Finalización de Ensayo: 15 de Agosto de 2016.

Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de materiales metálicos. Las muestras fueron entregadas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del CFPMC del H.G.P. Tungurahua.

Número de Probetas cuantificadas

Nº	Identificación de muestra	Producto	Material	Dimensiones (mm)	Cantidad
1	UTA-ETM 01-LUIS MARTINEZ ASTM - A-500	Tubo estructural	ASTM A-500	30x2	5
				Total	5

	
Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Fernando Galarza Chacón	Ing. Esteban López Espinel
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

Ambato, 19 de Agosto de 2016.

Nº. Factura. 001-002-000001304



Resultados

Muestra	Identificación de muestra	Designación del material	Método	Temperatura y humedad	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo de rotura (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
1	UTA-ETM 01- LUIS MARTINEZ-1	ASTM A- 500	NTE INEN 109:2009	16°C, 81%	15273,17	381,83	346,13	333,04	23,790	29,74
2	UTA-ETM 01- LUIS MARTINEZ-2	ASTM A- 500	NTE INEN 109:2009	16°C, 81%	15096,46	377,41	344,04	320,37	29,929	37,41
3	UTA-ETM 01- LUIS MARTINEZ-3	ASTM A- 500	NTE INEN 109:2009	16°C, 81%	15356,79	383,92	347,16	348,34	22,852	28,57
4	UTA-ETM 01- LUIS MARTINEZ-4	ASTM A- 500	NTE INEN 109:2009	16°C, 81%	15219,52	380,49	346,96	336,59	19,193	23,99
5	UTA-ETM 01- LUIS MARTINEZ-5	ASTM A- 500	NTE INEN 109:2009	16°C, 81%	15195,86	379,90	347,95	350,15	21,039	26,30

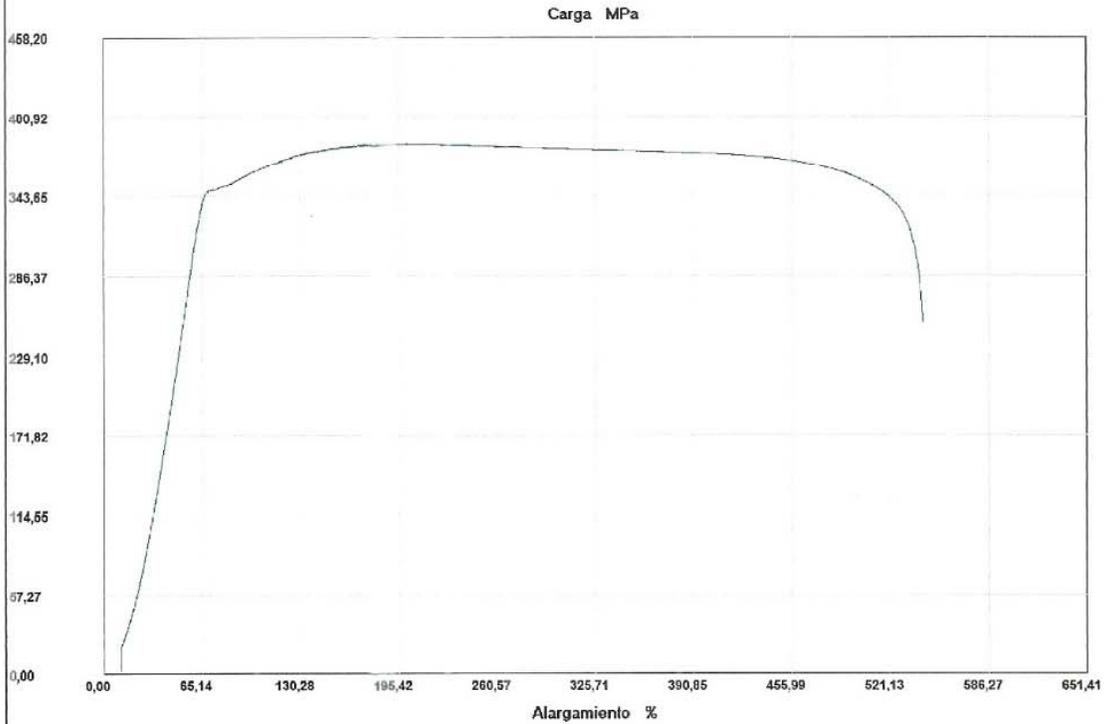
Nota: La longitud calibrada para el cálculo del % de Deformación de acuerdo a la norma NTE INEN 109:2009 es de 80 mm.

INFORME :
 ENSAYO :

ETM-01 LUIS MARTINEZ
 TRACCION



Referencia : ASTM A500 30 X 2
 Cliente :
 Calidad :
 Operario : ING. F. GALARZA
 Norma : INEN 109
 Fecha : 16/08/2016
 Hora : 9:57:23
 Temperatura : 21
 H.R.% : 54
 Pedido : UTA



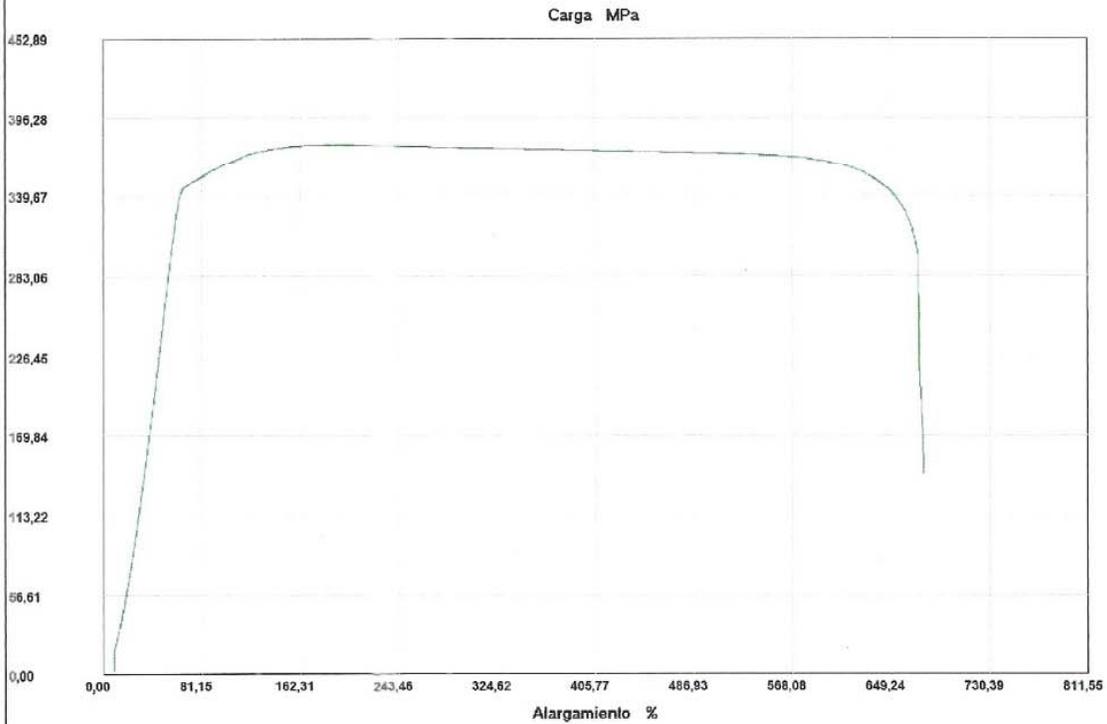
Probeta	FMax N	CMax MPa	C.Yield MPa	CRot MPa	MYoung MPa	FYield N
■ 1	15273,17	381,83	346,13	333,04	128,45	13845,25
Media	15273,170	381,829	346,131	333,036	128,448	13845,250
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	15273,170	381,829	346,131	333,036	128,448	13845,250

INFORME :
 ENSAYO :

ETM-01 LUIS MARTINEZ
 TRACCION



Referencia : ASTM A500 30 X 2
 Cliente :
 Calidad :
 Operario : ING. F. GALARZA
 Norma : INEN 109
 Fecha : 16/08/2016
 Hora : 9:57:23
 Temperatura : 21
 H.R.% : 54
 Pedido : UTA



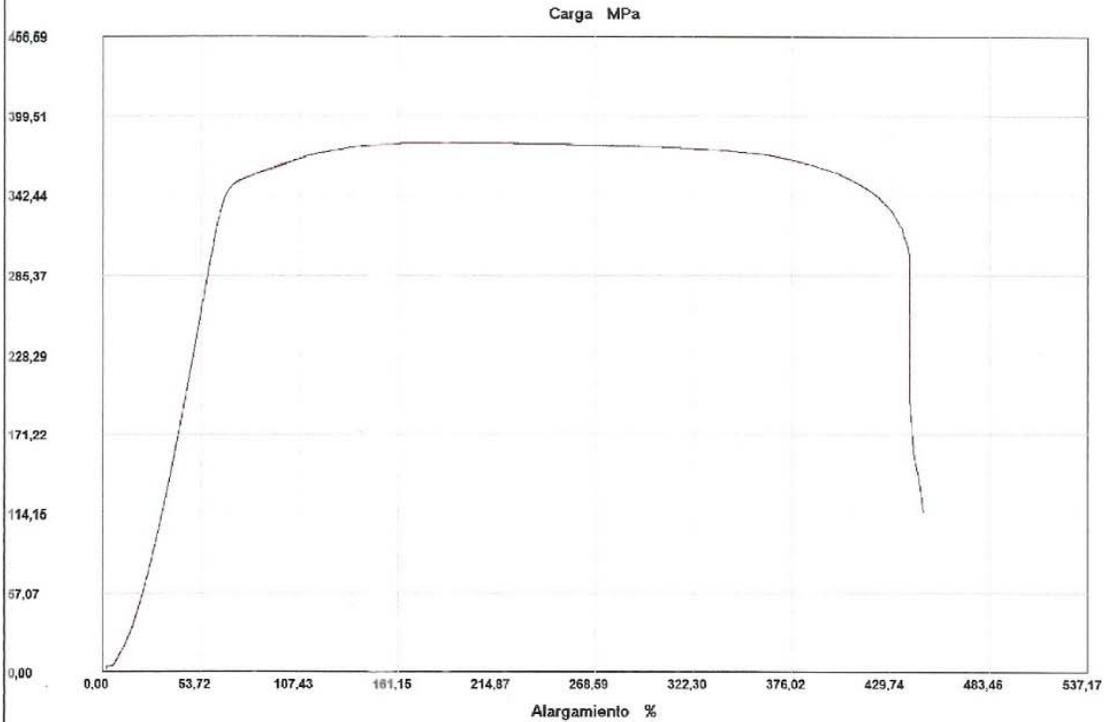
Probeta	FMax N	CMax MPa	C.Yield MPa	CRot MPa	MYoung MPa	FYield N
■ 2	15096,46	377,41	344,04	320,37	25,81	13761,63
Media	15096,460	377,411	344,041	320,374	25,808	13761,630
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	15096,460	377,411	344,041	320,374	25,808	13761,630

INFORME :
ENSAYO :

ETM-01 LUIS MARTINEZ
TRACCION



Referencia : ASTM A500 30 X 2
Cliente :
Calidad :
Operario : ING. F. GALARZA
Norma : INEN 109
Fecha : 16/08/2016
Hora : 9:57:23
Temperatura : 21
H.R.% : 54
Pedido : UTA



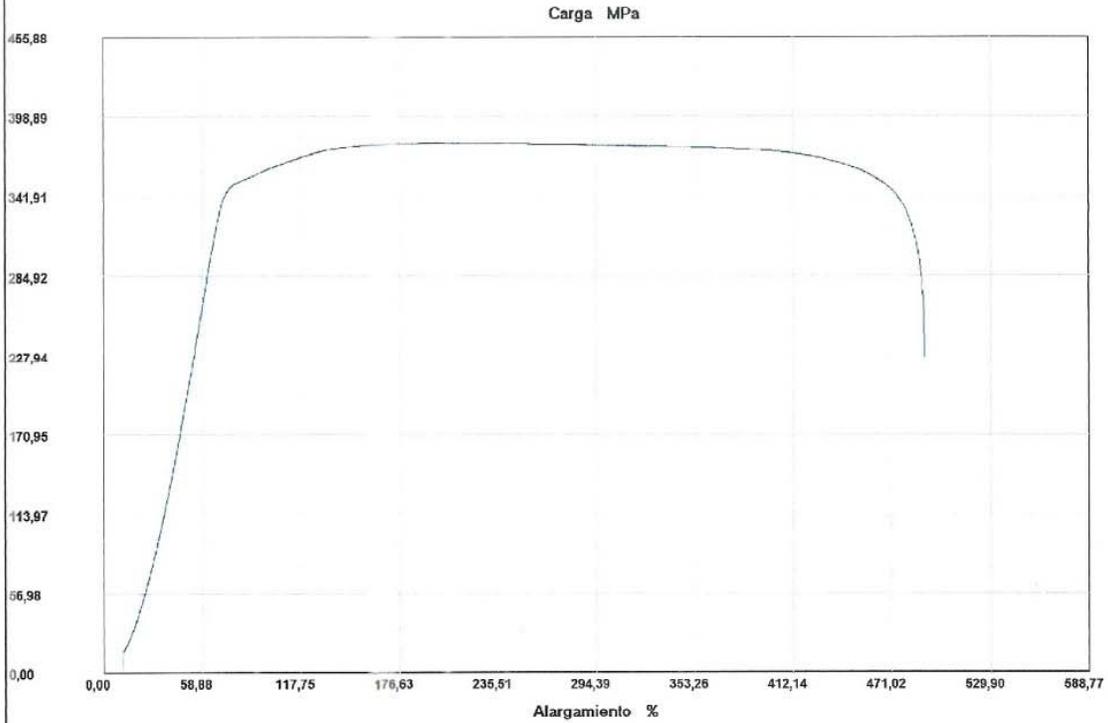
Probeta	FMax N	CMax MPa	C.Yield MPa	CRot MPa	MYoung MPa	FYield N
■ 4	15219,52	380,49	346,96	336,59	316,50	13878,39
Media	15219,520	380,488	346,960	336,586	316,496	13878,390
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	15219,520	380,488	346,960	336,586	316,496	13878,390

INFORME :
 ENSAYO :

ETM-01 LUIS MARTINEZ
 TRACCION



Referencia : ASTM A500 30 X 2
 Cliente :
 Calidad :
 Operario : ING. F. GALARZA
 Norma : INEN 109
 Fecha : 16/08/2016
 Hora : 9:57:23
 Temperatura : 21
 H.R.% : 54
 Pedido : UTA



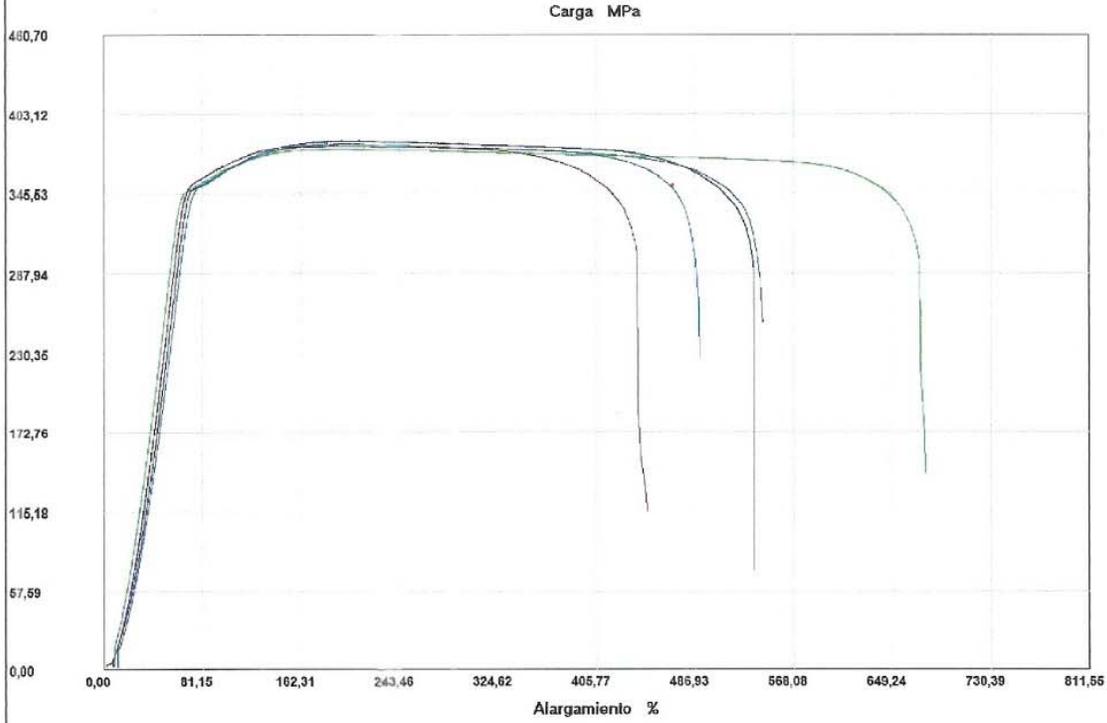
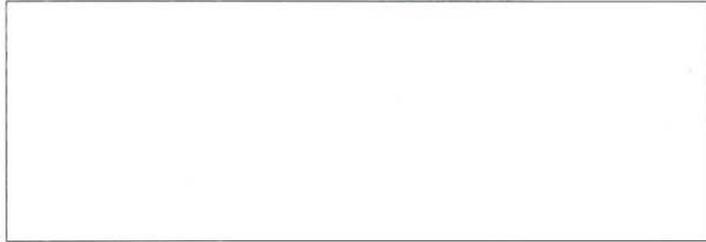
Probeta	FMax N	CMax MPa	C.Yield MPa	CRot MPa	MYoung MPa	FYield N
■ 5	15195,86	379,90	347,95	350,15	237,95	13917,84
Media	15195,860	379,897	347,946	350,155	237,950	13917,840
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	15195,860	379,897	347,946	350,155	237,950	13917,840

INFORME :
 ENSAYO :

ETM-01 LUIS MARTINEZ
 TRACCION



Referencia : ASTM A500 30 X 2
 Cliente :
 Calidad :
 Operario : ING. F. GALARZA
 Norma : INEN 109
 Fecha : 16/08/2016
 Hora : 9:57:23
 Temperatura : 21
 H.R.% : 54
 Pedido : UTA



Probeta	FMax N	CMax MPa	C.Yield MPa	CRot MPa	MYoung MPa	FYield N
1	15273,17	381,83	346,13	333,04	128,45	13845,25
2	15096,46	377,41	344,04	320,37	25,81	13761,63
3	15356,79	383,92	347,16	348,34	174,21	13886,28
4	15219,52	380,49	346,96	336,59	316,50	13878,39
5	15195,86	379,90	347,95	350,15	237,95	13917,84
Media	15228,360	380,709	346,447	337,698	176,583	13857,878
Desv. Std	96,221	2,406	1,492	12,161	109,997	59,678
Coef. V.	0,006	0,006	0,004	0,036	0,623	0,004
+3 Sigma	15517,024	387,926	350,923	374,180	506,574	14036,913

ANEXO 9: Resultados de los ensayos de flexión de acero ASTM A500 grado A.



Centro de Fomento Productivo
Metalmecánico Carrocero



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

RECEPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

DATOS DEL CLIENTE	
Empresa / Cliente: Luis Antonio Martínez Calderón	
DIRECCIÓN: Ingahurco- Ambato	
NÚM. DE CEDULA / RUC: 1804626909	TELÉFONO: 0986790983
E-MAIL: lmartin_1097@hotmail.com	

DATOS INFORMATIVOS	
Laboratorio: Resistencia de Materiales	
Designación del material: Material metálico ASTM A-500	

ENSAYO SOLICITADO				
No.	No. DE MUESTRA	DESCRIPCIÓN	FECHAS	
			RECEPCIÓN	ENSAYO
1	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-1	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016
2	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-2	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016
3	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-3	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016
4	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-4	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016
5	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-5	Cumple criterios dimensionales.	08/08/2016	10/08/2016



DATOS INFORMATIVOS: De acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo las probetas cumplen con el número mínimo de muestras y dimensiones.

	
Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Fernando Galarza Chacón Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Ing. Esteban López Espinel Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC
	
Cliente	

NOTA: LA INFORMACIÓN CONSIGNADA EN ESTE FORMULARIO ES DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL CLIENTE. POSTERIORMENTE A LA EJECUCIÓN DEL(LOS) ENSAYO(S) NO SE ADMITIRÁ ARREGLOS DE ESTA INFORMACIÓN, NI DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. FAVOR REVISAR ANTES DE SU FIRMA.



LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

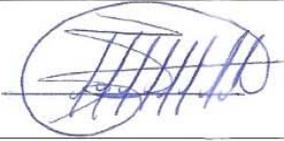
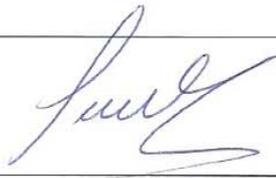
ENSAYO DE FLEXIÓN DE MATERIALES METALICOS

Designación del material: Tubo estructural cuadrado.
Método de ensayo: Método normalizado y no normalizado.
Empresa / Cliente: Luis Antonio Martínez Calderón
Fecha de Inicio de Ensayo: 09 de Agosto de 2016.
Fecha de Finalización de Ensayo: 15 de Agosto de 2016.

Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de materiales metálicos. Las muestras fueron entregadas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del CFPMC del H.G.P. Tungurahua.

Número de Probetas cuantificadas

Nº	Identificación de muestra	Producto	Material	Dimensiones (mm)	Cantidad
1	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ ASTM - A-500	Tubo estructural	ASTM A-500	25x2	5

	
Elaborado por:	Aprobado por:
Ing. Fernando Galarza Chacón	Ing. Esteban López Espinel
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

Ambato, 19 de Agosto de 2016.

Nº. Factura. 001-002-000001282



Resultados

Muestra	Identificación de muestra	Designación del material	Método	Temperatura y humedad	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Carga fluencia (N)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Deflexión (mm)
1	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-1	ASTM A-500	No normalizado	16°C, 81%	5300,00	30,46	5050,00	29,02	6,727
2	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-2	ASTM A-500	No normalizado	16°C, 81%	5600,00	32,18	5050,00	29,02	7,951
3	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-3	ASTM A-500	No normalizado	16°C, 81%	5100,00	29,31	4650,00	26,72	7,066
4	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-4	ASTM A-500	No normalizado	16°C, 81%	5550,00	31,90	5050,00	29,02	7,613
5	UTA-EFM 01-LUIS MARTINEZ-5	ASTM A-500	No normalizado	16°C, 81%	5450,00	31,32	5000,00	28,74	7,046

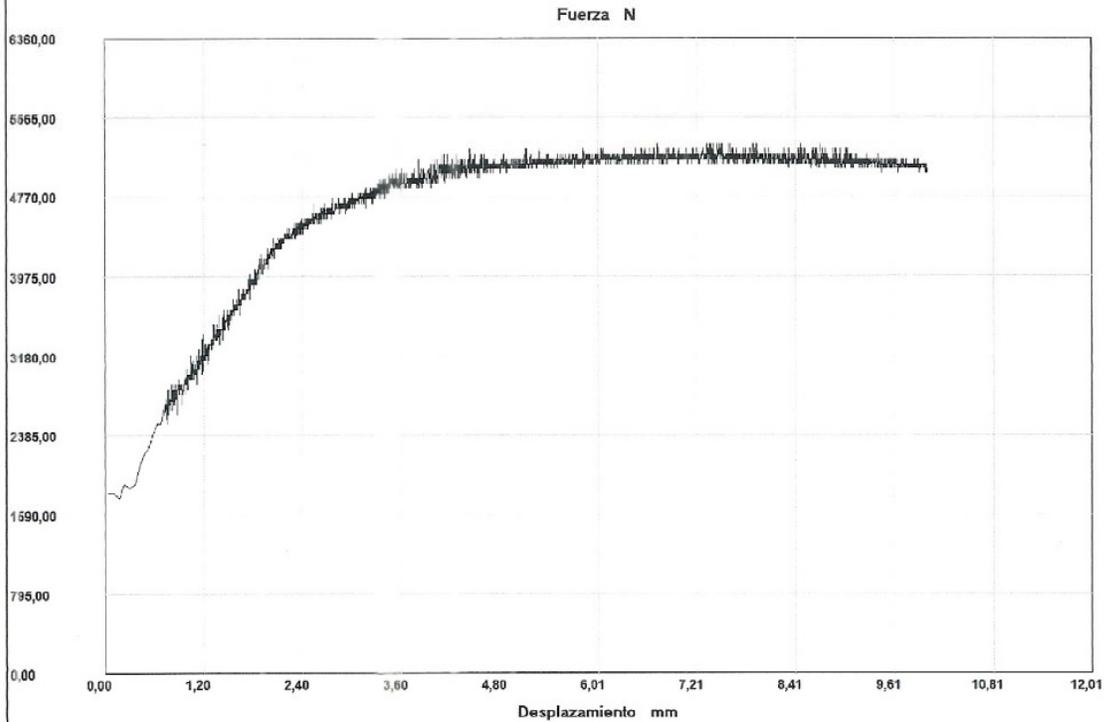
Nota: Para el Set up del ensayo de Tubo estructural ASTM A-500, se utilizó tres configuraciones de ubicación de la costura de la soldadura obteniendo como resultado lo siguiente: Costura lateral: C_{máx}: 28,16 MPa, Costura superior: C_{máx}: 30,46 MPa y Costura inferior: C_{máx}: 30,46 MPa, debido a esto los ensayos se los realizaron con la ultima configuración.

