



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**OPTIMIZACIÓN POR MEDIO DE ANÁLISIS NUMÉRICO DE UN CASCO PARA
DEPORTE DE CONTACTO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN DISEÑO MECÁNICO

PRESENTA:
ING. ANTONIO RAFAEL CAUDILLO PÉREZ

DIRIGIDA POR:
DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA
DRA. BEATRIZ ROMERO ÁNGELES



ENERO 2015

Resumen

La protección de la cabeza frente a lesiones, en caso de impacto, ha motivado un desarrollo tecnológico por parte del ser humano que puede remontarse hasta la prehistoria. Los distintos diseños de cascos de protección que se han utilizado a lo largo de la historia, surgen de la necesidad en cada periodo y para una aplicación específica. Los humanos comenzaron a proteger su cabeza mediante cascos mucho antes de que los mecanismos de las lesiones fueran estudiados.

El presente trabajo de tesis se inicia con una descripción cronológica de los cascos usados como protección para la guerra hasta nuestros días, así como una breve descripción del origen del fútbol americano y los inicios de los cascos usados como protección.

Se muestra las bases teóricas como son el impulso y la cantidad de movimiento, éste trabajo se desea observar las cargas de impacto, o también llamadas cargas súbitas, de choque o impulsivas, desde el punto de vista de los impactos físicos, como el proceso involucrado en una colisión de uno o más objetos, para continuar con una descripción del comportamiento de los materiales frente a una carga súbita, para ellos se propone analizar la estructura externa de un casco como un cascaron.

Se realiza el modelado de un casco de uso comercial, mediante un programa CAD, exponiendo la metodología usada, se establecen las bases para un análisis numérico para ser sometido a una carga súbita, con el fin de obtener información del comportamiento de la estructura.

Continuando con el modelado de otro casco con una estructura segmentada, para ser sometido en igualdad de condiciones de análisis, con el fin de poder realizar un estudio comparativo de ambos objetos

Por último se realiza un comparativo de ambos estudios para realizar una evaluación de las ventajas y desventajas de ambos modelos.

Abstract

Protection of human head from injuries, as a result of an impact, has motivated a technological development that could be referenced from the beginning of humankind. The many designs of safety helmets which are being worn throughout history, have emerged from the necessities of each age and for a specific application. Human beings started to protect their heads by wearing a helmet so many time before the mechanisms of injuries were studied.

The current thesis is started with a chronological description of the helmets worn as protection during war until our age, as well as a brief description of the origins of football and the beginning of the use of helmets as protection.

Theoretical basis such as mechanical drive and the amount of motion are shown because in the current document is aimed to observe impact loads, also known as sudden loads, shocking loads or impulsive loads, from the perspective of physical impacts, just like in the collision of two or more objects, in order to continue with a description of the performance of materials subjected to a sudden load, for that, we propose an analysis of the external structure of a helmet like if it were an eggshell.

The modelling of an all-purpose helmet is developed by using a CAD software, explaining the methodology that established the basis for a numerical analysis of the helmet when it is subjected to a sudden load. This study is oriented to obtain information about the performance of the structure of the helmet.

Continuing with the modelling of other helmet with a segmented structure, to be subjected to analysis under the same conditions of the first one, in order to compare both of them.

Finally, comparing both studies, an evaluation of the advantages and disadvantages of both helmets will be done.

Índice General	Pag.
Resumen	i
Abstract	ii
Índice general	iii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xvii
Simbología	xix
Objetivo	xxii
Justificación	xxiii
Capítulo I.- Estado del arte	1
I.1.- Generalidades	2
I.2.- Antecedentes Históricos	3
I.2.1.- Cascos en la edad antigua	3
I.2.1.1.- Casco Sumerio-Acadio	4
I.2.1.2.- Casco Micénico	5
I.2.1.3.- El casco Kegel	5
I.2.1.4.- Casco Frigio	6
I.2.1.5.- Casco Beocio	7
I.2.1.6.- Casco Ilirio	7
I.2.1.7.- Casco Corintio	8
I.3.- Cascos del Siglo I hasta el Medievo	8
I.3.1.- Casco Montefortino	9
I.3.2.- Casco de legionario romano	9
I.3.3.- Casco Itálico	10
I.3.4.- Casco Spangenhelm	10
I.3.5.- Yelmo	11
I.3.6.- Morrion	12