INFORME :
 ENSAYO :

EFM-01 LUIS MARTINEZ
 FLEXION 3P



Referencia : ASTM A500 25X2
 Cliente :
 Calidad :
 Operario : ING. F. GALARZA
 Norma : METODO NO NORMALIZA
 Fecha : 09/08/2016
 Hora : 13:09:35
 Temperatura : 16
 H.R.% : 81
 Pedido : UTA



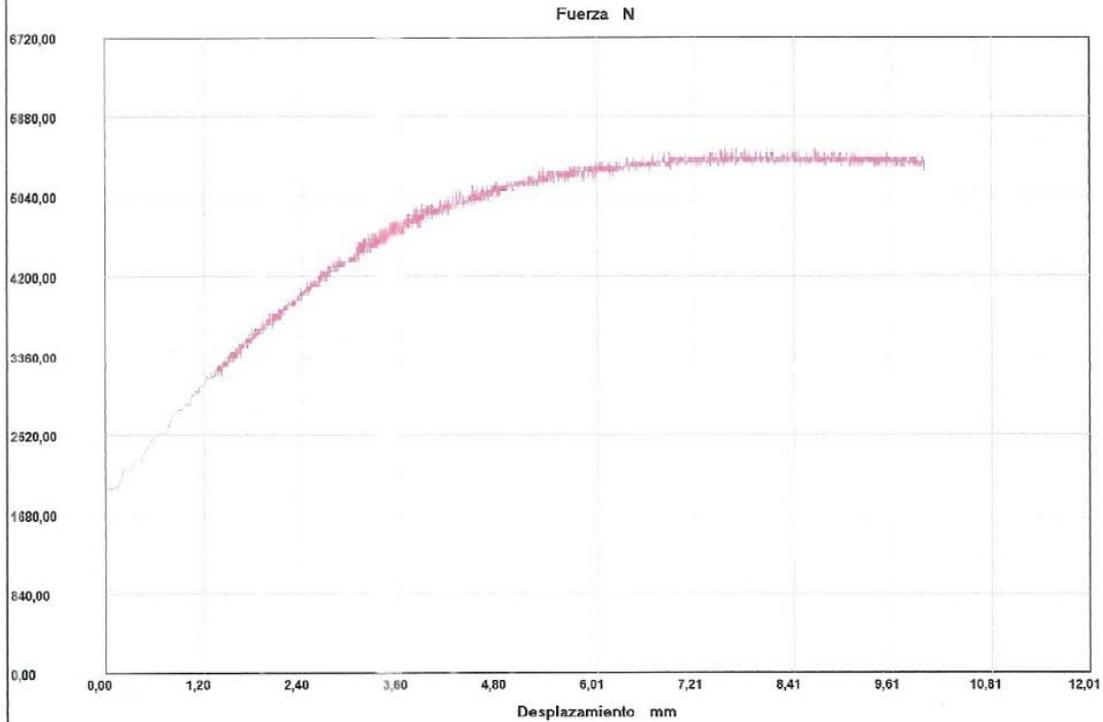
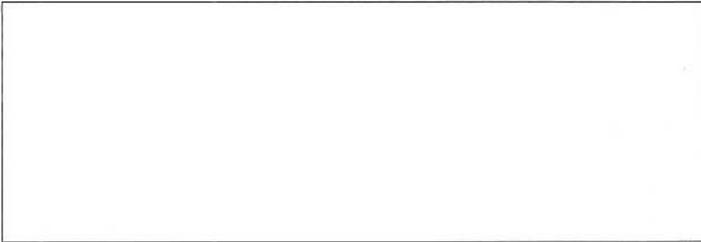
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 1	5300,00	30,46	5050,00	29,02
Media	5300,000	30,460	5050,000	29,023
Mediana	5300,000	30,460	5050,000	29,023
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	5300,000	30,460	5050,000	29,023
Mínimo	5300,000	30,460	5050,000	29,023
Rango	0,000	0,000	0,000	0,000
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	5300,000	30,460	5050,000	29,023
-3 Sigma	5300,000	30,460	5050,000	29,023

INFORME :
 ENSAYO :

EFM-01 LUIS MARTINEZ
 FLEXION 3P



Referencia : ASTM A500 25X2
 Cliente :
 Calidad :
 Operario : ING. F. GALARZA
 Norma : METODO NO NORMALIZA
 Fecha : 09/08/2016
 Hora : 13:09:35
 Temperatura : 16
 H.R.% : 81
 Pedido : UTA



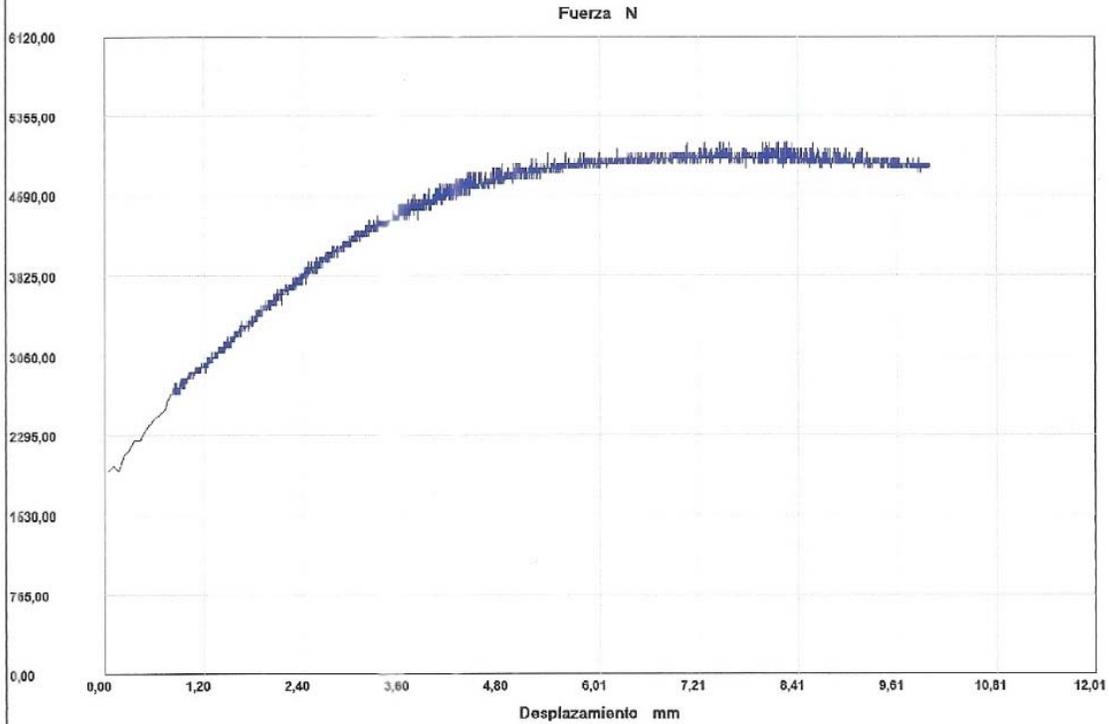
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 2	5600,00	32,18	5050,00	29,02
Media	5600,000	32,184	5050,000	29,023
Mediana	5600,000	32,184	5050,000	29,023
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	5600,000	32,184	5050,000	29,023
Mínimo	5600,000	32,184	5050,000	29,023
Rango	0,000	0,000	0,000	0,000
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	5600,000	32,184	5050,000	29,023
-3 Sigma	5600,000	32,184	5050,000	29,023

INFORME :
ENSAYO :

EFM-01 LUIS MARTINEZ
FLEXION 3P



Referencia : ASTM A500 25X2
Cliente :
Calidad :
Operario : ING. F. GALARZA
Norma : METODO NO NORMALIZA
Fecha : 09/08/2016
Hora : 13:09:35
Temperatura : 16
H.R.% : 81
Pedido : UTA



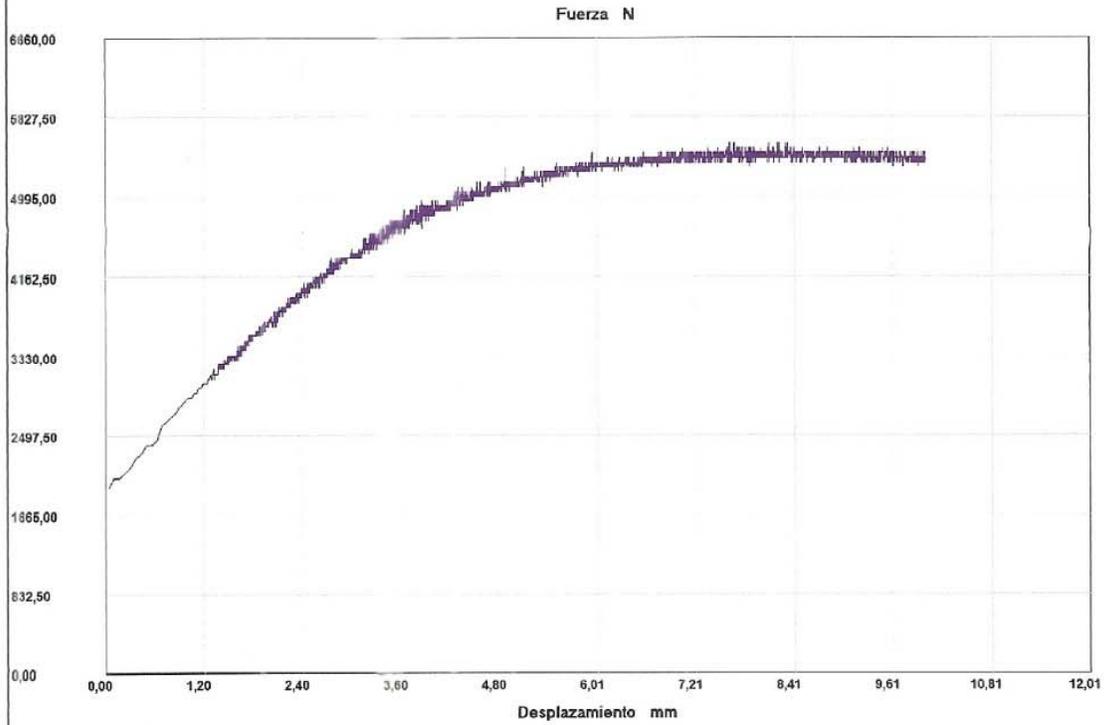
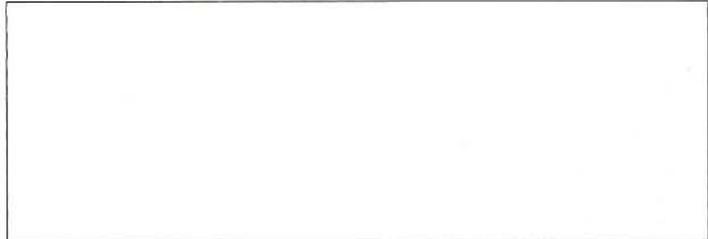
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 3	5100,00	29,31	4650,00	26,72
Media	5100,000	29,310	4650,000	26,724
Mediana	5100,000	29,310	4650,000	26,724
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	5100,000	29,310	4650,000	26,724
Mínimo	5100,000	29,310	4650,000	26,724
Rango	0,000	0,000	0,000	0,000
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	5100,000	29,310	4650,000	26,724
-3 Sigma	5100,000	29,310	4650,000	26,724

INFORME :
 ENSAYO :

EFM-01 LUIS MARTINEZ
 FLEXION 3P



Referencia : ASTM A500 25X2
 Cliente :
 Calidad :
 Operario : ING. F. GALARZA
 Norma : METODO NO NORMALIZA
 Fecha : 09/08/2016
 Hora : 13:09:35
 Temperatura : 16
 H.R.% : 81
 Pedido : UTA



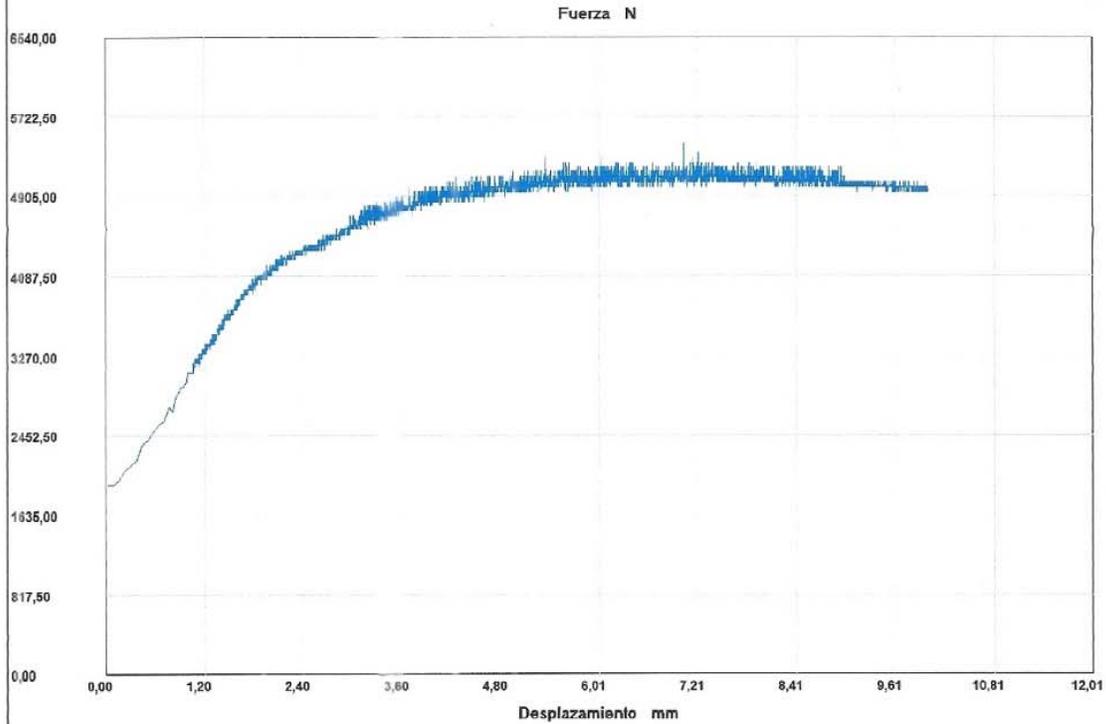
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 4	5550,00	31,90	5050,00	29,02
Media	5550,000	31,897	5050,000	29,023
Mediana	5550,000	31,897	5050,000	29,023
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	5550,000	31,897	5050,000	29,023
Mínimo	5550,000	31,897	5050,000	29,023
Rango	0,000	0,000	0,000	0,000
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	5550,000	31,897	5050,000	29,023
-3 Sigma	5550,000	31,897	5050,000	29,023

INFORME :
ENSAYO :

EFM-01 LUIS MARTINEZ
FLEXION 3P



Referencia : ASTM A500 25X2
 Cliente :
 Calidad :
 Operario : ING. F. GALARZA
 Norma : METODO NO NORMALIZA
 Fecha : 09/08/2016
 Hora : 13:09:35
 Temperatura : 16
 H.R.% : 81
 Pedido : UTA



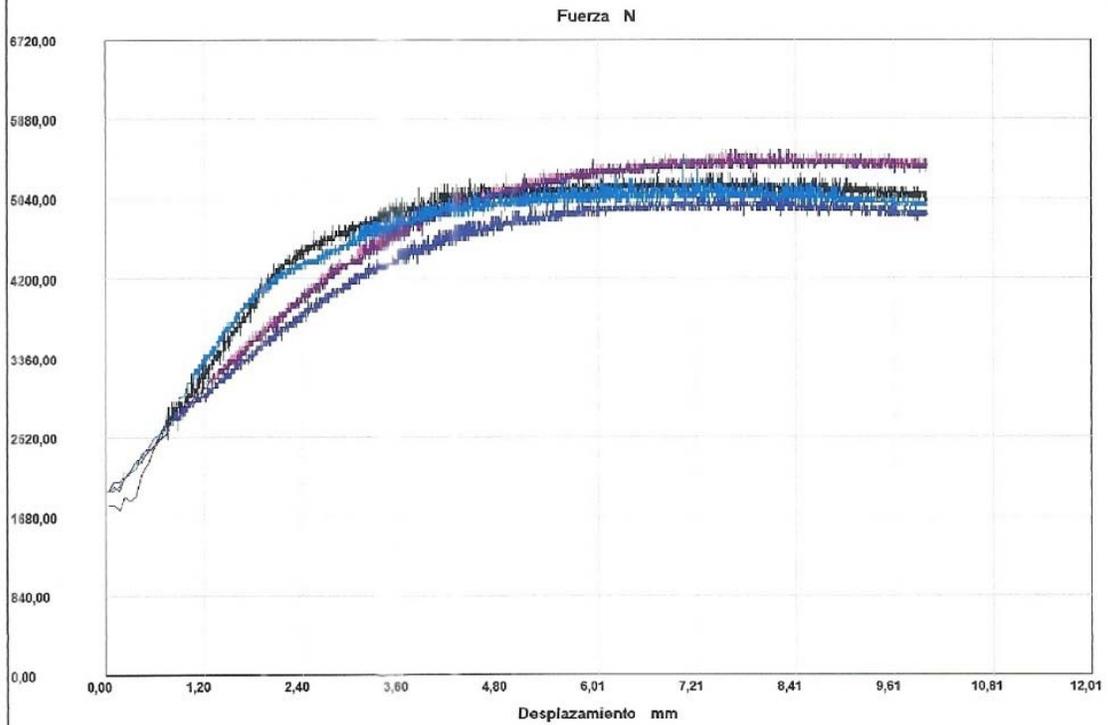
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
■ 5	5450,00	31,32	5000,00	28,74
Media	5450,000	31,322	5000,000	28,736
Mediana	5450,000	31,322	5000,000	28,736
Desv. Std	0,000	0,000	0,000	0,000
Coef. V.	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	5450,000	31,322	5000,000	28,736
Mínimo	5450,000	31,322	5000,000	28,736
Rango	0,000	0,000	0,000	0,000
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	5450,000	31,322	5000,000	28,736
-3 Sigma	5450,000	31,322	5000,000	28,736

INFORME :
 ENSAYO :

EFM-01 LUIS MARTINEZ
 FLEXION 3P



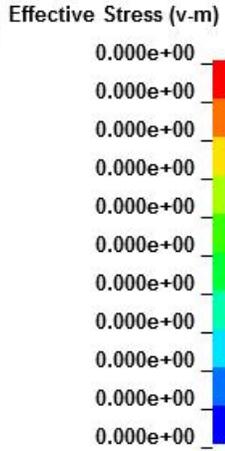
Referencia : ASTM A500 25X2
 Cliente :
 Calidad :
 Operario : ING. F. GALARZA
 Norma : METODO NO NORMALIZA
 Fecha : 09/08/2016
 Hora : 13:09:35
 Temperatura : 16
 H.R.% : 81
 Pedido : UTA



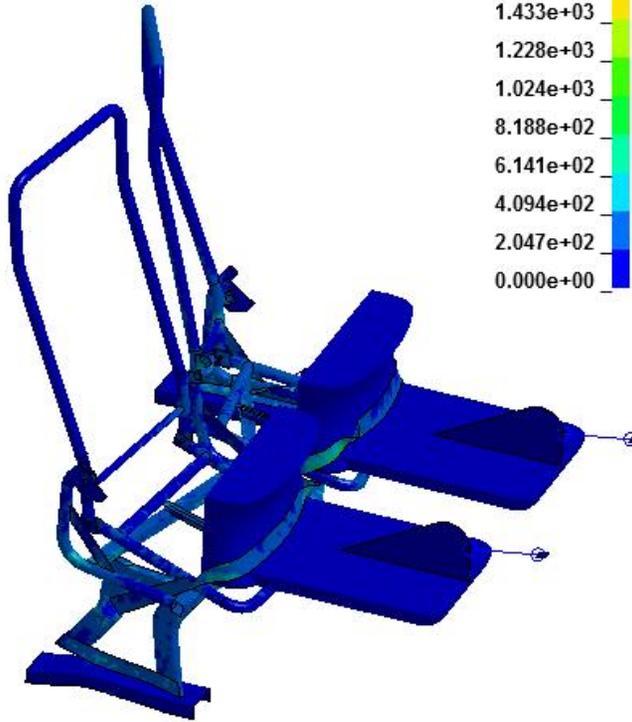
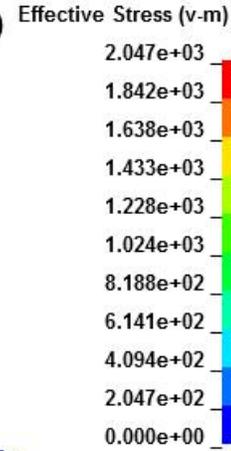
Probeta	FMax N	CMax MPa	FYield N	C.Yield MPa
1	5300,00	30,46	5050,00	29,02
2	5600,00	32,18	5050,00	29,02
3	5100,00	29,31	4650,00	26,72
4	5550,00	31,90	5050,00	29,02
5	5450,00	31,32	5000,00	28,74
Media	5400,000	31,034	4960,000	28,506
Mediana	5450,000	31,322	5050,000	29,023
Desv. Std	203,101	1,167	174,642	1,004
Coef. V.	0,038	0,038	0,035	0,035
Máximo	5600,000	32,184	5050,000	29,023
Mínimo	5100,000	29,310	4650,000	26,724
Rango	500,000	2,874	400,000	2,299
CPK	0,000	0,000	0,000	0,000
+3 Sigma	6009,303	34,536	5483,927	31,517
-3 Sigma	4790,697	27,533	4436,073	25,495

ANEXO 10: Resultados de la simulación de resistencia para la estructura original con cinturones de seguridad de dos puntos de anclaje.

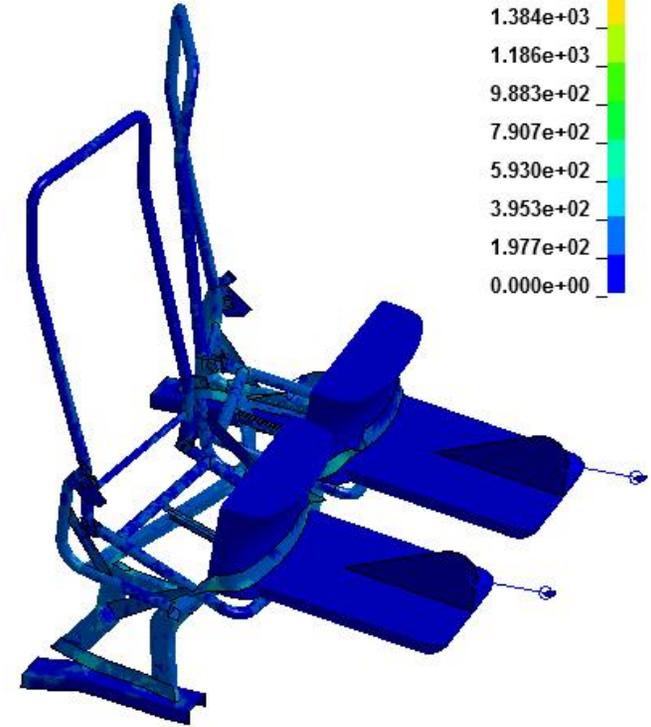
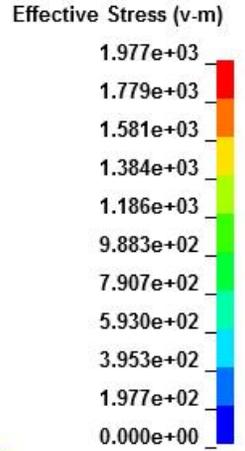
St=1,T= 0
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0, at elem# 1



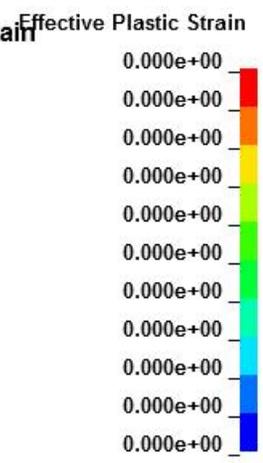
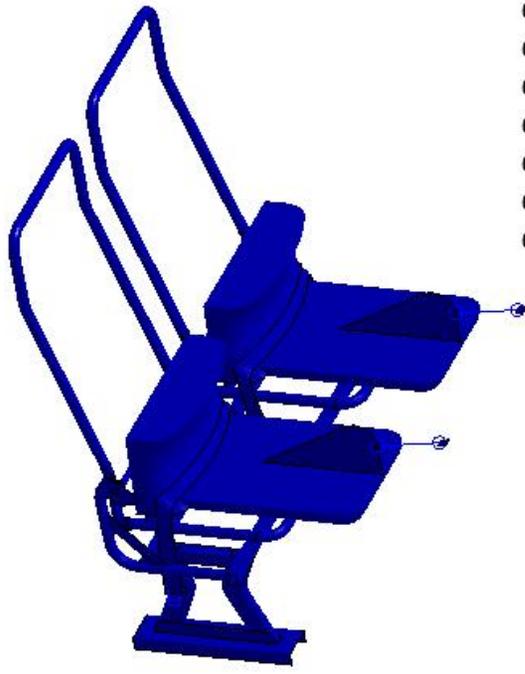
St=11,T= 0.1
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=2047.12, at elem# 54151



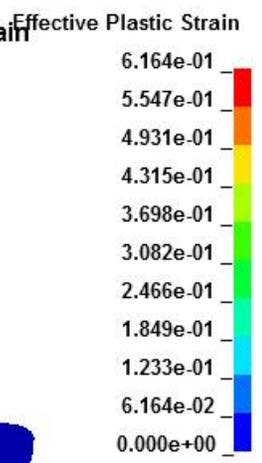
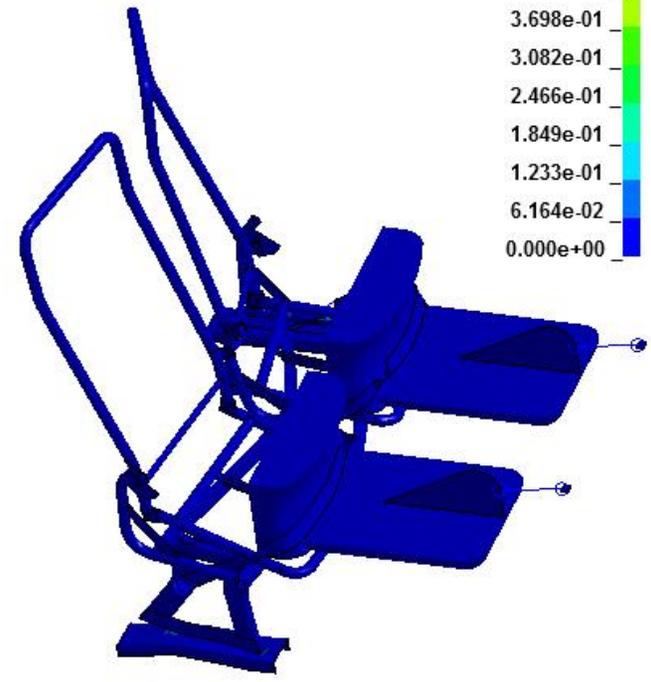
St=22,T= 0.2
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=1976.7, at elem# 53515



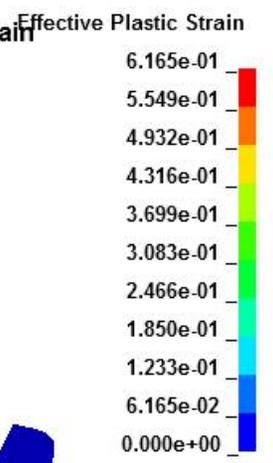
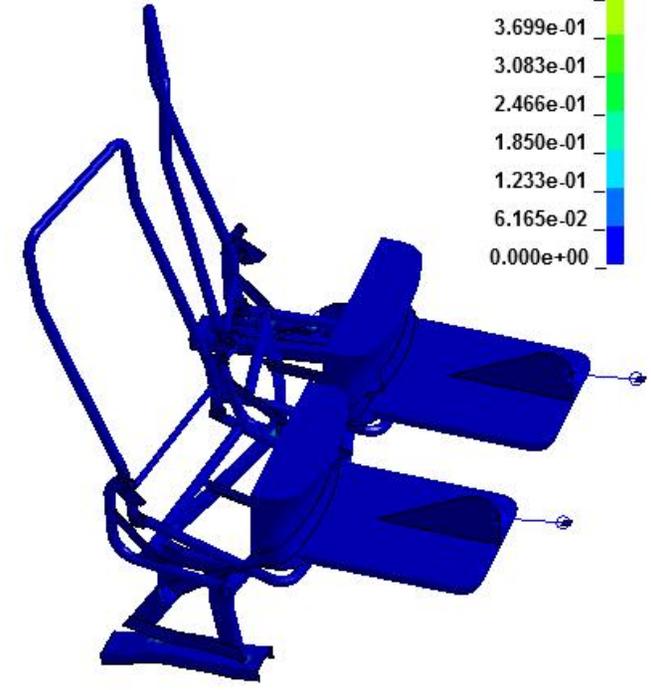
St=1,T= 0
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0, at elem# 1



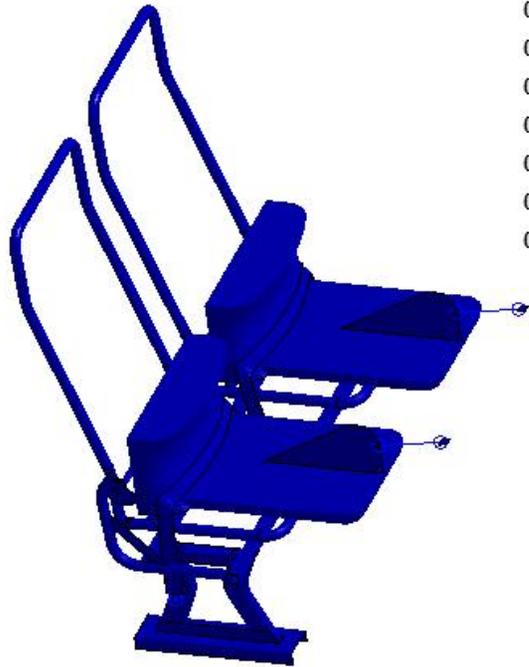
St=11,T= 0.1
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0.616383, at elem# 26378



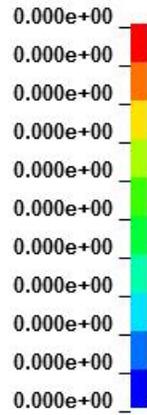
St=22,T= 0.2
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0.616541, at elem# 26378



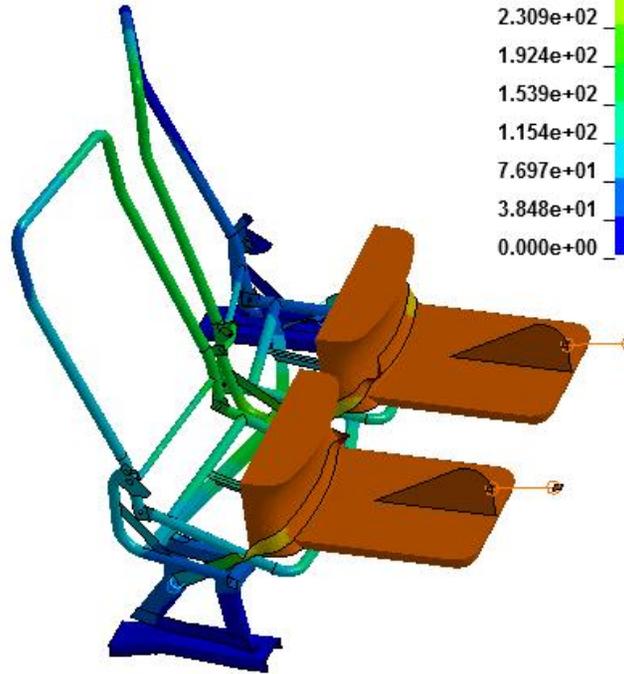
St=1, T= 0
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 1
max=0, at node# 1



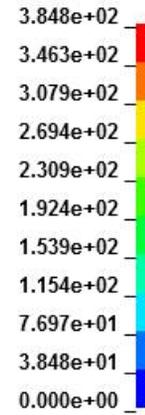
Resultant Displacement



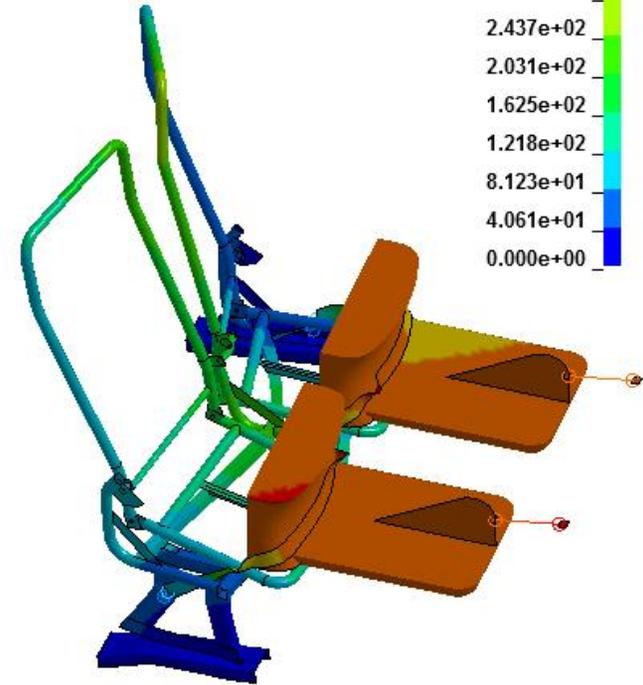
St=11, T= 0.1
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 5967
max=384.829, at node# 53992



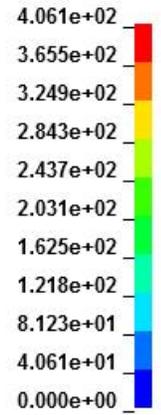
Resultant Displacement



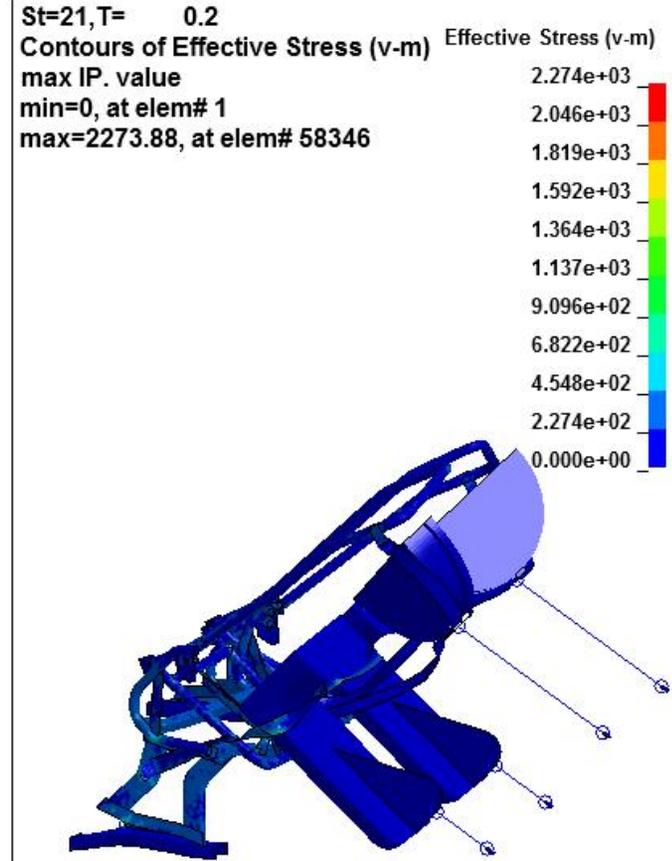
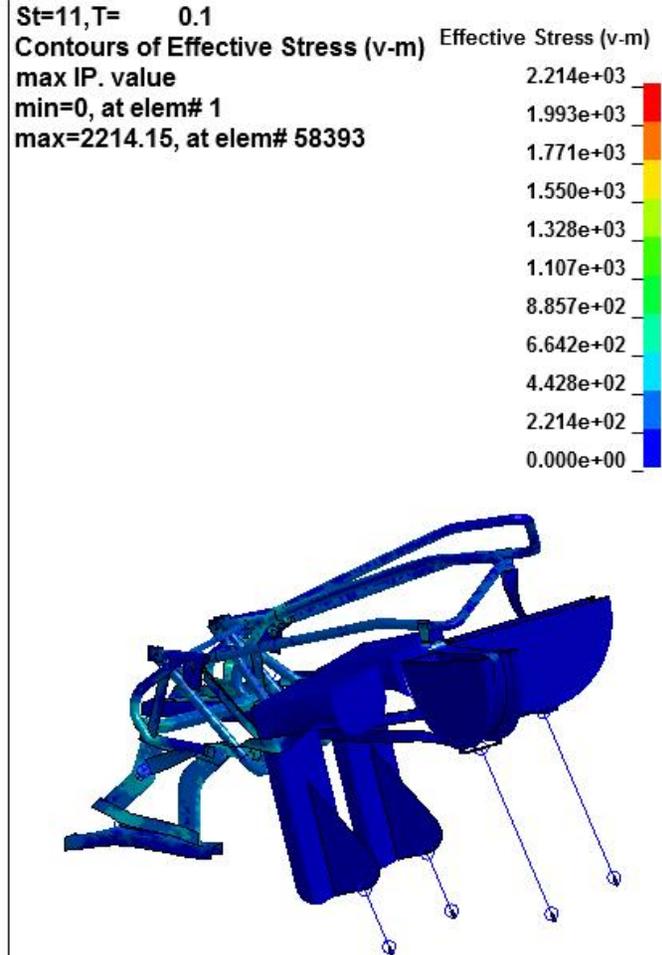
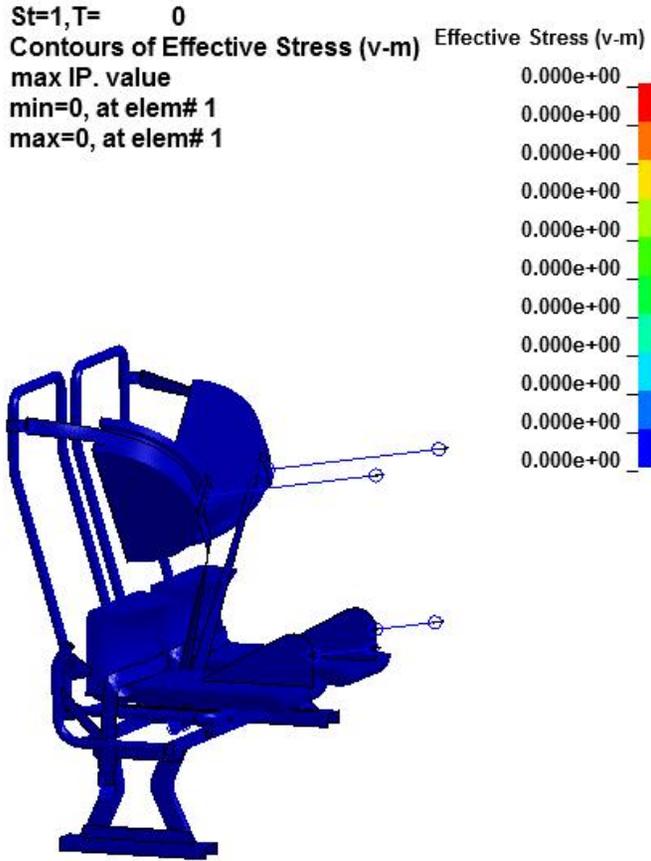
St=22, T= 0.2
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 5967
max=406.146, at node# 53830



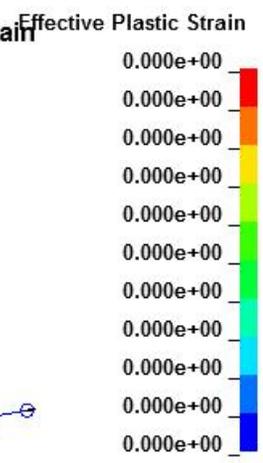
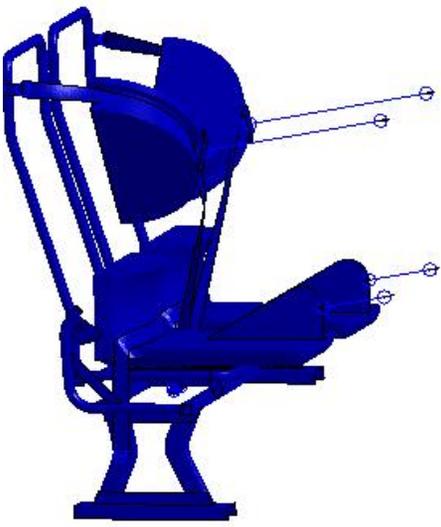
Resultant Displacement



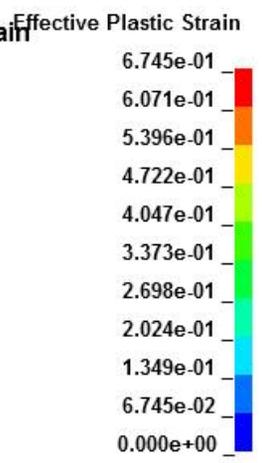
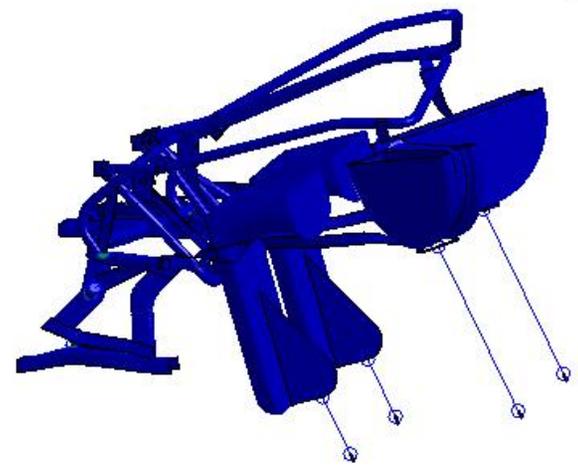
ANEXO 11: Resultados de la simulación de resistencia para la estructura original con cinturones de seguridad de tres puntos de anclaje.



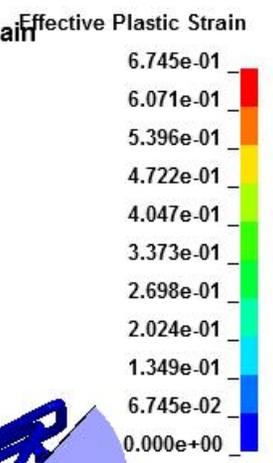
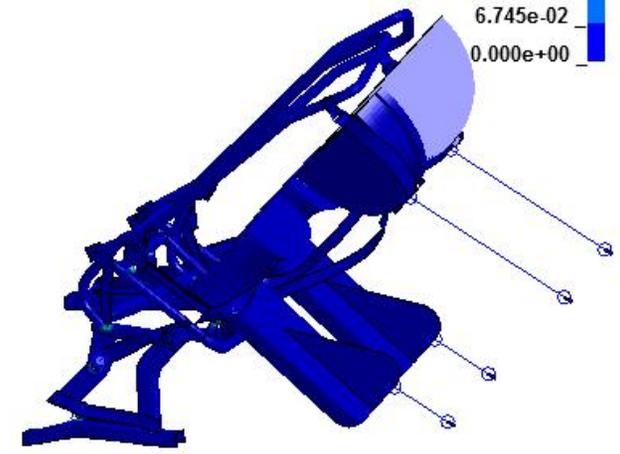
St=1,T= 0
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0, at elem# 1



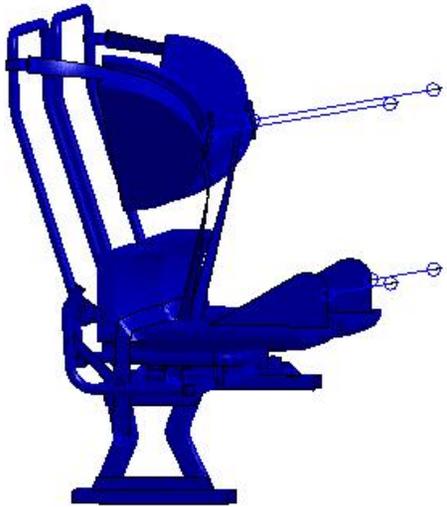
St=11,T= 0.1
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0.67453, at elem# 29917



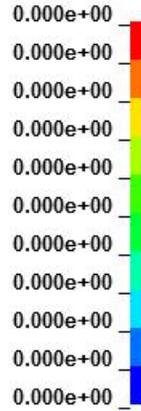
St=21,T= 0.2
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0.67453, at elem# 29917



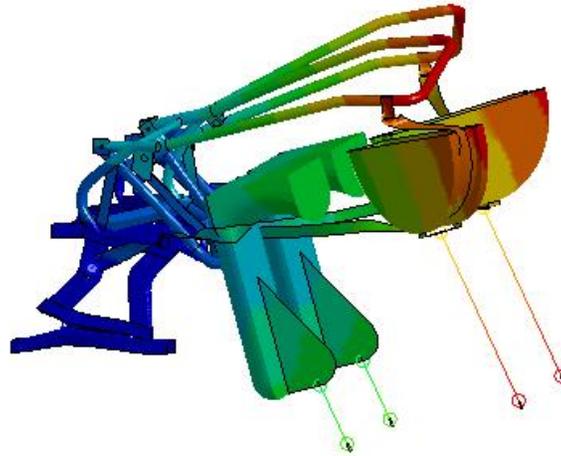
St=1, T= 0
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 1
max=0, at node# 1



Resultant Displacement



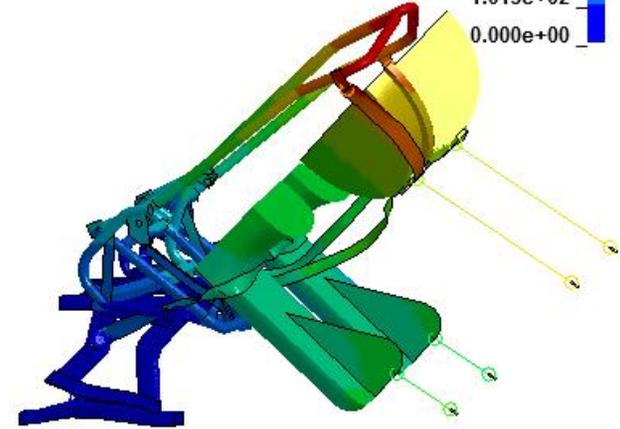
St=11, T= 0.1
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 16886
max=1230.17, at node# 36326



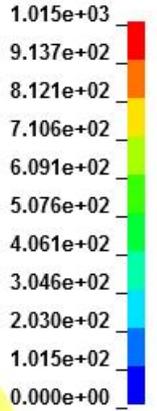
Resultant Displacement



St=21, T= 0.2
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 4714
max=1015.17, at node# 34807

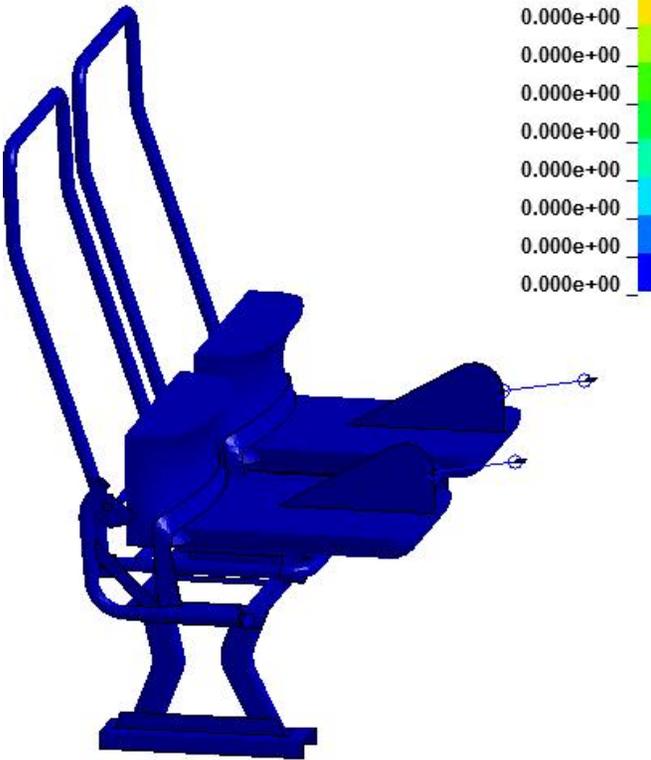


Resultant Displacement

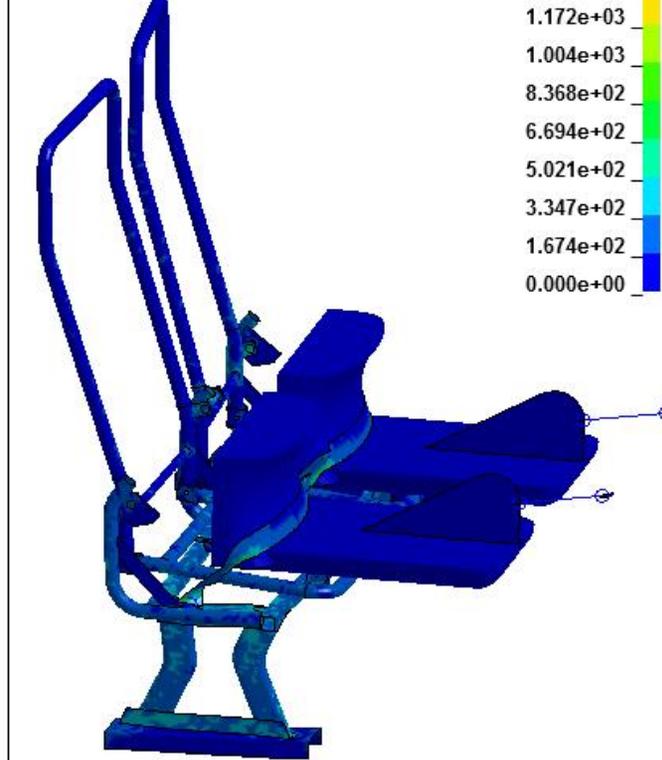


ANEXO 12: Resultados de la simulación de resistencia para la estructura modificada con cinturones de seguridad de dos puntos de anclaje.

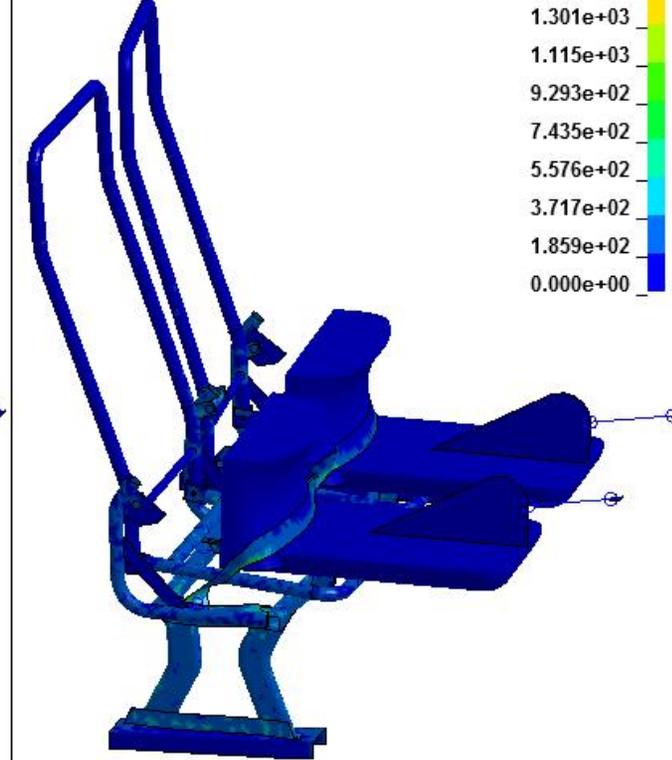
St=1,T= 0
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0, at elem# 1



St=11,T= 0.1
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=1673.61, at elem# 54376

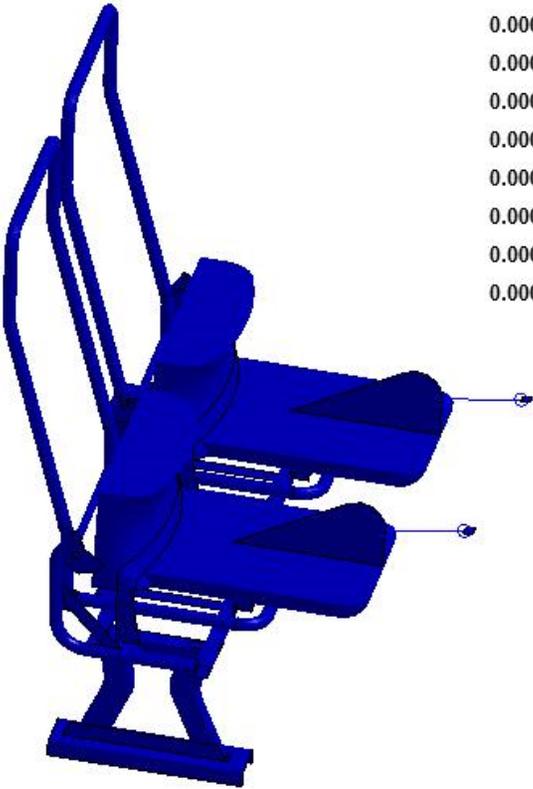
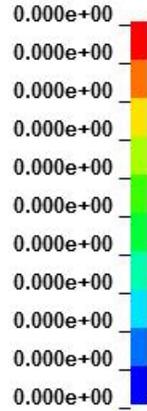


St=22,T= 0.2
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=1858.63, at elem# 54376



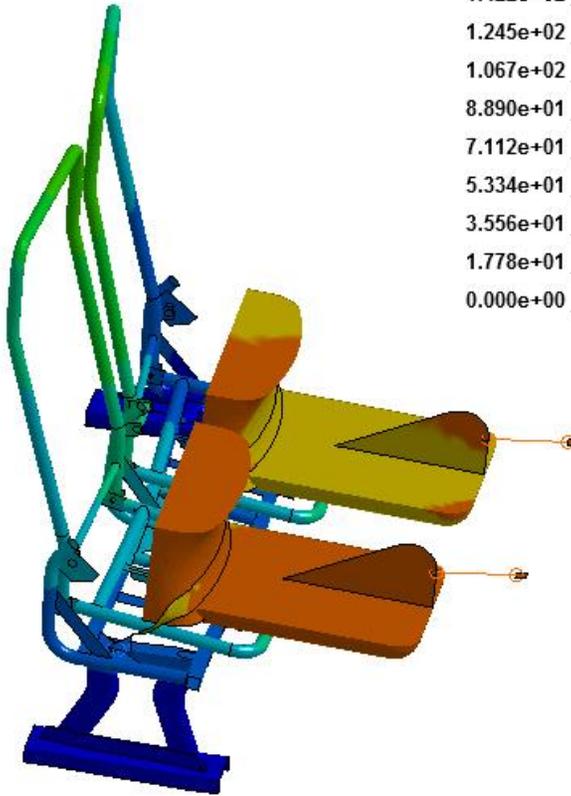
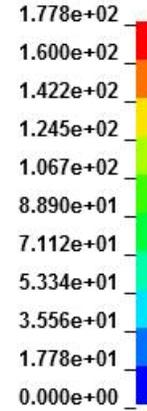
St=1, T= 0
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 1
max=0, at node# 1

Resultant Displacement



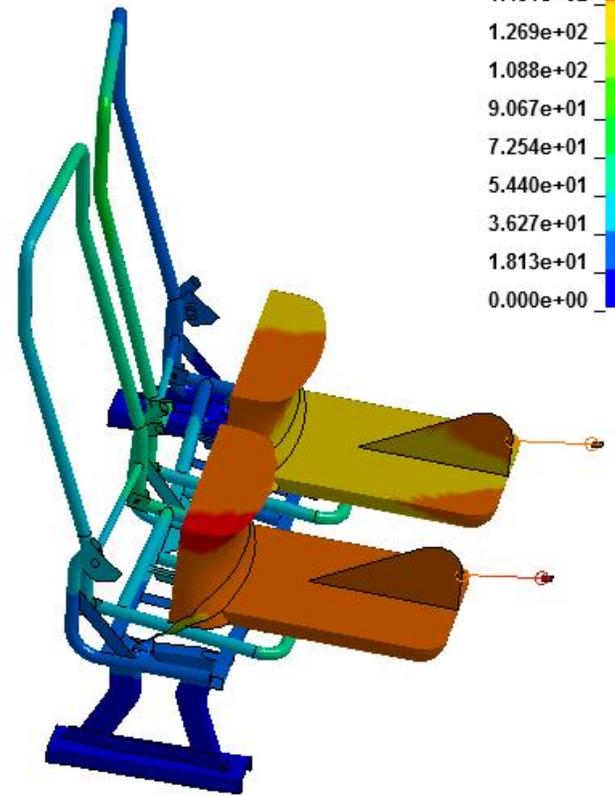
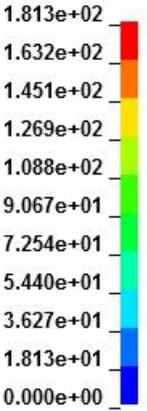
St=11, T= 0.1
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 42186
max=177.796, at node# 54374

Resultant Displacement



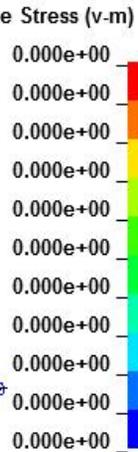
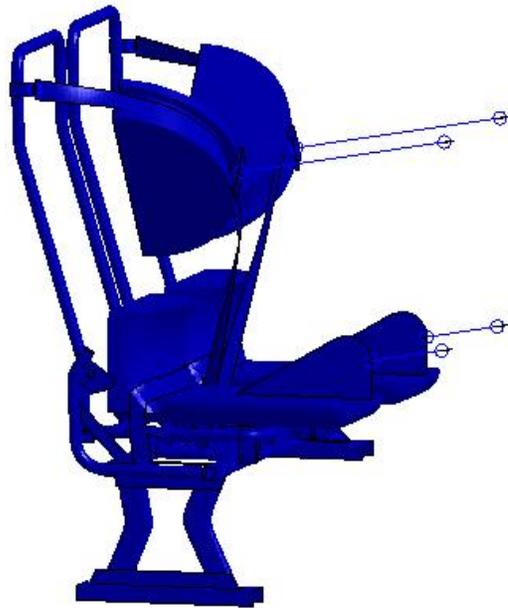
St=21, T= 0.2
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 5788
max=181.347, at node# 54374

Resultant Displacement

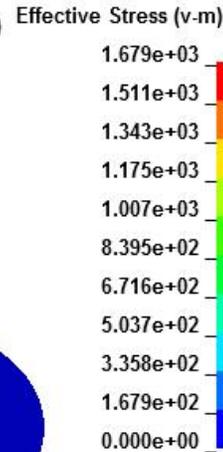
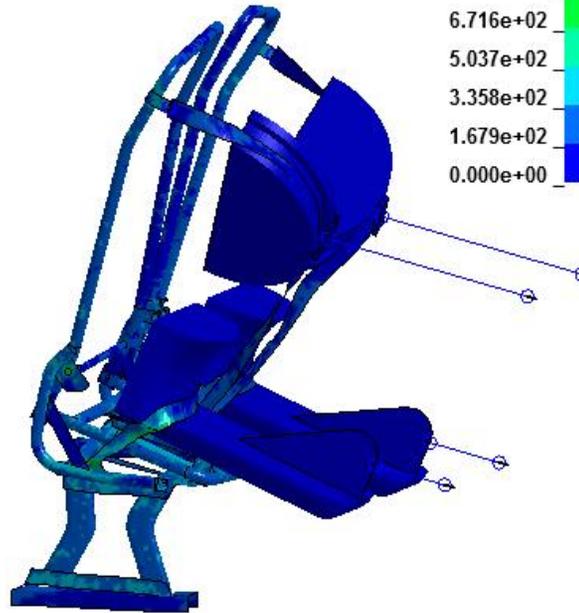


ANEXO 13: Resultados de la simulación de resistencia para la estructura modificada con cinturones de seguridad de tres puntos de anclaje.