I.4.- Cascos en la época contemporánea	12
I.5.- Historia del Futbol Americano	15
I.5.1.- Cascos de protección en el Futbol Americano	15
1.6.- Biomecánica de impacto	17
I.7.- Planteamiento del problema	19
I.8.- Sumario	19
I.9.- Referencias	20
Capítulo II.- Fundamentos Teóricos	24
II.1.- Principio del impulso y cantidad de movimiento	25
II.2.- Impacto	26
II.3.- Comportamiento elástico y elasto-plástico de los materiales	29
II.3.1.- Cascarones	30
II.3.2.- Clasificación de superficies de cascarón	31
II.3.3.- Comportamiento estático-plástico de cascarones	33
II.4.- Flujo de cedencia	36
II.4.1.- Teorema del límite inferior	38
II.4.2.- Teorema del límite superior	39
II.4.3.- Cargas dinámicas	39
II.5.- Cascarón esférico elástico, perfectamente plástico, sujeto a una presión dinámica esférica	41
II.5.1.- Ecuaciones utilizadas	41
II.5.2.- Respuesta elástica	42
II.5.2.1.- Primer etapa de movimiento cuando $0 \leq t \leq t$	42
II.5.2.2.- Segunda etapa de movimiento cuando $t \leq t \leq T$	44
II.5.2.3.- Tercera etapa de movimiento cuando $t \geq T$	44
II.5.2.4.- Análisis del estado de energía	45
II.5.2.5.- Carga impulsiva	46

II.5.3.- Respuesta elástica, perfectamente plástica	46
II.5.3.1.- Primer etapa de movimiento $0 \leq t \leq t_1$	47
II.5.3.2.- Segunda etapa de movimiento $t_1 \leq t \leq t_2$	47
II.5.3.3.- Tercer etapa de movimiento $t_2 \leq t \leq T_1$	47
II.5.3.4.- Cuarta etapa de movimiento $t \geq T_1$	48
II.5.3.5.- Análisis del estado de energía	50
II.5.3.6.- Carga impulsiva	51
II.6.- Sumario	53
II.7.- Referencias	54
Capítulo III.- Análisis del casco actual	56
III.1.- Generalidades	57
III.2.- Introducción al Método del Elemento Finito	58
III.2.1.- Introducción al Método del Elemento Finito	58
III.2.2.- Generalidades del método	59
III.2.3.- Procedimiento de análisis por el método de elemento finito	61
III.2.5.- Fase de solución	61
III.2.4.- Fase de Pre-procesamiento	61
III.2.6.- Fase de post-procesamiento	62
III.2.7.- Aplicaciones del Método de Elemento Finito	62
III.2.8.- Ventajas y limitaciones del MEF	62
III.2.6.- Fase de post-procesamiento	63
III.3.- Modelado de casco	64
III.4.- Particularidades del estudio	68
III.4.1.- Obtención de resultados	70
III.5.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal	71
III.5.1.- Desplazamiento total D	71
III.5.2.- Esfuerzo von Mises (σ)	73

III.5.3.- Esfuerzo cortante (τ)	75
III.5.4.- Deformación plástica (D_p).	77
III.5.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{\text{máx}}$)	79
III.6.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal oblicuo	81
III.6.1.- Desplazamiento total D	81
III.6.2.- Esfuerzo von Mises (σ)	83
III.6.3.- Esfuerzo cortante (τ)	85
III.6.4.- Deformación plástica (D_p).	87
III.6.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{\text{máx}}$)	89
III.7.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto lateral	91
III.7.1- Desplazamiento total D	92
III.7.2.- Esfuerzo von Mises (σ)	94
III.7.3.- Esfuerzo cortante (τ)	96
III.7.4.- Deformación plástica (D_p)	98
III.7.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{\text{máx}}$)	100
III.8.- Sumario	102
III.9.- Referencias	102
Capítulo IV.- Análisis del casco propuesto	104
IV.1.- Generalidades	105
IV.2.- Modelado del casco propuesto	105
IV.3.- Particularidades del estudio	109
IV.3.1.- Obtención de resultados	111
IV.4.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal	112
IV.4.1.- Desplazamiento total D	112
IV.4.2.- Esfuerzo von Mises (σ)	114
IV.4.3.- Esfuerzo cortante (τ)	116

IV.4.4.- Deformación plástica (D_p)	118
IV.4.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{\text{máx.}}$)	120
IV.5.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal oblicuo	122
IV.5.1.- Desplazamiento total D	122
IV.5.2.- Esfuerzo von Mises (σ)	124
IV.5.3.- Esfuerzo cortante (τ)	126
IV.5.4.- Deformación plástica (D_p)	128
IV.5.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{\text{máx.}}$)	130
IV.6.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto lateral	132
IV.6.1.- Desplazamiento total D	132
IV.6.2.- Esfuerzo von Mises (σ)	134
IV.6.3.- Esfuerzo cortante (τ)	136
IV.6.4.- Deformación plástica (D_p)	138
IV.6.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\sigma_{\text{máx.}}$)	140
IV.7.- Sumario	142
Capítulo V.- Comparación de resultados	143
V.1.- Generalidades	144
V.2.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal	144
V.2.1.- Desplazamiento total D	145
V.2.2.- Esfuerzo von Mises (σ)	146
V.2.3.- Esfuerzo cortante (τ)	148
V.2.4.- Deformación plástica (D_p)	148
V.2.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{\text{máx.}}$)	151
V.3.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal oblicuo	152
V.3.1.- Desplazamiento total D	152
V.3.2.- Esfuerzo von Mises (σ)	154