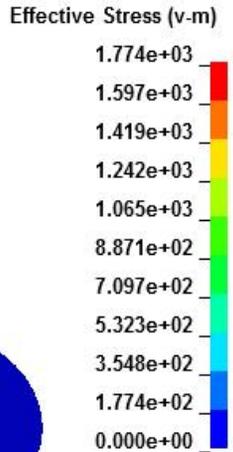
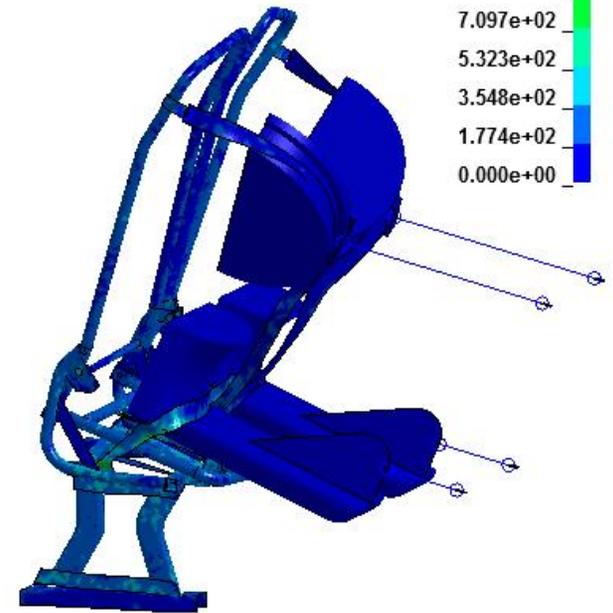
St=1,T= 0
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0, at elem# 1



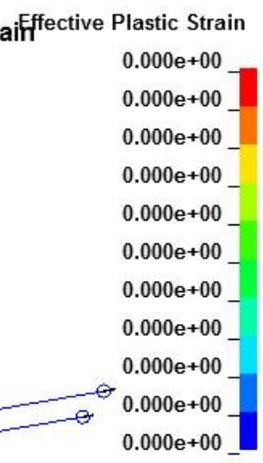
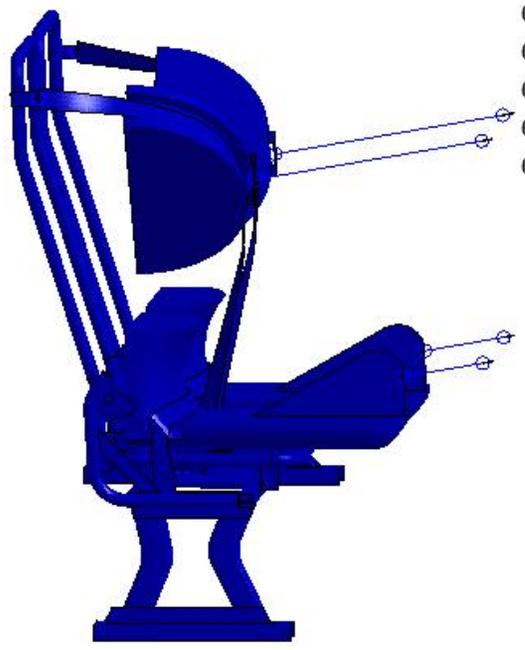
St=11,T= 0.1
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=1678.98, at elem# 60027



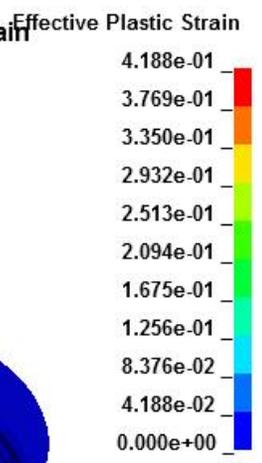
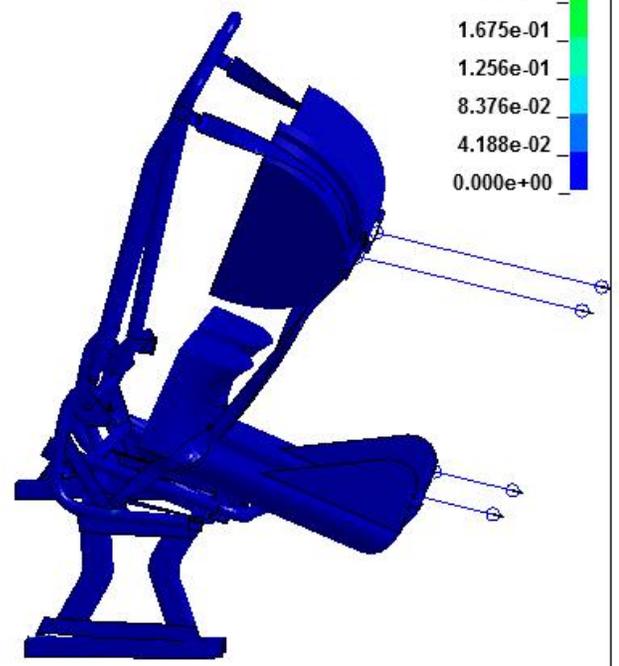
St=22,T= 0.2
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=1774.25, at elem# 60027



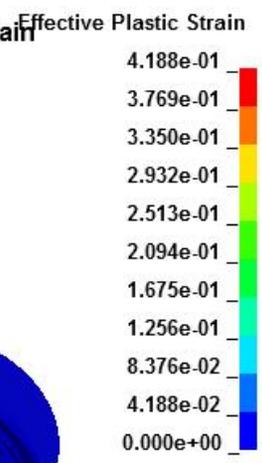
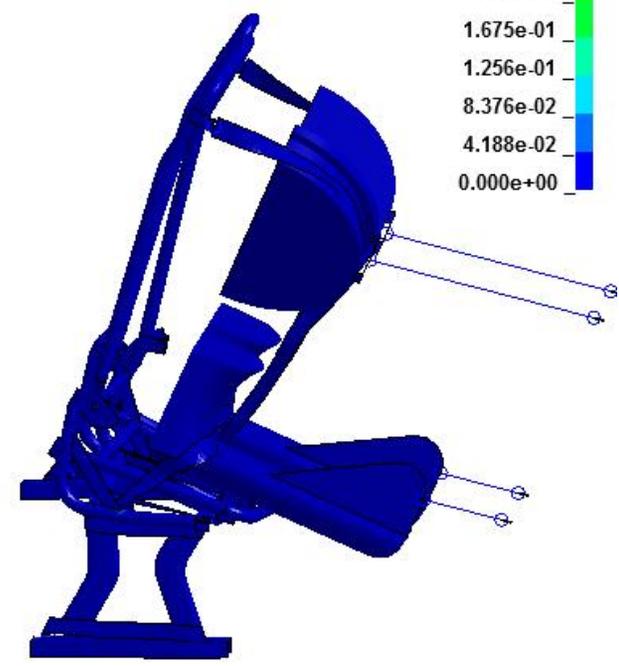
St=1,T= 0
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0, at elem# 1



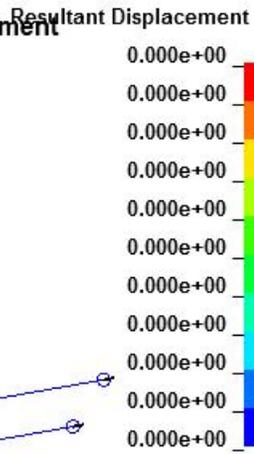
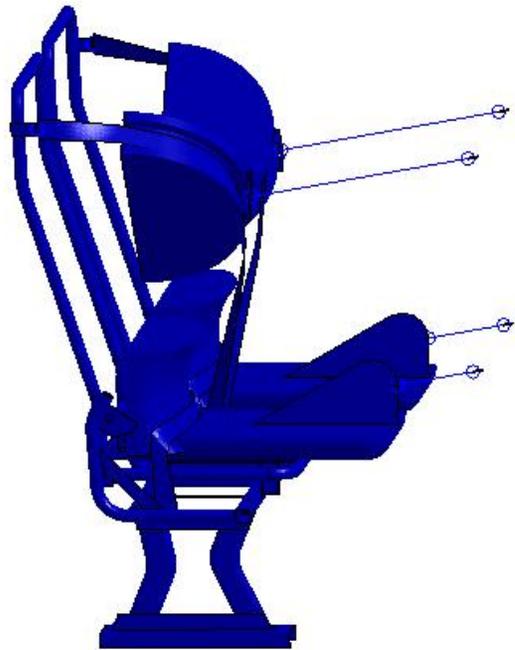
St=11,T= 0.1
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0.418804, at elem# 33386



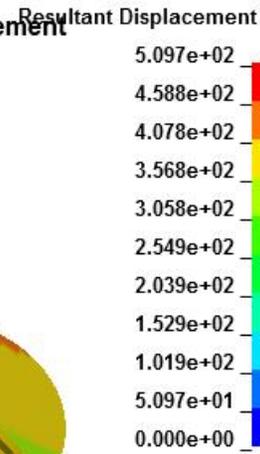
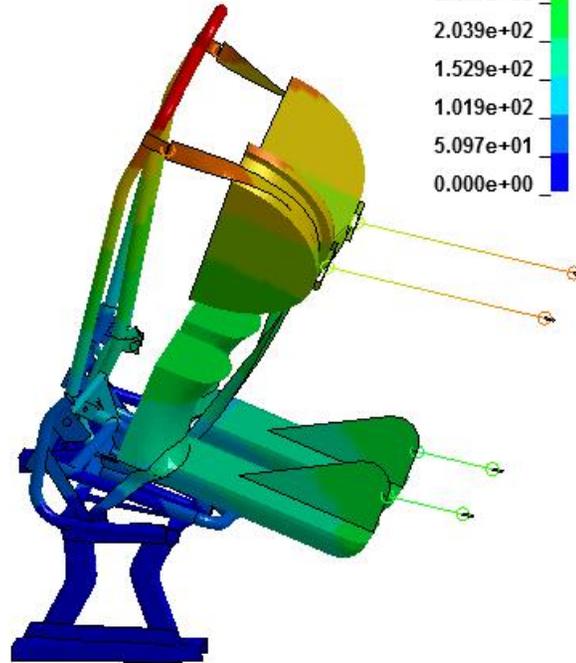
St=22,T= 0.2
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 1
max=0.418804, at elem# 33386



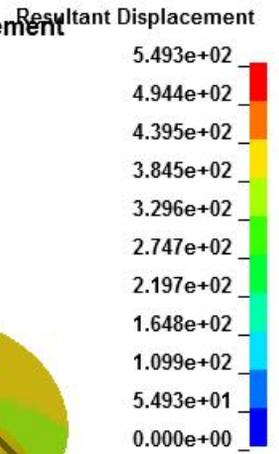
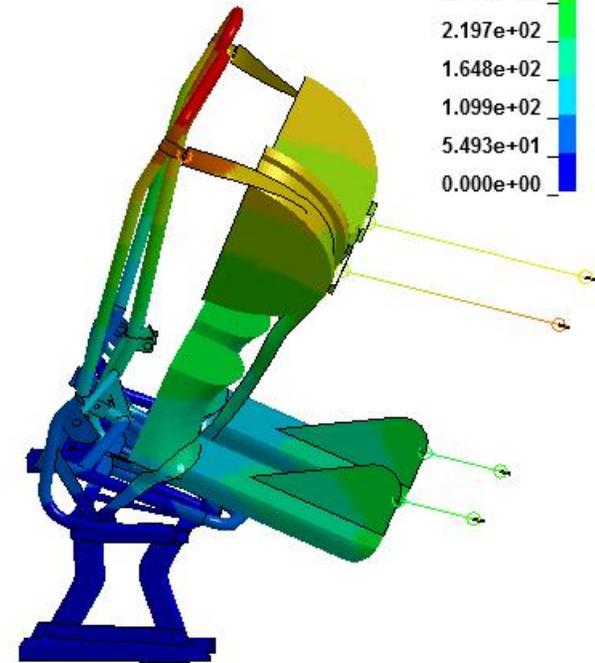
St=1, T= 0
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 1
max=0, at node# 1



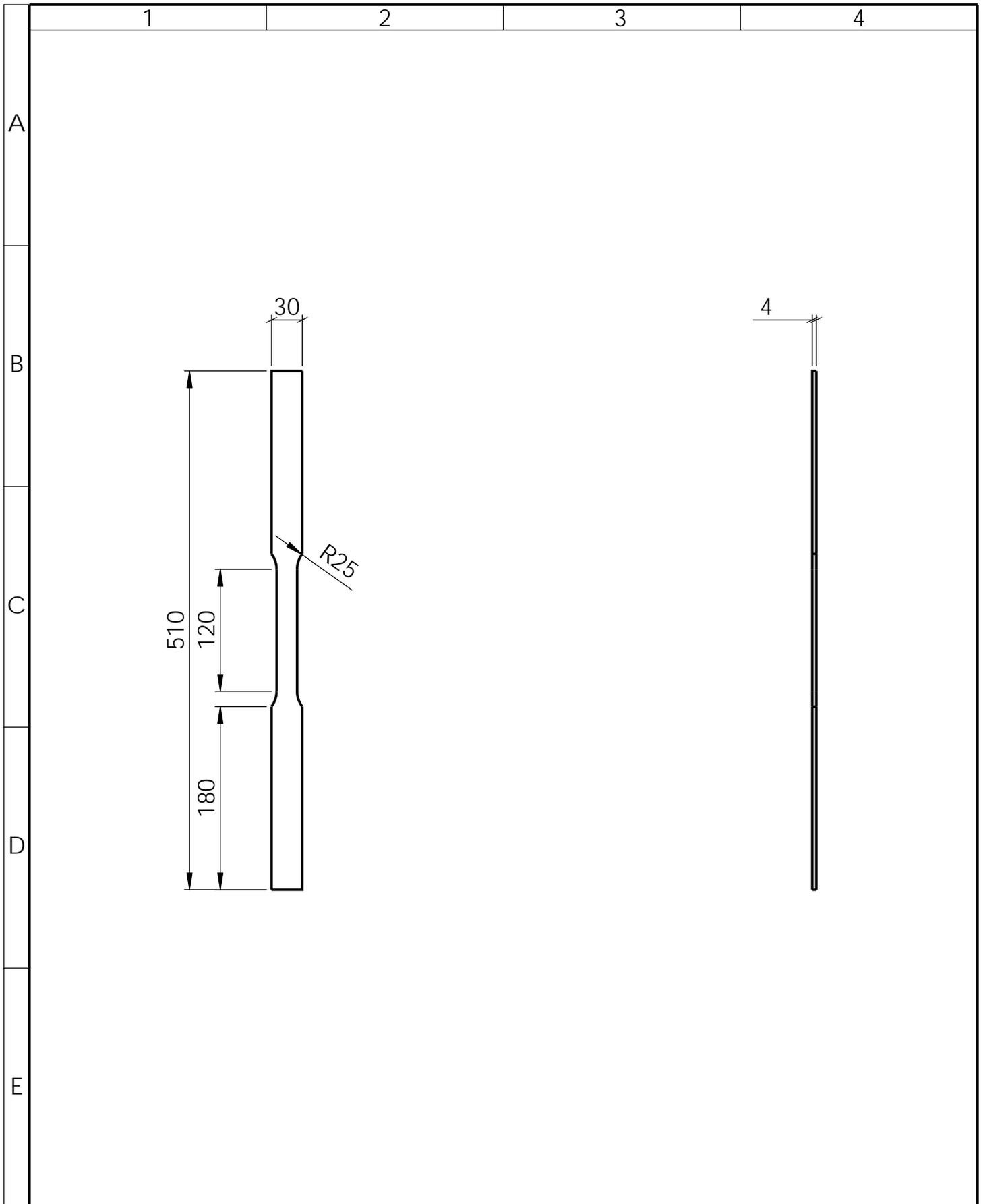
St=11, T= 0.1
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 4940
max=509.723, at node# 42953



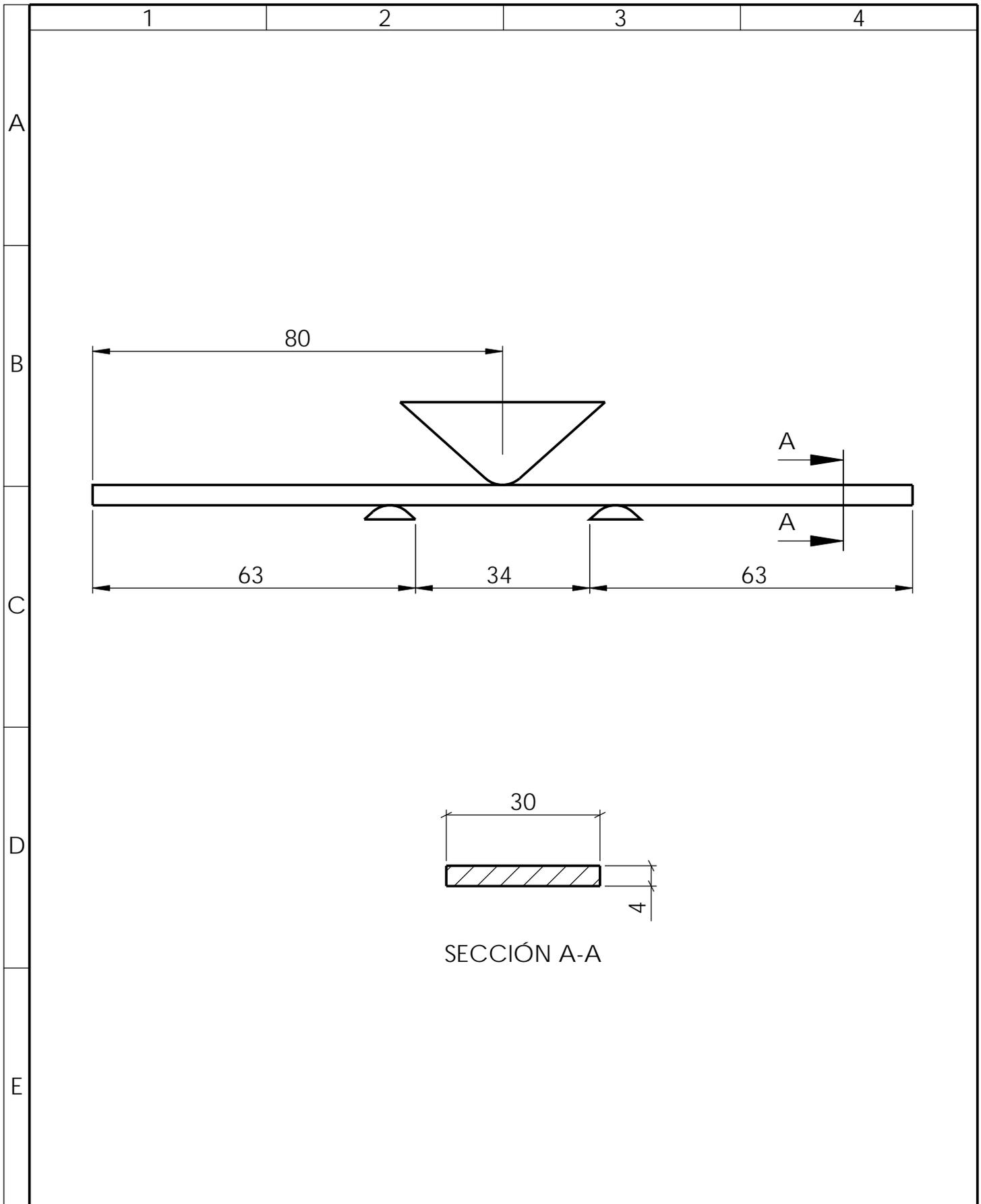
St=22, T= 0.2
Contours of Resultant Displacement
min=0, at node# 4742
max=549.33, at node# 42953



ANEXO 14. Planos



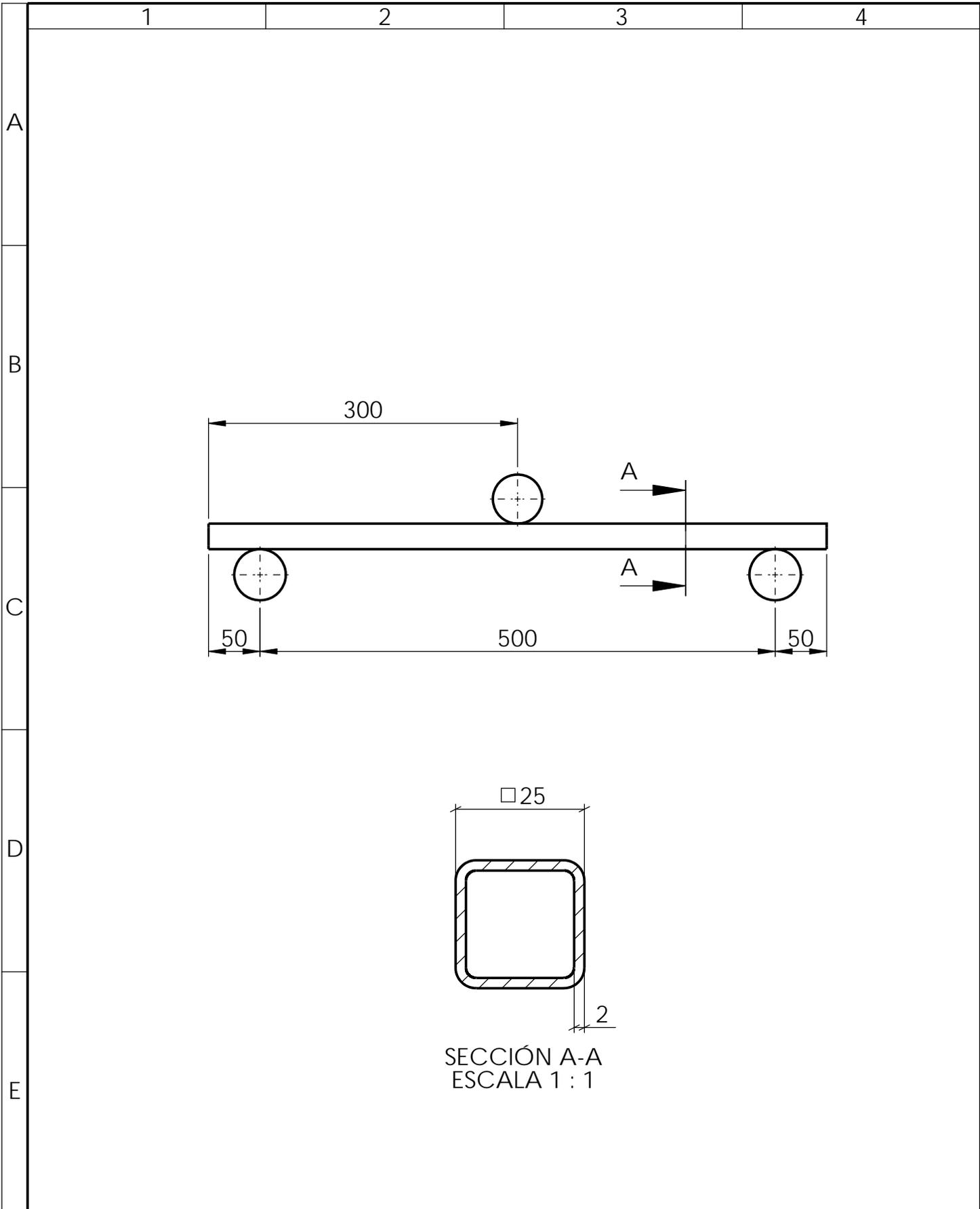
				Tolerancia:	Peso:	Material:			
				± 1	436.32 gr	ASTM A36			
						Título: PROBETA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN			Escala:
									1:5
						N.º Lámina: HOJA 1 DE 1			Registro:
						U.T.A. INGENIERIA - MECANICA			
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:	Sustitución:					



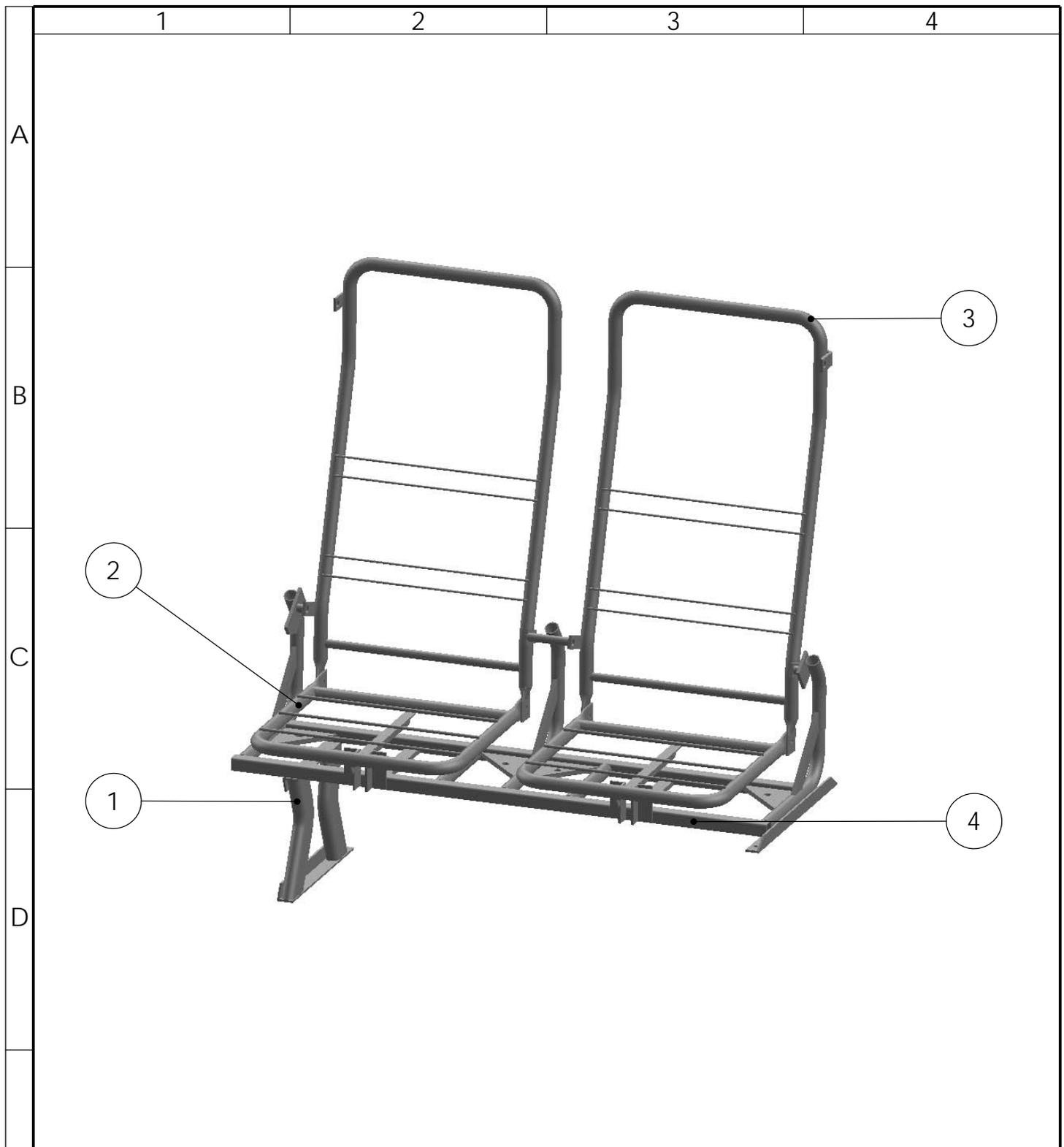
SECCIÓN A-A

				Tolerancia:	Peso:	Material:		
				± 1	38.82 gr	VARIOS		
					Fecha	Nombre	Título:	
				Dibujó:	16/08/2016	Luis Martínez	CONFIGURACIÓN PARA ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM A36	
				Revisó:	23/10/2016	Ing. Diego Núñez		
				Aprobó:	23/10/2016	Ing. Diego Núñez		
				U.T.A. INGENIERIA - MECANICA			N.º Lámina:	Registro:
							HOJA 1 DE 1	
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:	Sustitución:				

Escala:
1:1

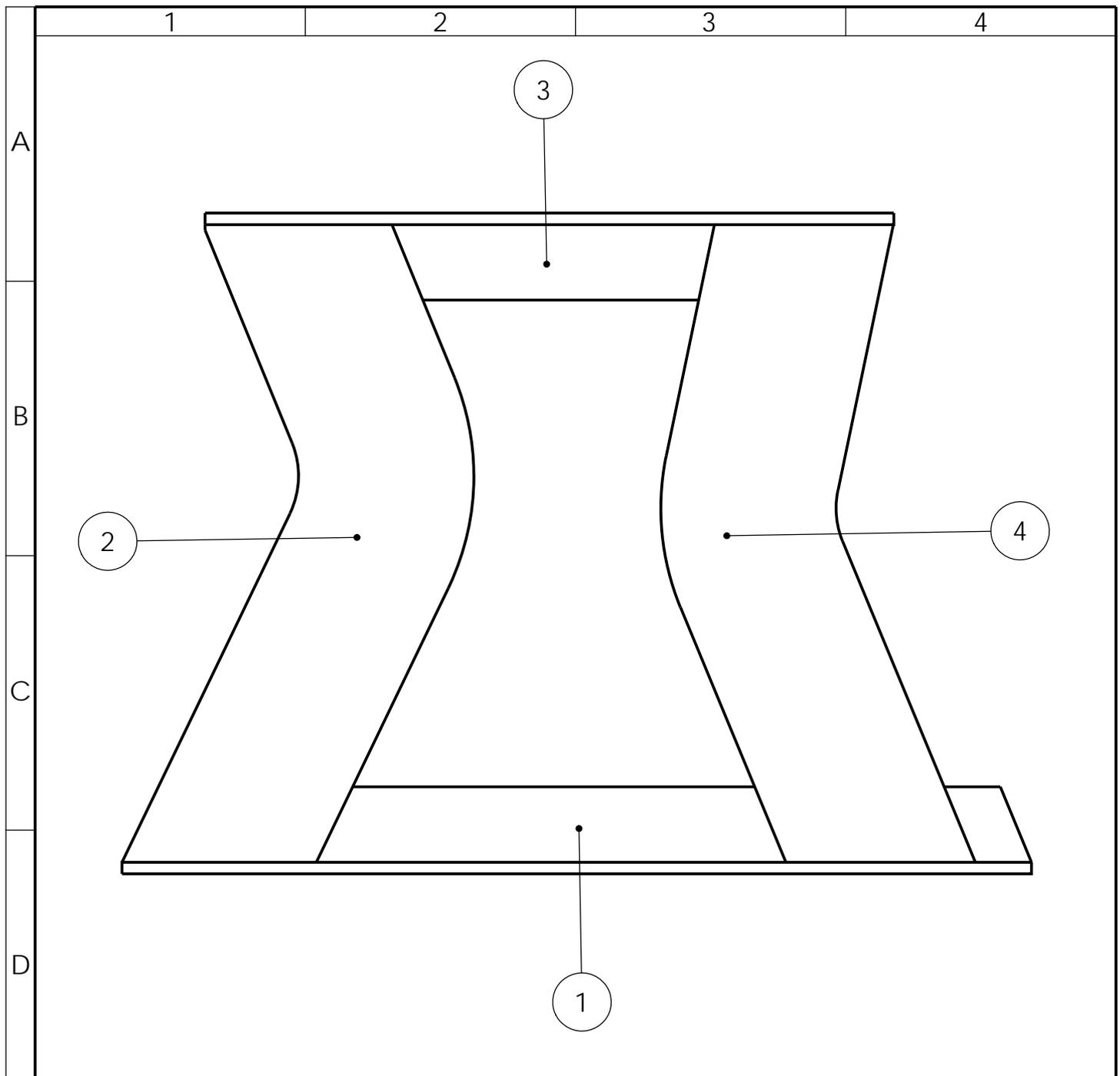


				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 1	678.19 gr	VARIOS	
				Fecha	Nombre	Título:	Escala:
				Dibujó: 16/08/2016	Luis Martinez	CONFIGURACIÓN PARA ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM A500	1:5
				Revisó: 23/10/2016	Ing. Diego Núñez		
				Aprobó: 23/10/2016	Ing. Diego Núñez		
				U.T.A. INGENIERIA - MECANICA		N.º Lámina:	Registro:
						HOJA 1 DE 1	
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:	Sustitución:			



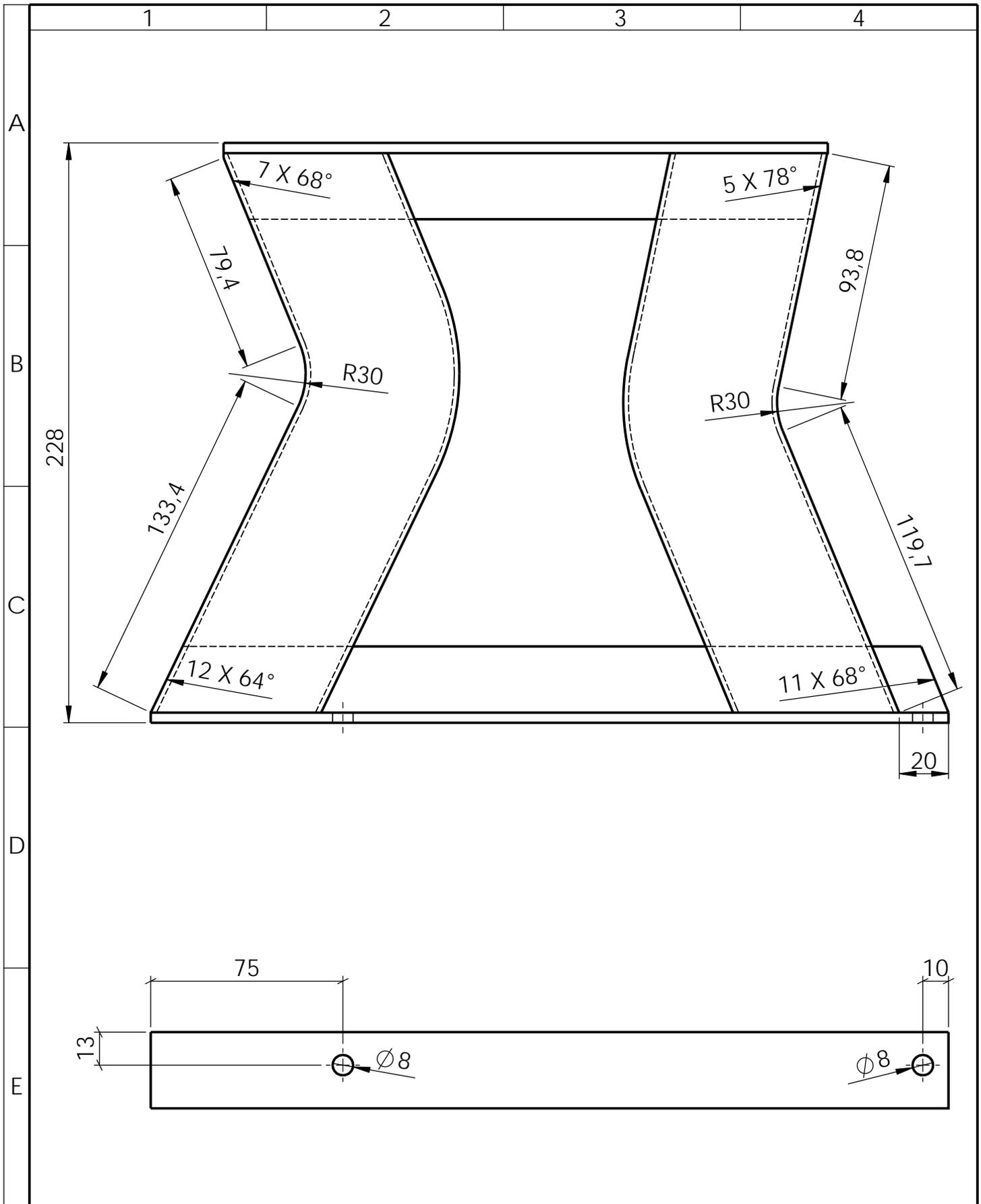
No. de orden	No. de pieza	Denominación	Número de norma o dibujo	Observaciones
1	1	Pata		
2	2	Asiento		
2	3	Espaldar		
1	4	Base		

Tolerancia:		Peso:		Material:	
± 1		21164.96 gr		VARIOS	
Fecha		Nombre		Título:	
Dibujó: 16/08/2016		Luis Martínez		ESTRUCTURA PROPUESTA	
Revisó: 8/11/2016		Ing. Diego Núñez		Escala: 1:10	
Aprobó: 8/11/2016		Ing. Diego Núñez		Registro:	
U.T.A.		N.º Lámina:		HOJA 1 DE 11	
INGENIERIA - MECANICA		Sustitución:			
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:		

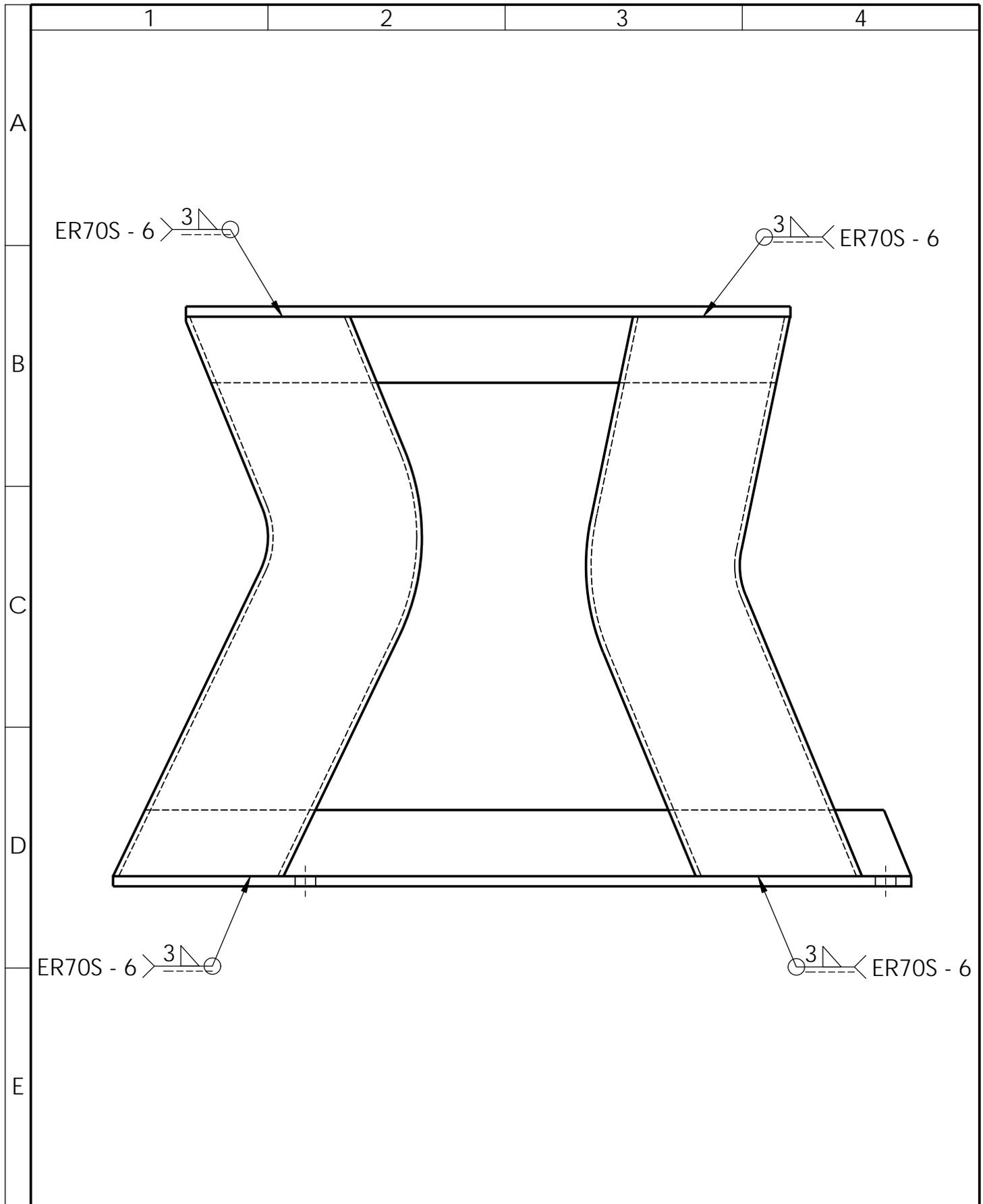


N.º DE ELEMENTO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	LONGITUD
1	1	Ángulo 30 x 30 x 4 mm	311.34
2	1	Tubo estructural ovalado 60 x 25 x 2 mm	264.39
3	1	Ángulo 30 x 30 x 4 mm	235.8
4	1	Tubo estructural ovalado 60 x 25 x 2 mm	249.01

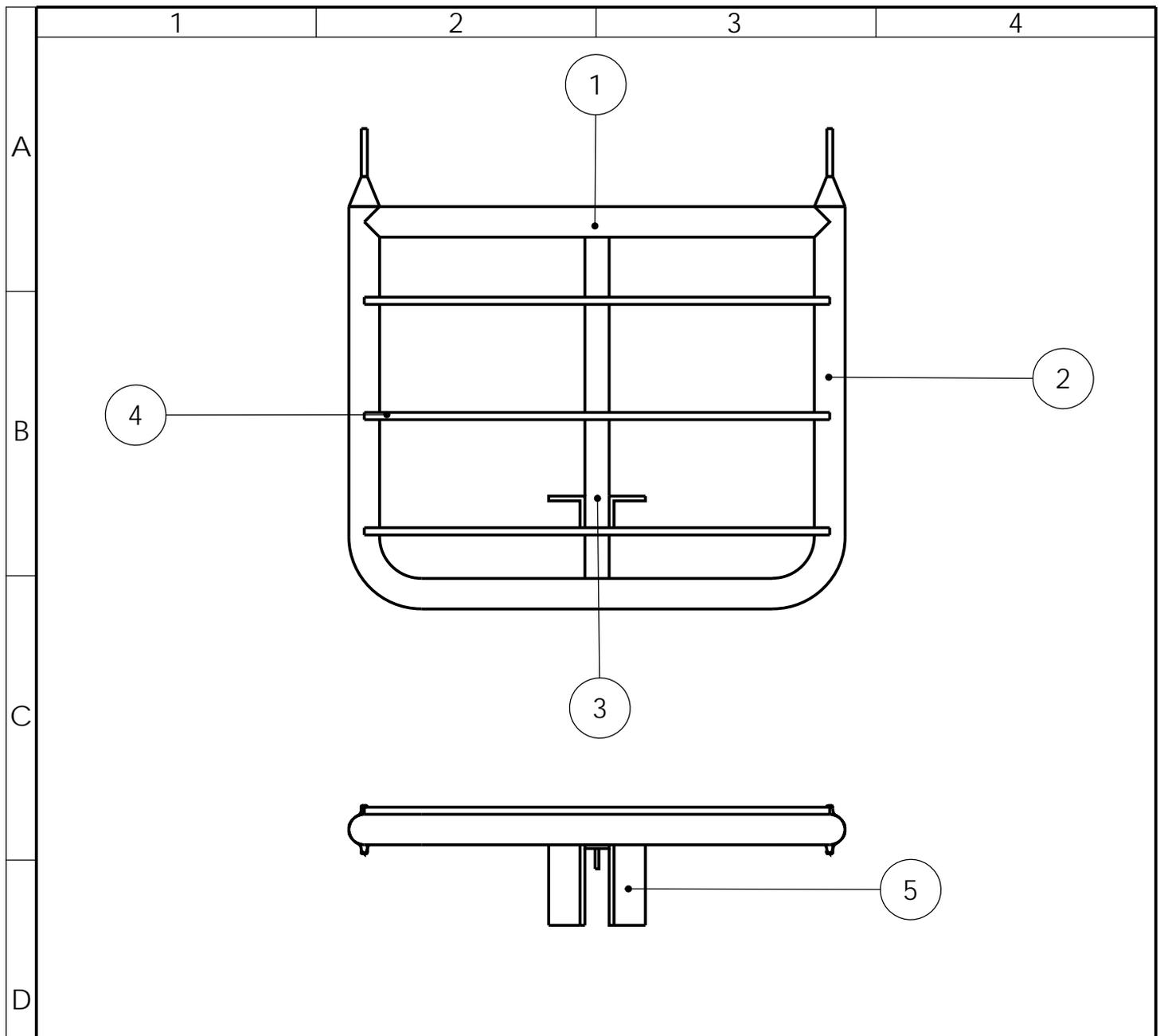
Tolerancia:		Peso:		Material:	
± 1		1990.16 gr		VARIOS	
Fecha		Nombre		Título:	
Dibujó: 16/08/2016		Luis Martínez		PATA PROPUESTA	
Revisó: 8/11/2016		Ing. Diego Núñez		Escala:	
Aprobó: 8/11/2016		Ing. Diego Núñez		1:2	
U.T.A.				N.º Lámina:	
INGENIERIA - MECANICA				HOJA 2 DE 11	
Edición: Modificación: Fecha: Nombre:				Sustitución:	
				Registro:	



				Tolerancia: ± 1	Peso: 1990.16 gr	Material: VARIOS		
						Escala: 1:2		
				Dibujó: 16/08/2016	Nombre: Luis Martínez	Título: PATA PROPUESTA		
				Revisó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez			
				Aprobó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez			
				U.T.A. INGENIERIA - MECANICA		N.º Lámina: HOJA 3 DE 11		
						Sustitución:		Registro:
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:					

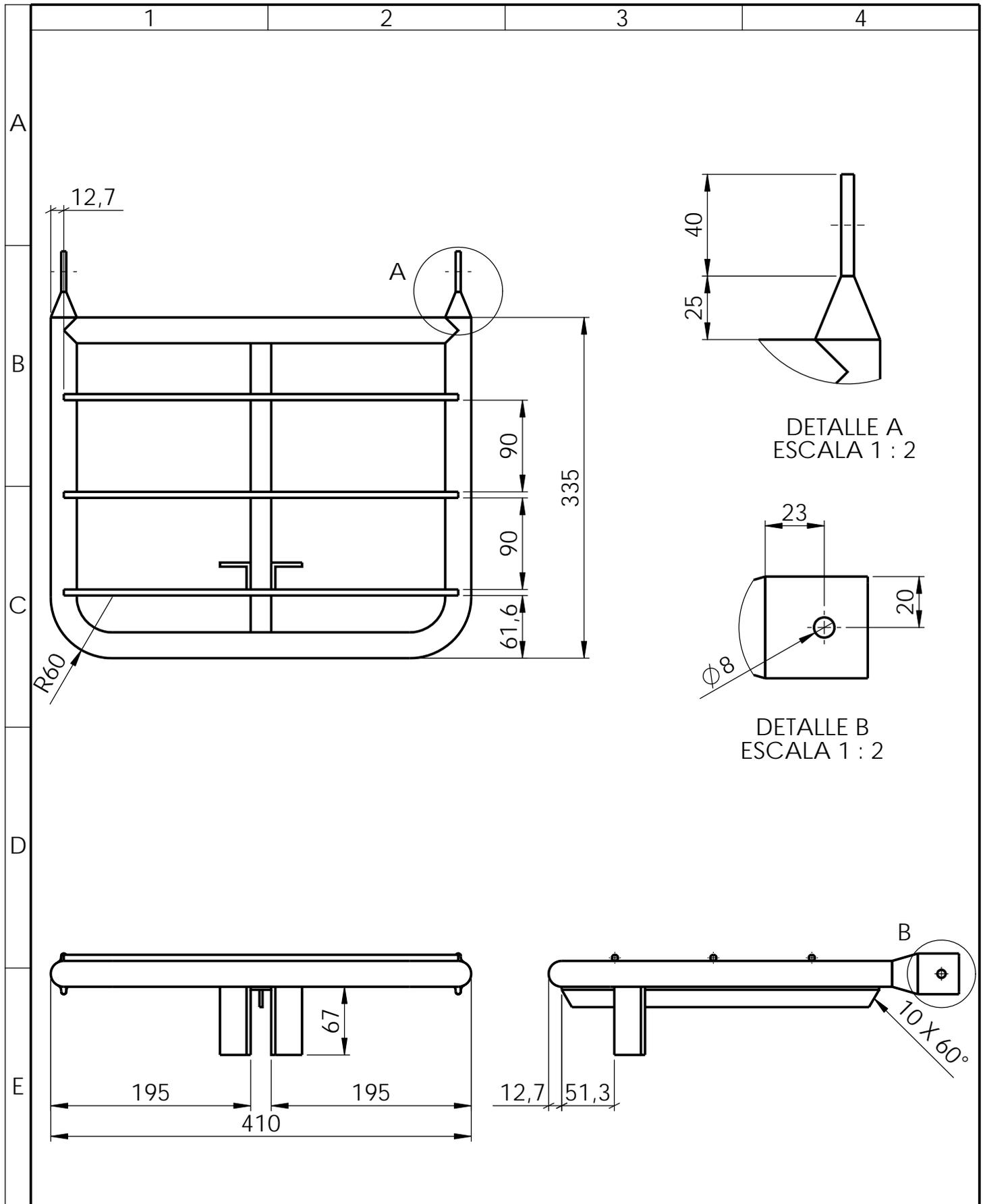


				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 1	1990.16 gr	VARIOS	
				Fecha	Nombre	Título:	Escala:
				Dibujó: 16/08/2016	Luis Martínez	PATA PROPUESTA PLANO DE SOLDADURA	1:2
				Revisó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				Aprobó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				U.T.A. INGENIERIA - MECANICA		N.º Lámina:	Registro:
						HOJA 4 DE 11	
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:	Sustitución:			



N.º DE ELEMENTO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	LONGITUD
1	1	Tubo estructural redondo D = 1", e = 2mm	384.6
2	1	Tubo estructural redondo D = 1", e = 2mm	988.6
3	1	T estructural 20 x 20 x 3 mm	309.6
4	3	Varilla lisa D = 6mm	384.6
5	2	Ángulo 30 x 30 x 4 mm	70

Tolerancia:		Peso:		Material:	
± 1		2484.05 gr		VARIOS	
Fecha		Nombre		Título:	
Dibujó: 16/08/2016		Luis Martínez		ASIENTO PROPUESTO	
Revisó: 8/11/2016		Ing. Diego Núñez		Escala:	
Aprobó: 8/11/2016		Ing. Diego Núñez		1:5	
U.T.A.		N.º Lámina:		Registro:	
INGENIERIA - MECANICA		HOJA 5 DE 11			
Edición:		Modificación:		Sustitución:	
Fecha:		Nombre:			



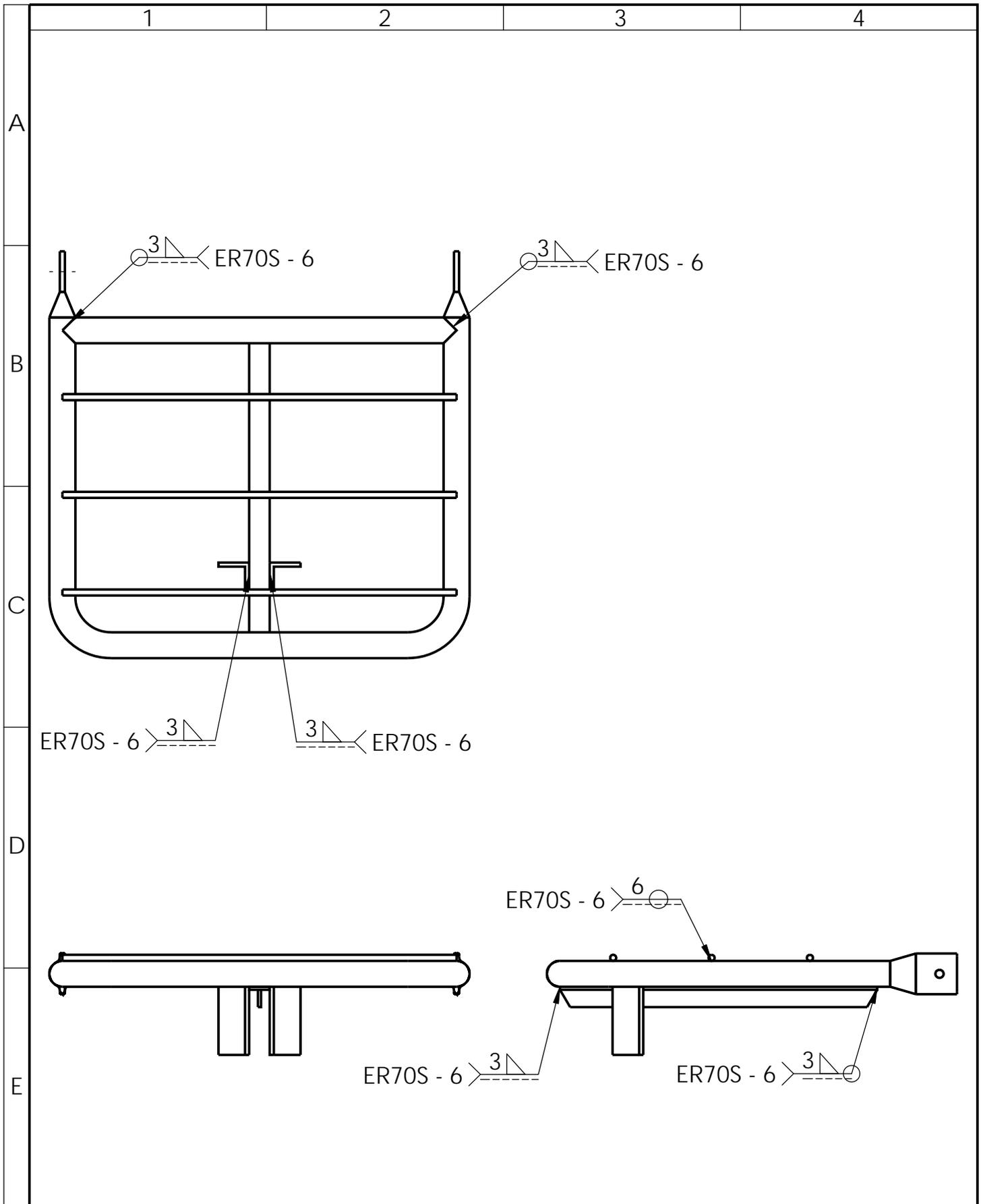
DETALLE A
ESCALA 1 : 2

DETALLE B
ESCALA 1 : 2

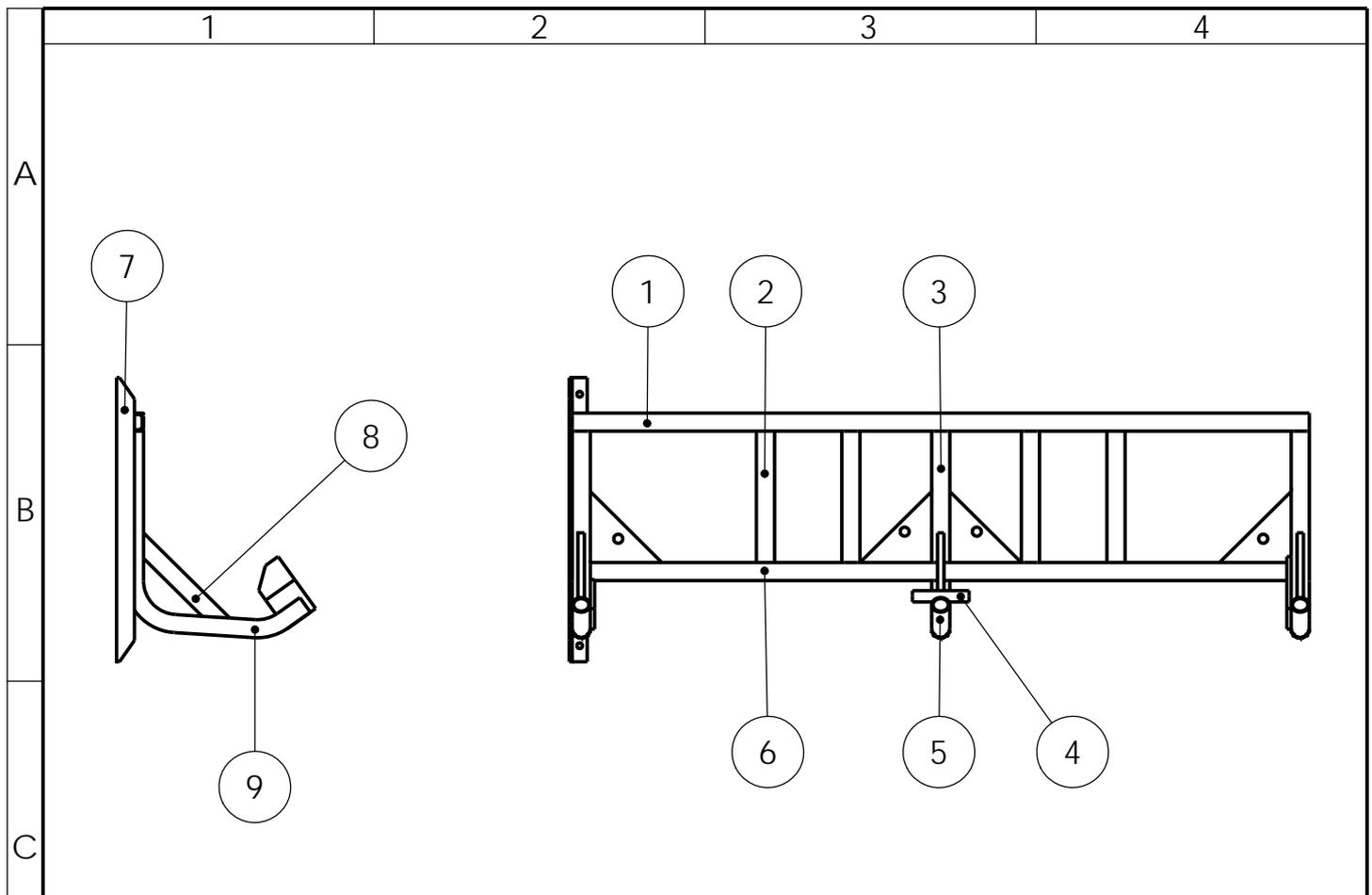
B

10 X 60°

				Tolerancia: ± 1	Peso: 2484.05 gr	Material: VARIOS	
				Fecha	Nombre	Título:	Escala:
				Dibujó: 16/08/2016	Luis Martinez	ASIENTO PROPUESTO	1:5
				Revisó: 27/10/2016	Ing. Diego Núñez		
				Aprobó: 27/10/2016	Ing. Diego Núñez		
				U.T.A. INGENIERIA - MECANICA		N.º Lámina: HOJA 6 DE 11	Registro:
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:			Sustitución:	

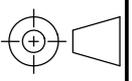


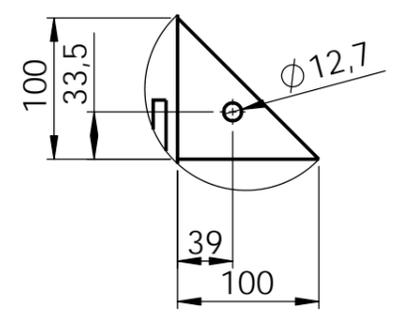
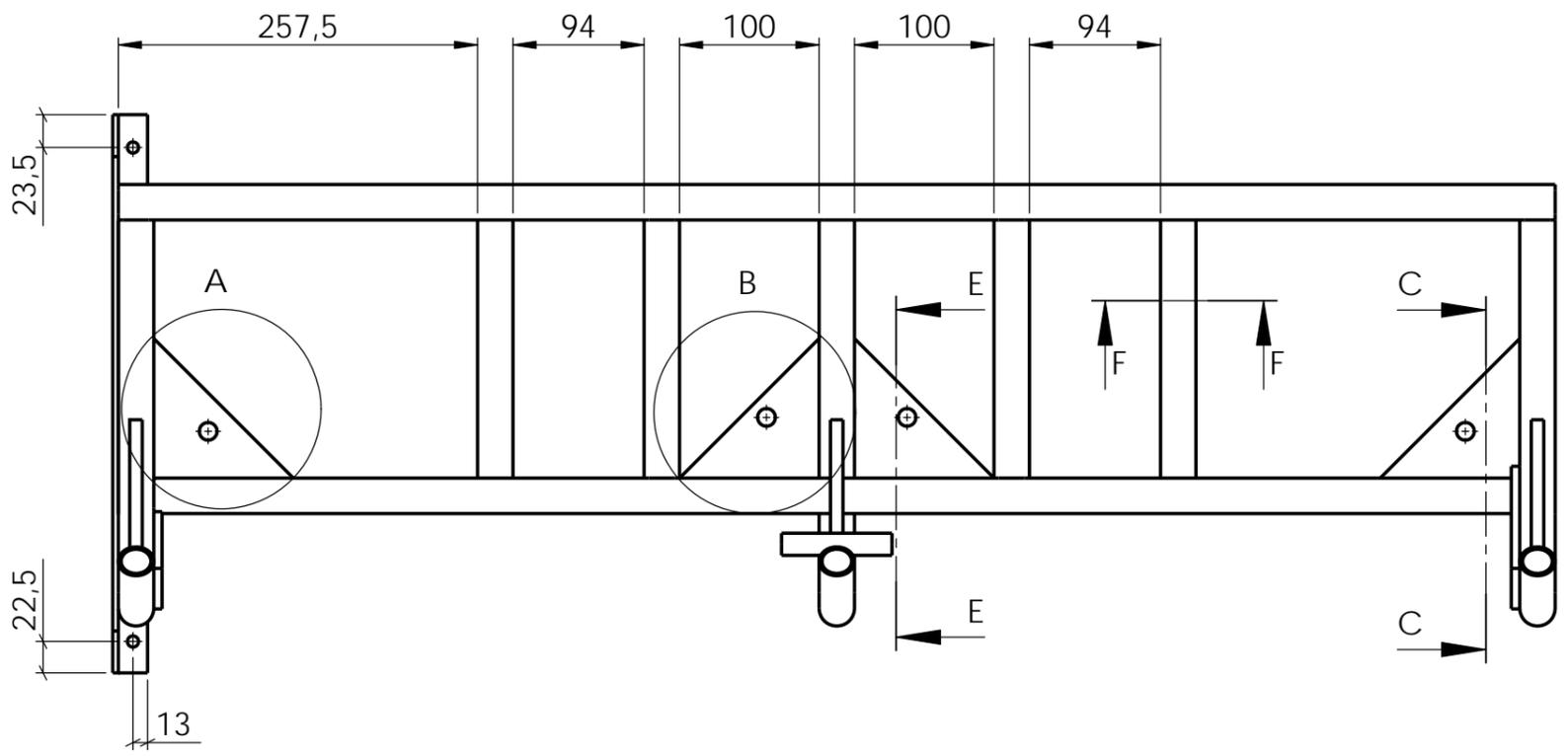
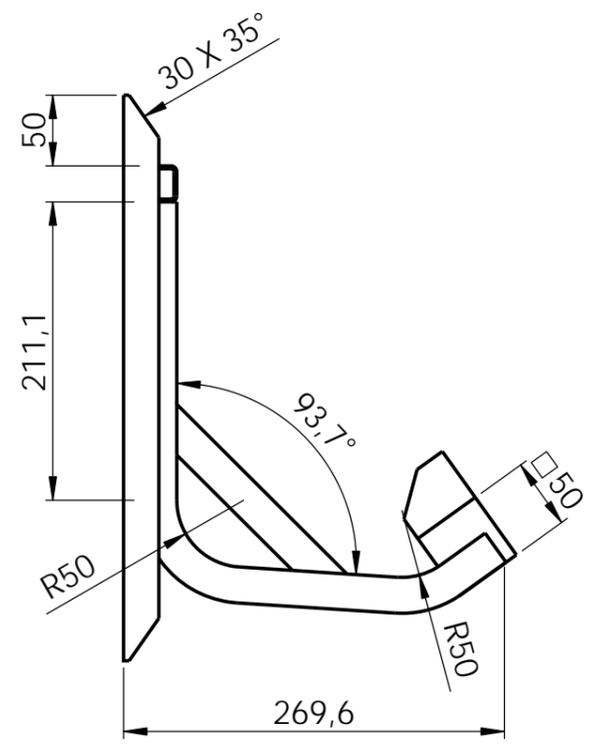
				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 1	2484.05 gr	VARIOS	
				Fecha	Nombre	Título:	Escala:
				Dibujó: 16/08/2016	Luis Martínez	ASIENTO PROPUESTO PLANO DE SOLDADURA	1:5
				Revisó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				Aprobó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				U.T.A. INGENIERIA - MECANICA		N.º Lámina:	Registro:
						HOJA 7 DE 11	
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:	Sustitución:			



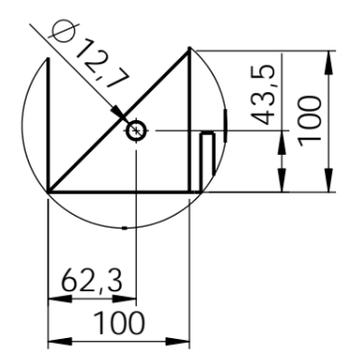
N.º DE ELEMENTO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	LONGITUD
1	1	Tubo estructural cuadrado 25 x 25 x 2 mm	1030
2	2	Pletina 30 x 9 mm	185
3	3	Tubo estructural redondo D = 1", e = 2 mm	185
4	1	Tubo estructural redondo D = 7/8", e = 2 mm	79.2
5	1	Tubo estructural redondo D = 1", e = 2 mm	283.09
6	1	Tubo estructural cuadrado 25 x 25 x 2 mm	979.2
7	1	Ángulo 30 x 30 x 4 mm	400
8	3	Pletina 30 x 9 mm	115,6
9	2	Tubo estructural redondo D = 1", e = 2 mm	493.49

Tolerancia:		Peso:		Material:	
± 1		8618.11 gr		VARIOS	
Fecha		Nombre		Título:	
Dibujó: 16/08/2016		Luis Martínez		BASE PROPUESTA	
Revisó: 8/11/2016		Ing. Diego Núñez		Escala:	
Aprobó: 8/11/2016		Ing. Diego Núñez		1:10	
U.T.A.				N.º Lámina:	
INGENIERIA - MECANICA				HOJA 8 DE 11	
Edición: Modificación: Fecha: Nombre:				Sustitución:	
				Registro:	

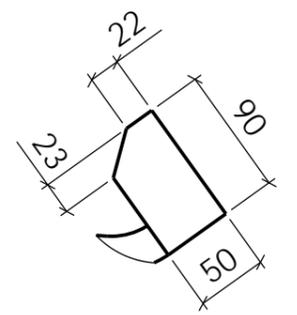




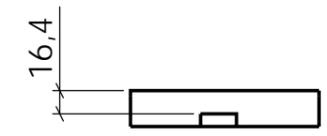
DETALLE A



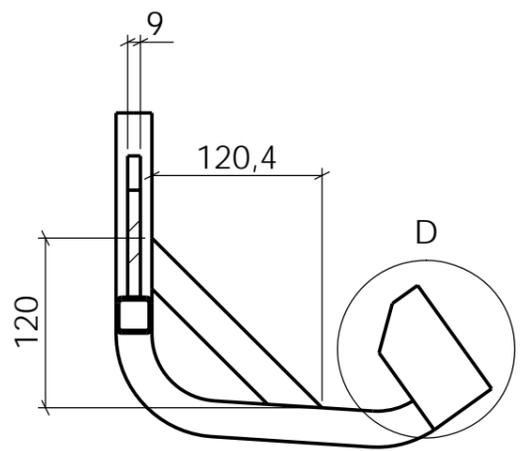
DETALLE B



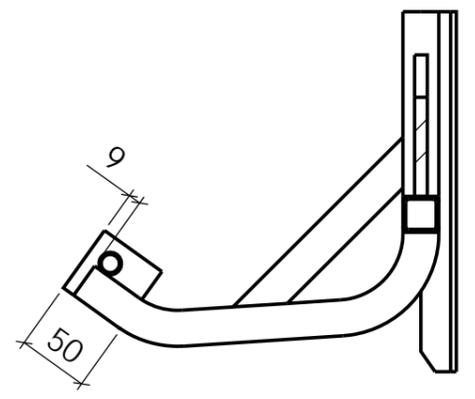
DETALLE D



SECCIÓN F-F

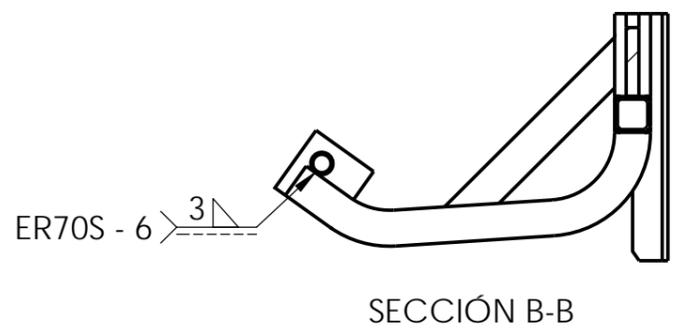
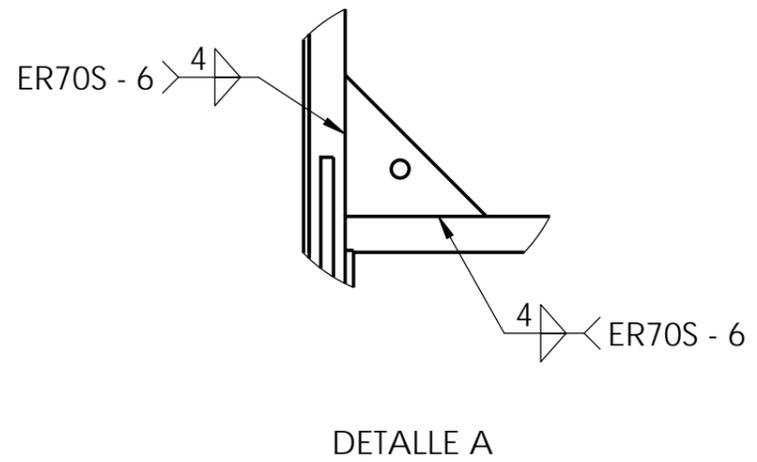
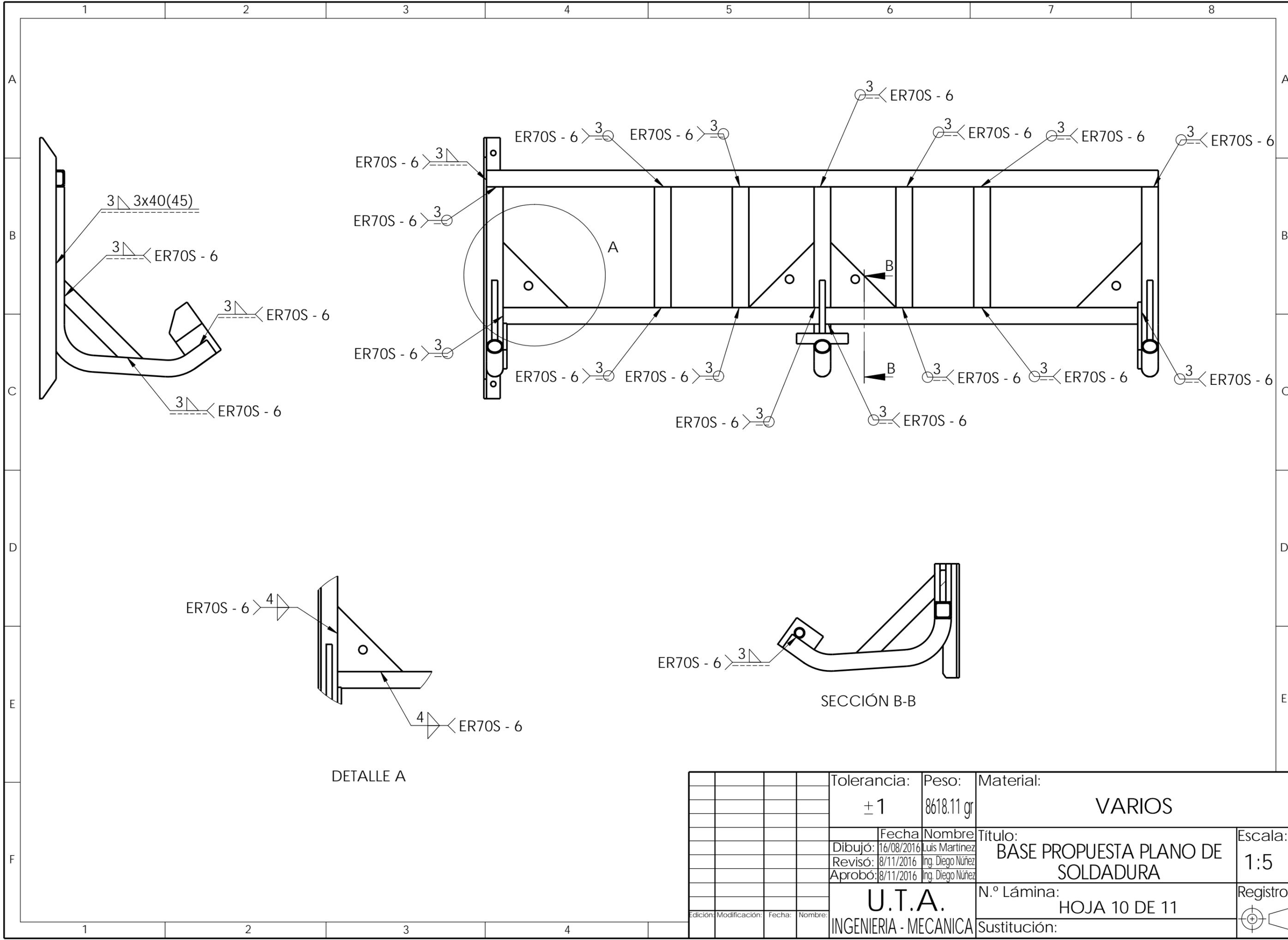


SECCIÓN C-C

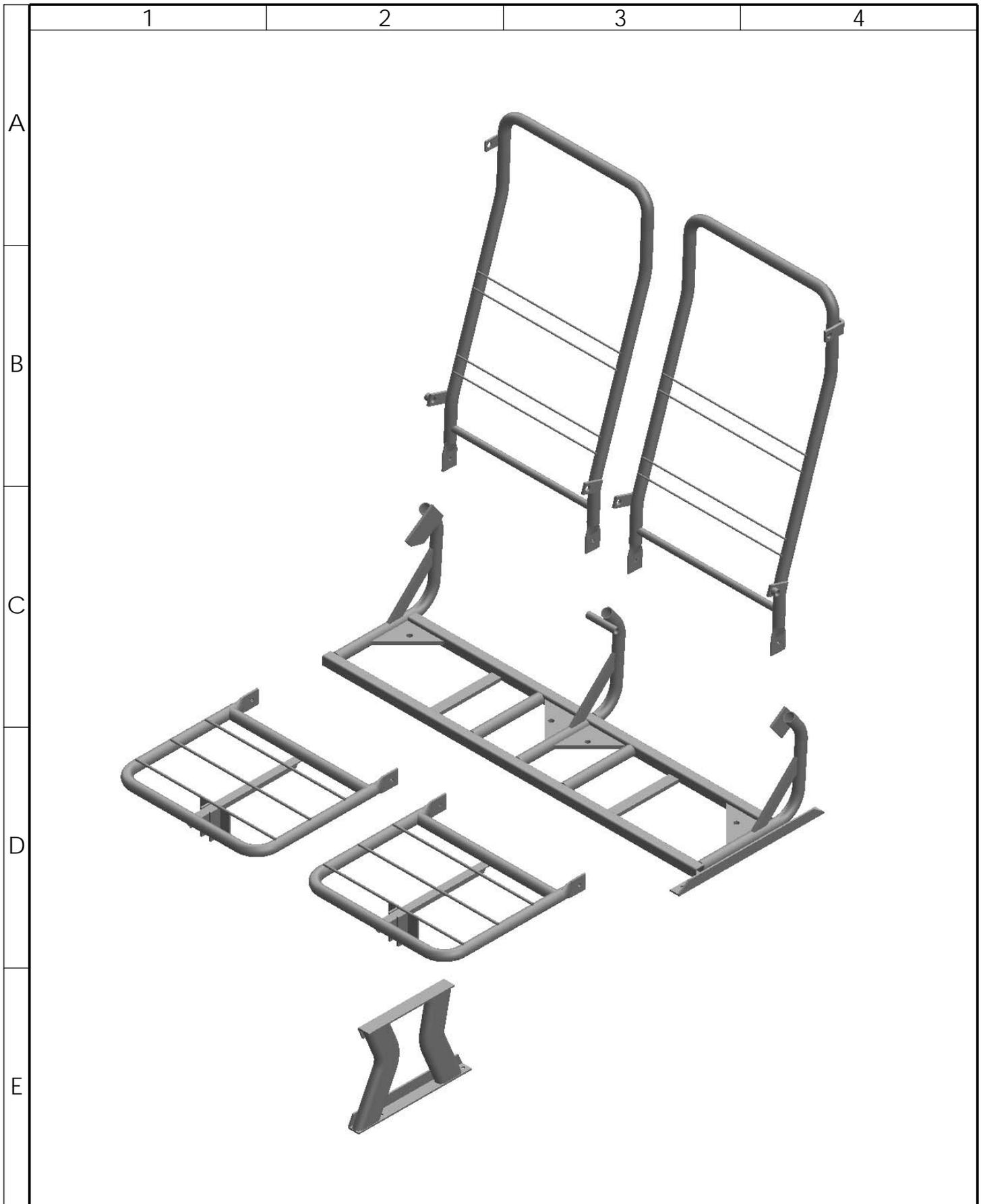


SECCIÓN E-E

				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 1	8618,11 gr	VARIOS	
				Fecha	Nombre	Título:	Escala:
				Dibujó: 16/08/2016	Luis Martínez	BASE PROPUESTA	1:5
				Revisó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				Aprobó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				U.T.A. INGENIERIA - MECANICA		N.º Lámina:	Registro:
						HOJA 9 DE 11	
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:			Sustitución:	



				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 1	8618.11 gr	VARIOS	
				Fecha	Nombre	Título:	Escala:
				Dibujó: 16/08/2016	Luis Martínez	BASE PROPUESTA PLANO DE SOLDADURA	1:5
				Revisó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				Aprobó: 8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				U.T.A.		N.º Lámina:	Registro:
				INGENIERIA - MECANICA		HOJA 10 DE 11	⊕
				Edición:	Modificación:	Sustitución:	
				Fecha:	Nombre:		



				Tolerancia:	Peso:	Material:		
				± 1	21164.96 gr	VARIOS		
					Fecha	Nombre	Título:	Escala:
				Dibujó:	16/08/2016	Luis Martinez	ESTRUCTURA EXPLOSIONADA	1:10
				Revisó:	8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				Aprobó:	8/11/2016	Ing. Diego Núñez		
				U.T.A. INGENIERIA - MECANICA			N.º Lámina:	Registro:
							HOJA 11 DE 11	
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:	Sustitución:				

**ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LOS ANCLAJES DE
CINTURONES DE SEGURIDAD EN ASIENTOS DE AUTOBÚS INTERPROVINCIAL
PARA VERIFICAR SU RESISTENCIA SEGÚN LA NORMA NTE INEN 2704 EN LA
EMPRESA MIVILTECH SOLUCIONES INDUSTRIALES**

Martínez Calderón Luis Antonio

Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

Ambato – Ecuador

E – mail: lmartin_1097@hotmail.com

RESUMEN: El presente trabajo tiene como finalidad realizar el análisis dinámico explícito por elementos finitos de los anclajes de cinturones de seguridad en estructuras de asientos de autobús interprovincial fabricados por MIVILTECH Soluciones Industriales bajo los parámetros de evaluación establecidos en el Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704.

Para ello se ha construido un modelo digital adecuado, simplificado y optimizado que reúne la geometría, condiciones de entorno y propiedades de materiales que más se acercan a las condiciones reales del ensayo físico de resistencia de anclajes para cinturones de seguridad de dos y tres puntos, obteniendo como resultado que la estructura analizada no es capaz de resistir los ensayos debido a que se producen esfuerzos y deformaciones excesivas en ella, para lo cual se realizaron nuevos análisis en una nueva estructura modificada, la cual fue capaz de resistir los ensayos en forma satisfactoria.

PALABRAS CLAVE: Análisis por elementos finitos, anclajes de cinturones de seguridad, asiento de autobús, prueba de resistencia, NTE INEN 2704, R 14 CEPE.

ABSTRACT: This study aims to perform an explicit dynamics finite element analysis of the seatbelt anchorages used in interprovincial bus seat structures manufactured by MIVILTECH Industrial Solutions according to evaluation parameters established in the Regulation No. 14 of the Economic Commission for Europe referenced in Ecuadorian Technical Standard INEN 2704.

It was necessary to create an adequate, simplified and optimized digital model, which includes all the geometrical, material and environmental conditions to approximate the real conditions of resistance tests for two and three point seatbelt anchorages. As a result, the analyzed structure was not able to resist the test because of the high stresses and deformations produced. Consequently, the structure was modified to perform new analyses; the new structure was able to resist the test satisfactorily.

KEYWORDS: Finite element analysis, seatbelt anchorages, bus seat, resistance test, ETS INEN 2704, ECE R 14.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad en el transporte es un asunto de gran interés a nivel mundial debido a la creciente demanda de este servicio, lo cual crea la necesidad de garantizar el bienestar de los usuarios, para ello se han establecido diferentes normativas y reglamentos que tienen por objeto evaluar la resistencia y correcto desempeño de los diferentes componentes de vehículos de transporte público, mucho más en aquellos vehículos destinados a recorrer grandes distancias como son los autobuses interprovinciales, mismos que deben contar con estrictas medidas de seguridad.

Debido a que los accidentes de tránsito son la octava causa de muerte a nivel mundial [1], se han desarrollado medidas de protección para los ocupantes de vehículos, siendo la más efectiva de ellas los cinturones de seguridad, ya que éstos pueden reducir de un 60 a 80 % las probabilidades de fallecimiento o heridas graves en caso de un accidente [1].

Sin embargo, es necesario establecer medidas de regulación y evaluación del desempeño de componentes como es el caso de los anclajes de cinturones de seguridad; entre los principales reglamentos existentes a nivel mundial para este fin se encuentran el Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa [2] y el Reglamento Federal de Seguridad para Vehículos Motorizados N° 210 de los Estados Unidos [3], los cuales a su vez son tomados a

menudo como referencia en diferentes países, tal es el caso del Ecuador en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704 [4].

1.1. Cinturones de seguridad

Los cinturones son dispositivos de seguridad pasiva en forma de arnés tejido a partir de fibras poliméricas de alta resistencia como poliéster o nylon que se instalan en vehículos con la finalidad de mantener a los ocupantes sujetos a sus asientos, evitando que salgan expulsados o sufran colisiones contra objetos contundentes u otras personas en caso de producirse un accidente de tránsito [5], ya que actúan como sistema de amortiguación, freno y retención reduciendo gradualmente las desaceleraciones bruscas producidas, mismas que de no controlarse adecuadamente podrían causar lesiones graves en la cabeza, cuello, espalda y piernas de los ocupantes [6].



Figura 1. Cinturón de seguridad [5]

Su efectividad ha quedado ampliamente demostrada al contribuir con la prevención de lesiones severas, la tabla 1 muestra la tasa de prevención de lesiones graves con el uso del cinturón de seguridad.

Tabla 1. Tasa de reducción de lesiones con el uso de cinturones de seguridad. [7]

TIPO DE LESIÓN	CONDUCTOR	PASAJERO
Lesiones cerebrales	33%	56%
Fracturas craneales	18%	18%
Heridas faciales	45%	64%
Lesiones oculares	38%	40%
Fracturas faciales	6%	6%
Lesiones pulmonares	33%	58%

1.2. Ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad

En nuestro país, el Reglamento Técnico Ecuatoriano 043 con los requisitos para autobuses interprovinciales establece que los autobuses destinados para este servicio deben disponer de cinturones de seguridad en todos sus asientos, debiendo contar en forma obligatoria con cinturones de tres puntos de anclaje en la primera fila de asientos así como también en las filas próximas a puertas de salida, mientras que en los demás asientos se debe contar con cinturones de dos puntos de anclaje como mínimo [8].

Debido a estos requerimientos de seguridad es necesario garantizar que los anclajes que unen los cinturones de seguridad a la estructura de los asientos sean capaces de soportar condiciones extremas como es el caso de un accidente de tránsito.

1.3. Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa

Este es quizá el reglamento para evaluación de anclajes de cinturones de seguridad más conocido ya que incluye procedimientos de ensayo para diferentes tipos de vehículos y cinturones de seguridad.

El ensayo es cuasi estático y consiste en la evaluación de la resistencia de anclajes de cinturones de seguridad por medio de la aplicación de grandes fuerzas de tracción directamente en los cinturones de seguridad por medio de bloques sobre los cuales se colocan los cinturones. Esta es una de las pruebas de resistencia de componentes más severas ya que las cargas aplicadas son sumamente grandes.

Los principales parámetros establecidos en el reglamento para la realización del ensayo son:

- Se aplican fuerzas de tracción sobre bloques cuyas dimensiones y forma se muestran en las figuras 2 y 3, existen dos tipos de bloques, uno pélvico y uno torácico los cuales deben ser lo suficientemente rígidos y resistentes como para no sufrir deformaciones ni daños.

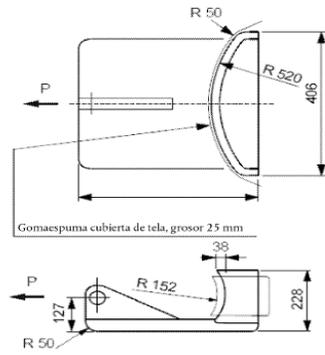


Figura 2. Bloque pélvico. [2]

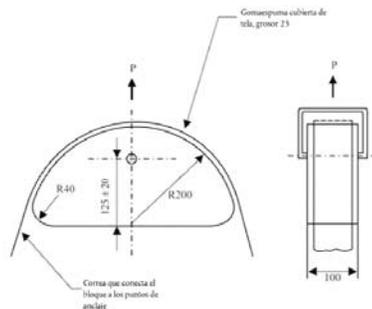


Figura 3. Bloque torácico. [2]

- Los bloques deben ajustarse adecuadamente con los cinturones de seguridad, se utilizan ambos bloques en la evaluación de cinturones de seguridad con tres puntos de anclaje, mientras que para cinturones de dos puntos solo se necesitan los bloques pélvicos.
- Los asientos deberán ubicarse en una posición fija bloqueando los dispositivos de reclinación.
- Las cargas se aplicarán sobre cada uno de los bloques y dependerán del tipo de cinturón que se vaya a evaluar y de la categoría del vehículo que se evalúa, en el caso de autobuses las cargas son de 4500 N para cinturones

de tres puntos y 7400 en cinturones de dos puntos.

- Además de las cargas anteriores debe añadirse una carga de inercia que depende del peso del asiento en los bloques pélvicos ya que estos se encuentran próximos al centro de gravedad del asiento, al igual que las cargas nominales la carga de inercia depende de la categoría del vehículo siendo igual a 6.6 veces el peso del asiento en el caso de autobuses.
- Las cargas de tracción se deben aplicar con una inclinación de entre 5° y 15°.
- Los anclajes deben ser capaces de soportar las cargas aplicadas durante 0.2 segundos sin romperse.

2. METODOLOGÍA

A continuación se describe el proceso llevado a cabo para el desarrollo del presente tema de investigación:

2.1. Condiciones de entorno para el ensayo de resistencia de anclajes de cinturones de seguridad

Los parámetros establecidos en el Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa referenciado en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704 bajo los cuales se evalúa la resistencia de los anclajes de cinturones de seguridad en autobuses son los siguientes:

Tabla 2. Parámetros de evaluación según el Reglamento 14 CEPE

	Cinturón de seguridad de tres puntos	Cinturón de seguridad de dos puntos
Categoría del vehículo	M3	M3
Carga aplicada en el bloque pélvico	7400 N	4500 N
Carga aplicada en el bloque torácico	N/A	4500 N
Carga de inercia	6,6 * Peso del asiento	6,6 * Peso del asiento
Ángulo de aplicación de la carga	10°	10°
Tiempo de aplicación de la carga	0,2 segundos	0,2 segundos

(Fuente: Autor)

2.1.1. Determinación de la categoría del vehículo

En este reglamento las cargas aplicadas están en función de la categoría del vehículo al cual corresponde el asiento a evaluarse. La categoría del vehículo se determina a partir de su peso total, la tabla 3 muestra los pesos de varios modelos de autobuses interprovinciales existentes en el país.

Tabla 3. Peso de diferentes modelos de autobús interprovincial disponibles en el país. [9]

Chasis	Potencia (Hp)	Peso chasis (Kg)	Peso Bruto Vehicular (Kg)
Hino AK	260	4715	15700
Mercedes Benz OF-1730	305	4890	18100
Isuzu LV150	360	5550	16000
Volkswagen 17-210	206	4940	16800
Volkswagen 18-310	303	5290	18000
Scania K310	310	5825	19500
Scania K380	380	6013	19500

se puede determinar su categoría en base a la clasificación dada por el Reglamento Una vez conocido el peso del vehículo, se puede determinar su categoría en base a la clasificación dada por el Reglamento 678 de la Comisión Económica para Europa, la tabla 4 muestra dicha clasificación.

Tabla 4. Categorías de vehículos para transporte de pasajeros. [10]

Categorías por Criterios de Homologación	Descripción	Clasificación por criterios de construcción. Anexo II R.G.V.
Categoría M	Vehículos de motor concebidos y fabricados principalmente para el transporte de personas y su equipaje (Reglamento UE 678/2011)	
Categoría M ₁	Vehículos de la categoría M que tengan, como máximo, ocho plazas de asiento además de la del conductor. No dispondrán de ningún espacio para viajeros de pie. El número de plazas podrá limitarse a una (es decir la del conductor).	10
Categoría M ₂	Vehículos de la categoría M que tengan más de ocho plazas de asiento además de la del conductor y cuya masa máxima no sea superior a 5 toneladas. Los vehículos pertenecientes a la categoría M ₂ podrán tener, además de las plazas de asiento, espacio para viajeros de pie.	11, 12, 13, 14
Categoría M ₃	Vehículos de la categoría M que tengan más de ocho plazas de asiento además de la del conductor y cuya masa máxima sea superior a 5 toneladas. Los vehículos pertenecientes a la categoría M ₃ podrán tener espacio para viajeros de pie.	12, 13, 14, 16

De acuerdo a esta clasificación el vehículo corresponde a la categoría M3 ya que su peso es superior a 5 toneladas.

$$\text{Peso vehículo promedio} = 17500 \text{ kg}$$

$$\text{Peso vehículo promedio} = 17,5 \text{ toneladas}$$

$$\text{Peso vehículo} > 5 \text{ toneladas}$$

Categoría M3

2.1.2. Determinación de la carga de inercia

La carga de inercia que debe adicionarse a las cargas aplicadas en cada bloque pélvico depende del peso del asiento a evaluarse y de la categoría del vehículo al que pertenece, en este caso el vehículo corresponde a la categoría M3, por lo que bajo estas

condiciones la carga de inercia es igual a 6.6 veces el peso del asiento.

El peso del asiento se obtuvo al pesarlo empleando una balanza digital, el peso obtenido fue de 65 libras, lo que equivale a 29.5 kg.



Figura 4. Peso del asiento a evaluarse.
(Fuente: Autor)

Una vez conocido el peso del asiento, se determina la carga de inercia con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Carga de inercia} &= 6.6 * \text{Peso}_{\text{asiento}} \\ \text{Carga de inercia} &= 6.6 * \\ & (29.5 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2) \end{aligned}$$

$$\text{Carga de inercia} = 1908.612 \text{ N}$$

2.1.3. Cargas totales

Para conocer las cargas totales que se aplicarán a cada uno de los bloques pélvicos de prueba, es necesario adicionar la carga de inercia a los valores establecidos en el reglamento, la tabla 5 muestra los valores totales de carga que se aplicarán a cada uno de los bloques.

Tabla 5. Cargas totales aplicadas según el Reglamento 14 CEPE

	Carga total en cada bloque pélvico	Carga total en cada bloque torácico
Cinturón de seguridad de dos puntos	9308.612 N	N/A
Cinturón de seguridad de tres puntos	6408.612 N	4500 N

(Fuente: Autor)

2.2. Estructura del asiento

Las estructuras de asientos de autobús interprovincial fabricadas por MIVILTECH Soluciones Industriales muestran la siguiente configuración:

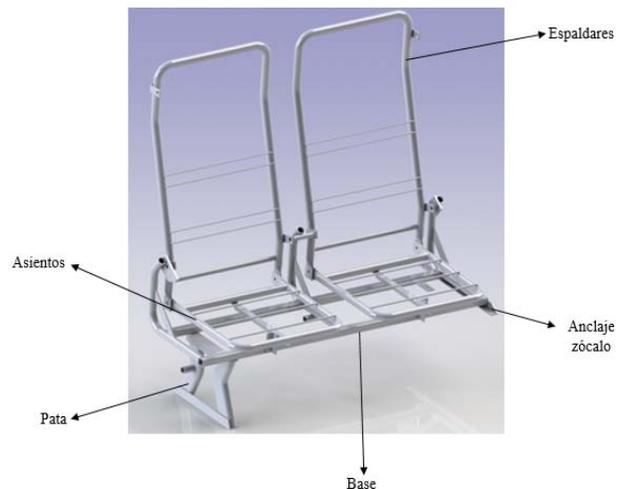


Figura 5. Asiento a evaluarse. (Fuente: Autor)

2.3. Anclajes de cinturones de seguridad

La estructura del asiento para autobús interprovincial cuenta con varios puntos de anclaje para cinturones de seguridad, pudiendo ser de dos o tres puntos de anclaje dependiendo de la ubicación del asiento en el autobús ya que los asientos con cinturones de tres puntos se ubicaran en la primera fila,

mientras que el resto de asientos contarán únicamente con cinturones de dos puntos, figura 6 y la tabla 6 describen la ubicación de los puntos de anclaje en la estructura del asiento.

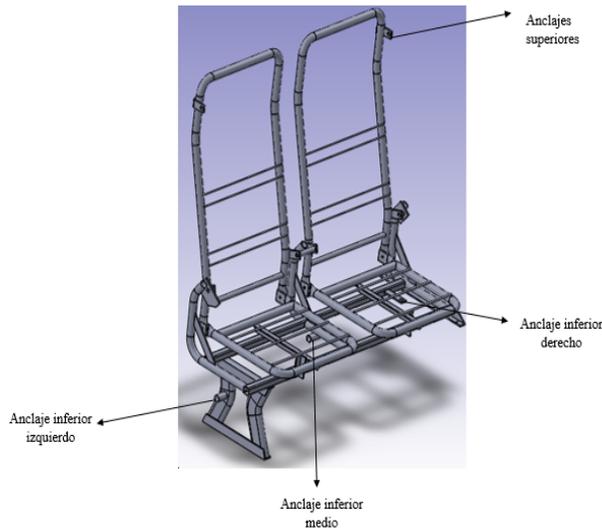


Figura 6. Ubicación de los puntos de anclaje en la estructura del asiento. (Fuente: Autor)

Tabla 6. Ubicación de los anclajes en la estructura

DESCRIPCIÓN	UBICACIÓN EN LA ESTRUCTURA
Anclaje inferior izquierdo	Pata
Anclaje inferior medio	Base
Anclaje inferior derecho	Base
Anclajes superiores (cinturones de tres puntos)	Espaldares

(Fuente: Autor)

2.4. Identificación de materiales de los anclajes y cinturones:

Los materiales utilizados en los puntos de anclaje para cinturones de seguridad se detallan a continuación:

Tabla 7. Materiales de los anclajes y cinturones de seguridad

PARTE	MATERIAL
Anclaje inferior izquierdo	Tubo estructural redondo ASTM A500 Grado A
Anclaje inferior medio	Tubo estructural redondo ASTM A500 Grado A
Anclaje inferior derecho	Pletina ASTM A36
Anclajes superiores	Pletina ASTM A36
Elementos de unión	Pernos grado ISO 8.8 tropicalizados
Cinturón de seguridad	Poliéster

(Fuente: Autor)

2.5. Simplificación y optimización del modelo digital de la estructura

Con la optimización y simplificación del modelo digital, se han eliminado los elementos que no son necesarios, se repararon errores de geometría y se simplificaron las secciones con una geometría demasiado compleja. La figura 7 muestra el modelo simplificado de la estructura del asiento.



Figura 7. Modelo simplificado de la estructura del asiento. (Fuente: Autor)

2.6 Rediseño de la estructura

Este proceso se llevó a cabo debido a que una vez realizado el análisis de resistencia de los anclajes de cinturones de seguridad en la estructura de asiento de autobús interprovincial fabricada actualmente por MIVILTECH Soluciones Industriales se ha determinado que ésta no es capaz de soportar de manera satisfactoria con los parámetros de evaluación establecidos en el Reglamento N° 14 de la Comisión Económica para Europa ya que se producen esfuerzos y deformaciones excesivas.

El rediseño de la estructura se ha realizado identificando sus partes más críticas, es decir aquellas zonas donde se generan grandes esfuerzos y deformaciones, en dichas zonas se han modificado y añadido nuevos elementos estructurales que permitan reforzar la estructura procurando no alterar demasiado la estructura original.

A continuación se describen las partes de la estructura del asiento que han sido modificadas:

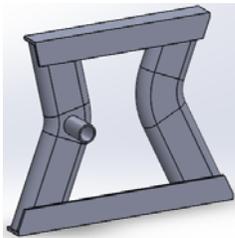
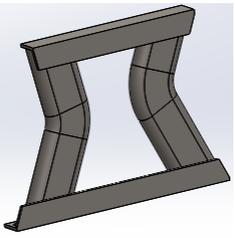
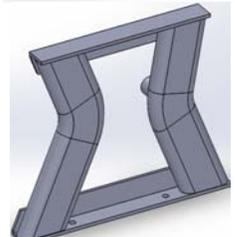
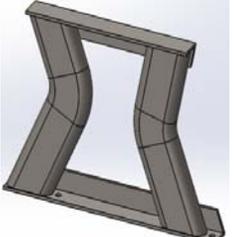
- a) **Pata del asiento:** En esta zona se ha ubicado el punto de anclaje al piso del autobús en un lugar diferente para evitar que éste se desprenda o se levante demasiado, además se ha removido el punto de anclaje para cinturón de seguridad.
- b) **Asientos:** En este componente se ha añadido un elemento estructural de refuerzo en la zona que une los asientos

a la base de la estructura para brindar una mayor estabilidad.

- c) **Base de la estructura:** Este componente es el que ha tenido mayores modificaciones ya que al ser el que más esfuerzo soporta durante el ensayo de resistencia debe contar con una mayor estabilidad. Se han añadido perfiles estructurales de refuerzo en el marco principal de la estructura, además se han ubicado los puntos inferiores de anclaje para cinturones de seguridad en esta zona, mientras que en los refuerzos laterales de la estructura se ha mantenido la forma original aunque se han utilizado perfiles de un mayor espesor.

- d) **Anclajes de cinturones de seguridad inferiores:** Se han reemplazado por completo a los anclajes anteriores tanto en su ubicación como en su forma.

Tabla 8. Modificaciones a la estructura del asiento

ESTRUCTURA ORIGINAL	ESTRUCTURA MODIFICADA
	
	



(Fuente: Autor)

2.7 Modelos de materiales utilizados

Se utilizaron tres modelos de materiales para la caracterización de los componentes en el modelo digital:

a) **Acero estructural ASTM A 36:** Este material se aplica a elementos estructurales como ángulos, pletinas, placas, T estructurales, etc. para su caracterización se utiliza un modelo de material elasto – plástico con rotura. La tabla 9 muestra las propiedades del modelo digital del material.

Tabla 9. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 36

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	7890 kg/m ³
Módulo de Young	200000 MPa
Relación de Poisson	0.3
Deformación plástica de rotura	0.283

(Fuente: Autor)

b) **Acero estructural ASTM A 500:** Este material se aplica principalmente en tubería estructural redonda, cuadrada y

ovalada en el caso de la pata del asiento; para su caracterización se utiliza un modelo de material elasto – plástico con rotura similar al anterior. La tabla 10 muestra las propiedades del modelo digital del material.

Tabla 10. Propiedades del modelo de material del acero ASTM A 500

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	7890 kg/m ³
Módulo de Young	200000 MPa
Relación de Poisson	0.3
Deformación plástica de rotura	0.37

(Fuente: Autor)

c) **Poliéster:** Este material se utiliza en los cinturones de seguridad; para su caracterización se utiliza un modelo de material elástico isotrópico. La tabla 11 muestra las propiedades del modelo digital del material.

Tabla 11. Propiedades del modelo de material del poliéster [11]

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	1390 kg/m ³
Módulo de Young	11000 MPa
Relación de Poisson	0.39

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se ha analizado la resistencia de los anclajes de cinturones de seguridad de dos y tres puntos en la estructura de un asiento de autobús interprovincial.

3.1. Simulación en la estructura original con cinturones de seguridad de dos puntos

Para esta simulación se han utilizado bloques pélvicos normalizados que se emplean para aplicar fuerzas de tracción de 9308.612 N en cada uno de ellos durante un tiempo de 0.2 segundos

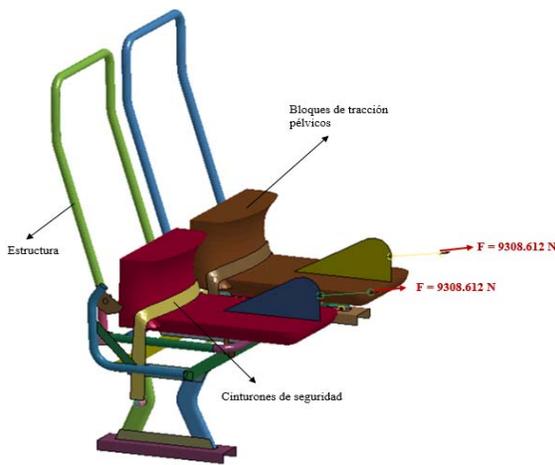


Figura 8. Modelo y condiciones para la simulación. (Fuente: Autor)

A continuación se muestran los resultados principales:

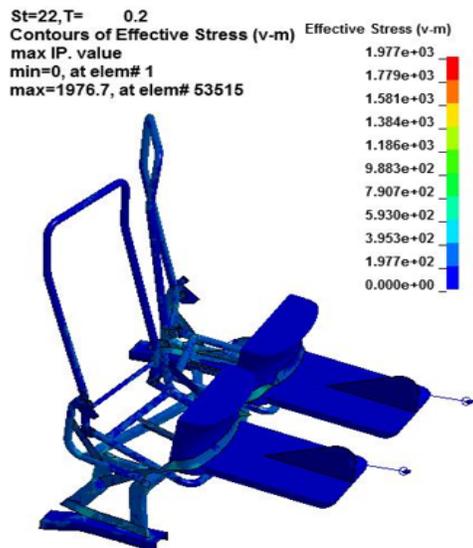


Figura 9. Esfuerzos efectivos en la estructura. (Fuente: Autor)

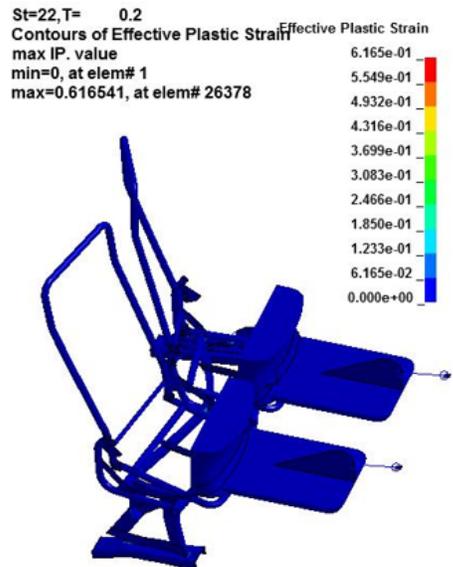


Figura 10. Deformaciones plásticas efectivas en la estructura. (Fuente: Autor)

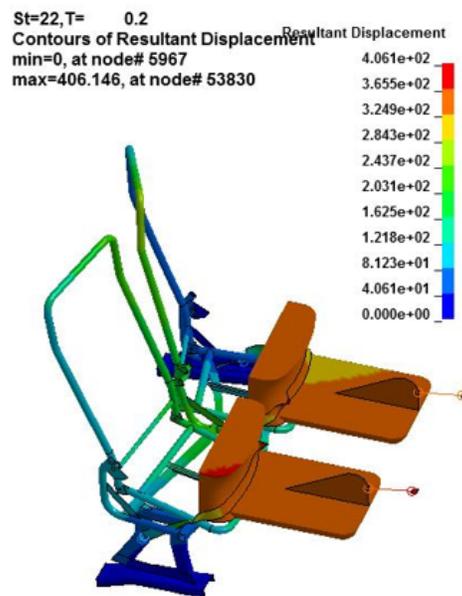


Figura 11. Desplazamientos totales en la estructura. (Fuente: Autor)

La estructura presenta un comportamiento poco satisfactorio durante el ensayo de resistencia, ya que sufre deformaciones excesivas que pueden causar la rotura de ciertos elementos en ella y sobre todo comprometer la seguridad de los ocupantes, tal es así que se tiene una deformación plástica efectiva máxima de 0.616 que

supera por mucho los límites máximos de los materiales, los cuales son 0.37 y 0.283 para los aceros ASTM A500 grado A y ASTM A36 respectivamente; además se tiene un considerable desplazamiento total máximo de 406.146 mm en la base de la estructura.

Debido a este comportamiento se ha determinado que ninguno de los anclajes de cinturones de seguridad es capaz de resistir el ensayo ya que en todos ellos se producen esfuerzos superiores a los esfuerzos máximos permisibles de los materiales que son 383.6425 MPa y 511.980 MPa para los aceros ASTM A500 y ASTM A 36 respectivamente a pesar de que las deformaciones plásticas efectivas son bajas. A continuación se muestra la evaluación de resultados para cada uno de los anclajes:

Tabla 12. Evaluación de resultados en los anclajes para cinturones de seguridad

ANCLAJE	CRITERIO DE ACEPTACIÓN/ RECHAZO SEGÚN NUMERAL 7.1 R14 CEPE	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EFECTIVA MÁXIMA	EXCEDE EL ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE	RESISTE EL ENSAYO
Inferior izquierdo	No se deben producir roturas totales o parciales durante el tiempo de aplicación de la carga	567.967 MPa	0.019	Si	No
Inferior medio		843.557 MPa	0.096	Si	No
Inferior derecho		834.507 MPa	0.067	Si	No

(Fuente: Autor)

3.2. Simulación en la estructura modificada con cinturones de seguridad de dos puntos

Al igual que en la simulación anterior se utilizaron las mismas condiciones:

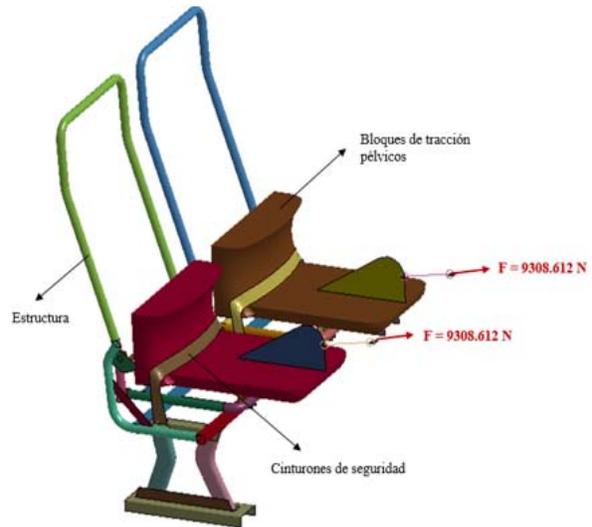


Figura 12. Modelo y condiciones para la simulación. (Fuente: Autor)

A continuación se muestran los resultados principales:

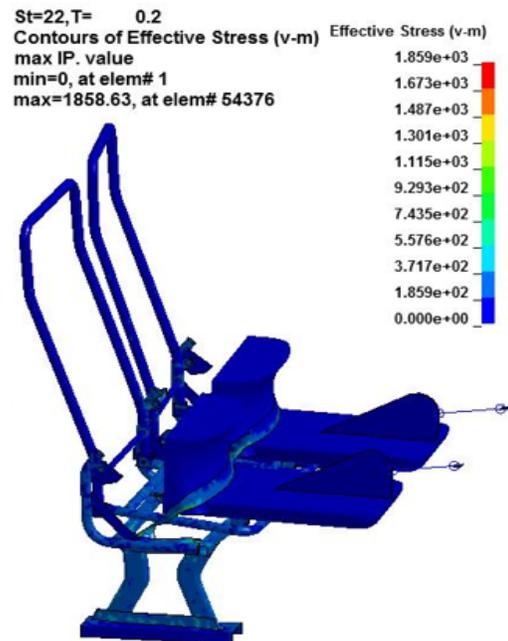


Figura 13. Esfuerzos efectivos en la estructura. (Fuente: Autor)

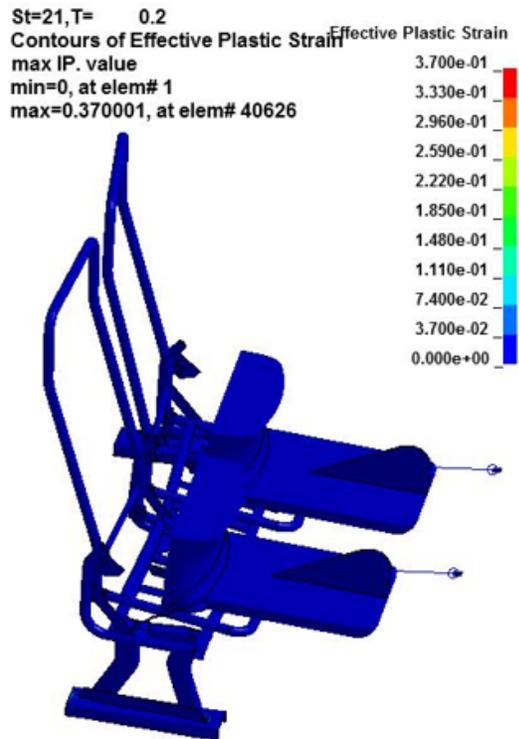


Figura 14. Deformaciones plásticas efectivas en la estructura. (Fuente: Autor)

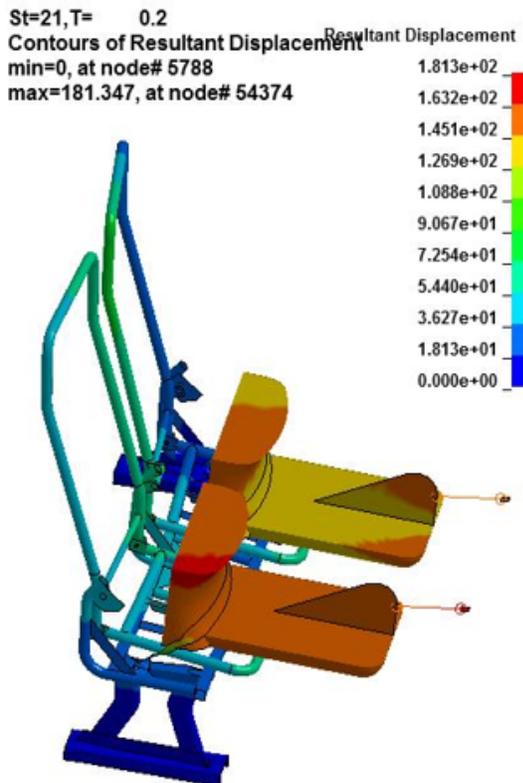


Figura 15. Desplazamientos totales en la estructura. (Fuente: Autor)

A diferencia de la estructura original, la estructura modificada presenta notables mejoras en su desempeño durante el ensayo de resistencia, en general se ha reducido la deformación plástica efectiva máxima de 0.616 a 0.37, es decir en un 40% encontrándose dentro de los límites máximos de los materiales, los cuales son 0.37 y 0.283 para los aceros ASTM A500 grado A y ASTM A36 respectivamente; por otra parte se ha reducido significativamente el desplazamiento total máximo en la base de la estructura pasando de 406.146 mm a 181.345 mm, lo que significa una reducción del 55%.

Debido a este comportamiento los anclajes para cinturones de seguridad son capaces de soportar las cargas aplicadas en forma satisfactoria ya que los esfuerzos producidos son menores al esfuerzo máximo del material ASTM A36 que es 511.980 MPa, además de que en la mayoría de ellos no se presentan deformaciones plásticas efectivas lo que significa que no se producen roturas.

A continuación se muestra la evaluación de resultados para cada uno de los anclajes:

Tabla 13. Evaluación de resultados en los anclajes para cinturones de seguridad

ANCLAJE	CRITERIO DE ACEPTACIÓN/ RECHAZO SEGÚN NUMERAL 7.1 R14 CEPE	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EFECTIVA MÁXIMA	EXCEDE EL ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE	RESISTE EL ENSAYO
Inferior izquierdo	No se deben producir roturas totales o parciales durante el tiempo de aplicación de la carga	526.683 MPa	0	No	Si
Inferior medio izquierdo		391.61 MPa	0	No	Si
Inferior medio derecho		419.35 MPa	0	No	Si
Inferior derecho		434.224 MPa	0.003	No	Si

(Fuente: Autor)

3.3. Simulación en la estructura original con cinturones de seguridad de tres puntos

Para esta simulación se han utilizado bloques pélvicos y torácicos normalizados que se emplean para aplicar fuerzas de tracción de 6408.612 N en los bloques pélvicos y 4500 N en los bloques torácicos durante un tiempo de 0.2 segundos

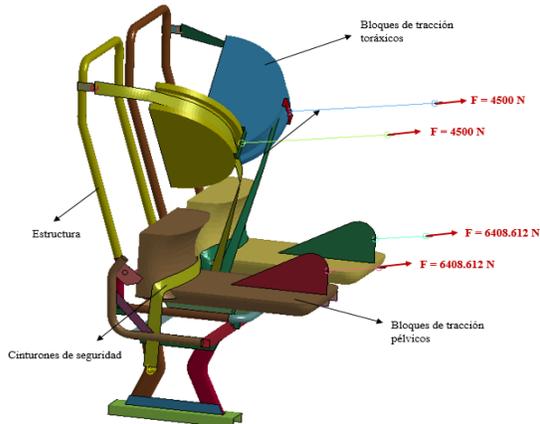


Figura 16. Modelo y condiciones para la simulación. (Fuente: Autor)

A continuación se muestran los resultados principales:

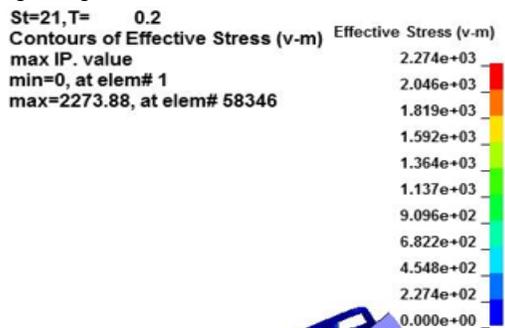


Figura 17. Esfuerzos efectivos en la estructura. (Fuente: Autor)

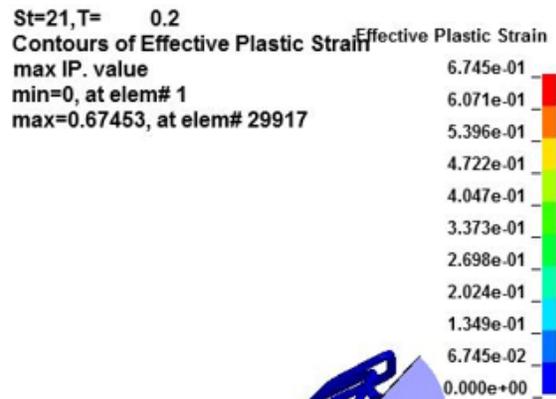


Figura 18. Deformaciones plásticas efectivas en la estructura. (Fuente: Autor)

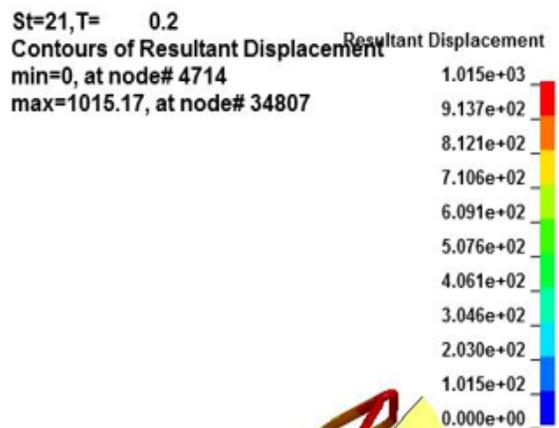


Figura 19. Desplazamientos totales en la estructura. (Fuente: Autor)

La estructura presenta un comportamiento poco satisfactorio durante el ensayo de resistencia, ya que sufre deformaciones excesivas que pueden causar la rotura de ciertos elementos en ella y sobre todo comprometer la seguridad de los ocupantes, se tiene una deformación plástica efectiva máxima de 0.674 que supera por mucho los límites máximos de los materiales, los cuales son 0.37 y 0.283 para los aceros ASTM A500 grado A y ASTM A36 respectivamente; se tiene un desplazamiento total máximo de 1015.17 mm en la zona superior de los espaldares, el cual es un valor inadmisibles.

Debido a este comportamiento se ha determinado que solamente los anclajes superiores son capaces de resistir el ensayo, mientras que ningún anclaje inferior es capaz de hacerlo ya que en todos ellos se producen esfuerzos superiores a los esfuerzos máximos permisibles de los materiales que son 383.6425 MPa y 511.980 MPa para los aceros ASTM A500 y ASTM A 36 respectivamente a pesar de que las deformaciones plásticas efectivas son bajas. A continuación se muestra la evaluación de resultados para cada uno de los anclajes:

Tabla 14. Evaluación de resultados en los anclajes para cinturones de seguridad

ANCLAJE	CRITERIO DE ACEPTACIÓN/ RECHAZO SEGÚN NUMERAL 7.1 R14 CEPE	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EFECTIVA MÁXIMA	EXCEDE EL ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE	RESISTE EL ENSAYO
Inferior izquierdo	No se deben producir roturas totales o parciales durante el tiempo de aplicación de la carga	563.643 MPa	0.010	Si	No
Inferior medio		766.597 MPa	0.069	Si	No
Inferior derecho		714.364 MPa	0.073	Si	No
Superior izquierdo		467.654	8.71×10^{-6}	No	Si
Superior derecho		439.160	0	No	Si

(Fuente: Autor)

3.4. Simulación en la estructura modificada con cinturones de seguridad de tres puntos

Al igual que en la simulación anterior se utilizaron las mismas condiciones:

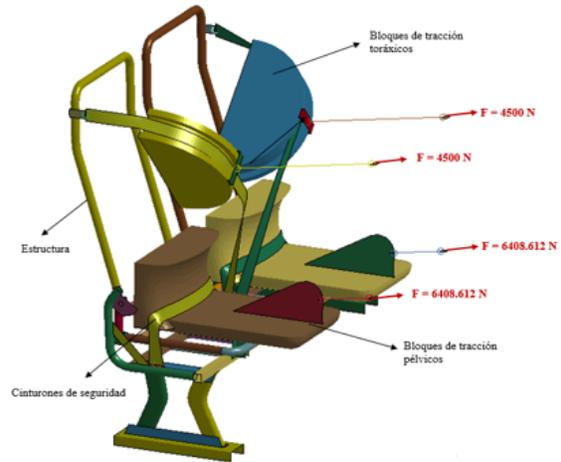


Figura 20. Modelo y condiciones para la simulación. (Fuente: Autor)

A continuación se muestran los resultados principales:

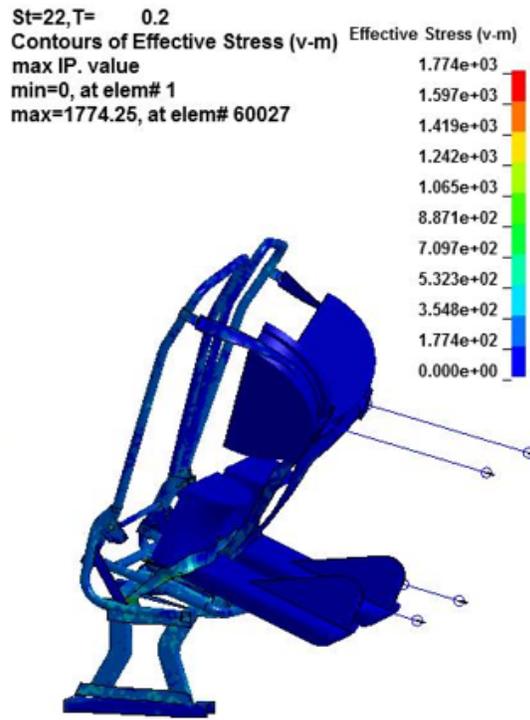


Figura 21. Esfuerzos efectivos en la estructura. (Fuente: Autor)

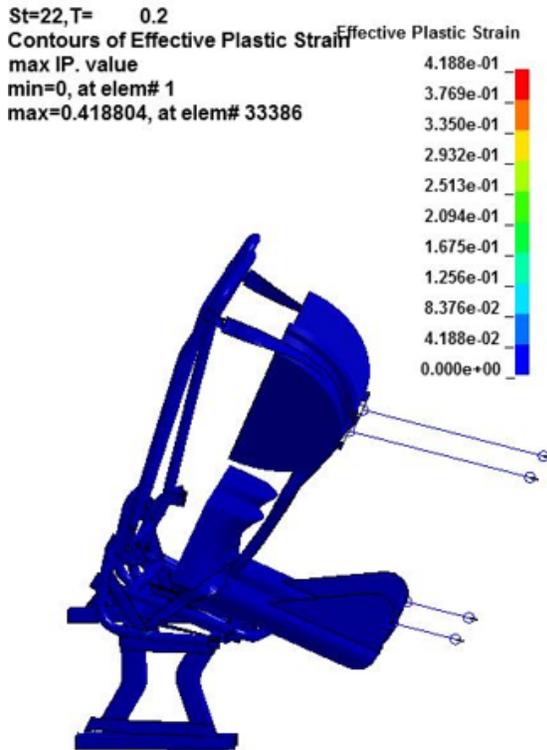


Figura 22. Deformaciones plásticas efectivas en la estructura. (Fuente: Autor)

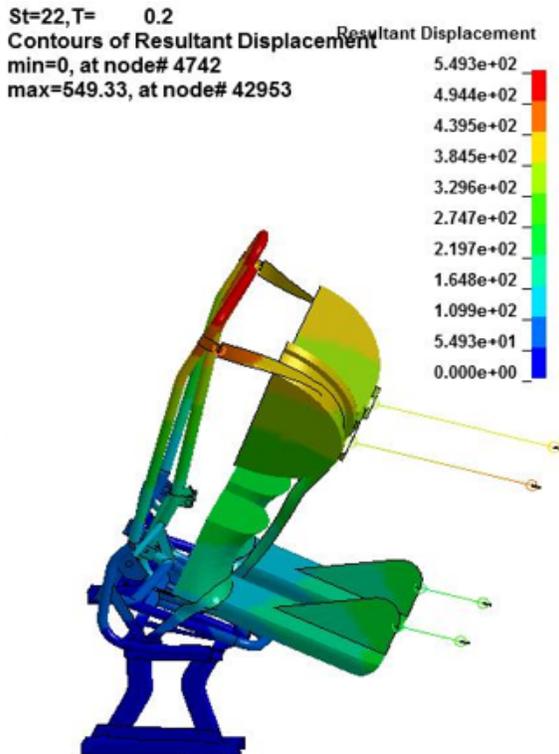


Figura 23. Desplazamientos totales en la estructura. (Fuente: Autor)

A diferencia de la estructura original, la estructura modificada presenta notables mejoras en su desempeño durante el ensayo de resistencia, en general se ha reducido la deformación plástica efectiva máxima de 0.674 a 0.41, es decir en un 40% encontrándose muy cerca de los límites máximos de los materiales, los cuales son 0.37 y 0.283 para los aceros ASTM A500 grado A y ASTM A36 respectivamente; por otra parte se ha reducido significativamente el desplazamiento total máximo de la estructura en la zona superior de los espaldares pasando de 1015.17 mm a 549.33 mm, lo que significa una reducción del 46%.

Debido a este comportamiento los anclajes para cinturones de seguridad son capaces de soportar las cargas aplicadas en forma satisfactoria ya que los esfuerzos producidos son menores al esfuerzo máximo del material ASTM A36 que es 511.980 MPa, además de que en la mayoría de ellos no se presentan deformaciones plásticas efectivas lo que significa que no se producen roturas.

A continuación se muestra la evaluación de resultados para cada uno de los anclajes:

Tabla 15. Evaluación de resultados en los anclajes para cinturones de seguridad

ANCLAJE	CRITERIO DE ACEPTACIÓN/ RECHAZO SEGÚN NUMERAL 7.1 R14 CEPE	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EFECTIVA MÁXIMA	EXCEDE EL ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE	RESISTE EL ENSAYO
Inferior izquierdo	No se deben producir roturas totales o parciales durante el tiempo de aplicación de la carga	539.274 MPa	0	No	Si
Inferior medio izquierdo		508.514 MPa	0.001	No	Si
Inferior medio derecho		495.6 MPa	0	No	Si
Inferior derecho		506.095 MPa	0	No	Si
Superior izquierdo		446.225 MPa	0	No	Si
Superior derecho		482.395 MPa	0	No	Si

(Fuente: Autor)

4. CONCLUSIONES

- Se han utilizado los parámetros de evaluación del Reglamento N°14 de la Comisión Económica para Europa, el cual es tomado como referencia en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2704 debido a que el reglamento tiene una mejor estructura que incluye parámetros de evaluación específicos para diferentes tipos de vehículos en base a su categoría.
- Los materiales utilizados en la construcción de estructuras de asientos de autobús interprovincial son aceros estructurales ASTM A36 y ASTM A 500 grado A.
- El acero ASTM A 36 utilizado por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. tiene un comportamiento elasto – plástico cuya resistencia máxima promedio es de 511.980 MPa.
- El acero ASTM A500 grado A utilizado por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. tiene un comportamiento elasto – plástico cuya resistencia máxima promedio es de 383.6425 MPa.
- Ninguno de los anclajes para cinturones de seguridad de dos puntos de la estructura original del asiento es capaz de soportar el ensayo de resistencia ya que se supera por mucho los esfuerzos máximos de resistencia de los materiales a pesar de que las deformaciones plásticas efectivas se encuentran dentro de valores aceptables, los resultados obtenidos en el análisis se resumen en la tabla 12.
- En la simulación de resistencia de anclajes para cinturones de tres puntos con la estructura original solo los anclajes superiores son capaces de soportar el ensayo, mientras que ninguno de los anclajes inferiores tuvo la resistencia suficiente porque se superan ampliamente los esfuerzos máximos de resistencia de los materiales aunque las deformaciones plásticas efectivas tienen valores bajos, los resultados obtenidos en el análisis se resumen en la tabla 14.
- La estructura original fabricada por MIVILTECH Soluciones Industriales S. A. no tiene una adecuada resistencia y se deforma excesivamente, teniendo deformaciones plásticas efectivas máximas de 0.616 y 0.674 en los análisis con cinturones de dos y tres puntos respectivamente, de la misma manera se tienen altos valores de desplazamientos totales máximos de 406.146 mm y 1015.17 mm lo cual compromete la resistencia de los elementos de la estructura y la seguridad de los ocupantes.
- Todos los anclajes de la estructura modificada para cinturones de dos y tres puntos fueron capaces de soportar el ensayo de resistencia en forma satisfactoria ya que los esfuerzos

máximos producidos son menores que los esfuerzos máximos del material, además de que en la mayoría de anclajes no se tienen deformaciones plásticas efectivas, sus resultados se resumen en las tablas 13 y 15.

- La estructura rediseñada ha tenido un mejor comportamiento en el ensayo de resistencia en comparación a la estructura original ya que en el caso del análisis con cinturones de dos puntos se ha reducido la deformación plástica efectiva máxima en un 40 % y en el caso de la deformación total máxima se ha tenido una reducción del 55 %; mientras que en el análisis con cinturones de tres puntos estos valores se han reducido en un 40 y 46 % respectivamente.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Organización Mundial de la Salud. “Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial” Suiza, 2013, pp. 2-10
- [2] Comisión Económica para Europa. “Reglamento N° 14. Prescripciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos en lo que concierne a los anclajes de los cinturones de seguridad, los sistemas de anclajes ISOFIX, los anclajes superiores ISOFIX y las plazas de asiento i-Size” 2015
- [3] Code of Federal Regulations. “Federal Motor Vehicle Safety Standards. Standard No. 210: Seat belt assembly anchorages” U.S. Government, 2008
- [4] Instituto Ecuatoriano de Normalización. “Norma Técnica NTE INEN 2704. Vehículos automotores. Anclajes del cinturón de seguridad para vehículos” Quito, Ecuador, 2013
- [5] Dirección General de Tráfico de España. “Cinturón de seguridad y sistemas de retención infantil” Ministerio del Interior, Gobierno de España, 2010
- [6] G. Sanabria. “Cinturones de seguridad” Internet: <http://45c75875i.blogspot.com/>, enero 9 de 2015. [Junio 10 de 2016]
- [7] L. Evans. *The Science of Traffic Safety*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1999, pp. 431
- [8] Instituto Ecuatoriano de Normalización. “Reglamento Técnico RTE INEN 043. Bus interprovincial e intraprovincial” Quito, Ecuador, 2010
- [9] Ecuabus. “Pesos de totales y de chasis de autobuses interprovinciales” Internet: <http://www.ecuabus.net/Chasis%20Bus.html>, 2010. [Septiembre 5 de septiembre de 2016]
- [10] Comisión Económica para Europa. “Reglamento N° 678. Categorías de vehículos para transporte de pasajeros” 2015
- [11] S. Basu, “Tensile Deformation of Fibers Used in Textile Industry” Agilent Technologies, 2012
- [12] M. Salim et al. “Importance of Federal Motor Vehicle Safety Standards 207/210 in Occupant Safety – A Case Study” en International Conference on Design and Manufacturing, 2013
- [13] K. Hughes et al. “Explicit dynamic formulation to demonstrate compliance against quasi-static aircraft seat certification loads (CS25.561) – Part II: Influence of body blocks” *Institution of mechanical Engineers Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 228, pp. 1890–1903, 2014
- [14] H. Donde et al. “Reduction in Time to Market of Automotive Seating System Using LS – DYNA” en 7th International LS – DYNA Users Conference, 2008

[15] R. Henniger, K. Hessenberger y H. Mullerschön. "Robustness Investigation of a Numerical Simulation of the ECE - R14 with particular regard to correlation analysis" en LS - DYNA Anwenderforum, Bamberg, Alemania, 2005

[16] U. Heo et al. "Effectiveness evaluation for seat parts by seat belt anchorage strength analysis" en International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, pp. 1031-1034

[17] C. Yuce et al. "A case study: Designing for sustainability and reliability in an automotive seat structure", *Sustainability*, Vol. 6, pp. 4608-4631. Julio 2014

[18] A. Vatambe "Simulation and validation of automotive seat using the Regulation FMVSS 207/210" en National Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology, 2015, pp. 385-392

[19] T. Makinalari "Crash Test for Seat Belt Anchorage", *Journal of Agricultural Machinery Science*, Vol. 7, pp. 137 – 143, 2011

[20] V. Patwardhan et al. "Simulation and Validation of FMVSS 207/210 Using LS Dyna" en 7th International LS – DYNA Users Conference, 2008