V.3.3.- Esfuerzo cortante (τ)	155
V.3.4.- Deformación plástica (D_p)	157
V.3.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{\text{máx.}}$)	158
V.4.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto lateral	160
V.4.1.- Desplazamiento total D	160
V.4.2.- Esfuerzo von Mises (σ)	162
V.4.3.- Esfuerzo cortante (τ)	163
V.4.4.- Deformación plástica (D_p)	165
V.4.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{\text{máx.}}$)	166
V.5.- Sumario	168
Conclusiones	169
Recomendaciones para trabajos futuros	174

Índice de Figuras	Pag.
 Capítulo I	
I.1.- Escultura de <i>Plinio El Viejo</i>	2
I.2.- Estela de los buitres	4
I.3.- Casco hallado en la tumba de <i>Meskalamdug</i>	4
I.4.- Casco micénico	5
I.5.- Casco Kegel	6
I.6.- Casco Frigio	6
I.7.- Caballero tesalio con casco Beocio	7
I.8.- Casco Ilirio. a) Hacia el 650 a. C. b) Hacia el 600 a. C.	7
I.9.- Casco Corintio. a) Pericles con casco Corintio. b) Vista general de casco Corintio	9
I.10.- Casco Montefortino	9
I.11.- Cascos Romanos. a) Casco Legionario. b) Casco Coolus	10
I.12.- Casco Itálico –Imperial	10
I.13.- Spangenhelm	11
I.14.- Yelmo cruzado	11
I.15.- Morrion Español	12
I.16.- Casco Adrian	13
I.17.- Casco Brodie	13
I.18.- Stahlhelm del año de 1916	14
I.19.- Cascos modernos. a) Modelo M19345. b) Modelo M1.	14
I.20.- Primer casco utilizado en un juego de Futbol Americano	16
I.21.- Cascos de Futbol Americano a) Cuero duro 1917. B) década de los 70's, c) Actual.	17
 Capítulo II	
II.1.- Niveles de cargas a impacto producidas por la liberación de masa m	27
II.2.- Diagrama esfuerzo-deformación	30

II.3.- Cascarón	30
II.4.- Intersección de los planos con la superficie	31
II.5.- Tipos de curvatura <i>Gaussiana</i>	32
II.6.- Cascaron por revolución	32
II.7.- Superficies de translación	33
a) Longitud de la curva guía. b) Longitud de la curva que forma el cascaron.	
II.8.- Idealización de materiales, <i>Rígido – Perfectamente Plástico y Elástico – Perfectamente Plástico</i>	34
II.9.- Esfuerzos en un cuerpo tridimensional	35
II.10.- Esfuerzos generalizados que actúan en un caparazón de pared delgada	35
II.11.- Curva característica para una viga de sección transversal rectangular	37
II.12.- Curvaturas. a) Curva convexa con regla normalizada. b) Curva no convexa de superficie de cedencia.	38
II.13.- Segmento de un cascarón esférico	42
 Capítulo III	
III.1.- Descripción de elementos. a) Línea. b) Área. c) Volumen.	60
III.2.- Casco <i>Schutt Advantage</i> [®]	64
III.3.- Carcasa	65
III.4.- Bosquejo y medidas de la carcasa	65
III.5a.- contorno lateral del casco	66
III.5b.- vista frontal del casco	66
III.6.- Contornos montados	67
III.7a.- Se genera el contorno lateral como una chapa	67
III.7b.- cascarón terminado, sin espesor	68
III.8.- Casco terminado	68
III.9.- Asignación del material a la geometría	69
III.10.- Condiciones para el impacto frontal	70
III.11.- Asignación de los soportes del modelo	70

III.12.- Valores del desplazamiento total, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	72
III.13.- Ejemplificación gráfica del desplazamiento en los intervalos de tiempo a) 0.00005 s, 0.00047 m. b) 0.00035 s, 0.0036 m. c) 0.0060 s, 0.0064 m. d) 0.001s, 0.010 m.	72
III.14.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.	74
III.15.- Ejemplificación gráfica de los valores del esfuerzo equivalente. a) 0.00005s, máx. 26.10 MPa, b) 0.00035s, máx. 19.05 MPa. c) 0.00060s, máx. 27.56 MPa. d) 0.001s, min 0.00004 MPa, máx. 38.77 MPa.	74
III.16.- Valores para el esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.	76
III.17.- Ejemplificación gráfica de los esfuerzos cortantes máximos y mínimos. a) -3.646 MPa, 4.068 MPa, al principio del impacto. b) -8.110 MPa, 5.053 MPa, c) -7.873 MPa, 6.449 MPa y d) -12.166 MPa, 6.854 MPa al final del impacto.	76
III.18.- Valores para la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	78
III.19.- Ejemplificación gráfica de los valores de la deformación plástica	78
III.20.- Valores para el esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	80
III.21.- Ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo. a) Inicio del impacto. b) En el tiempo 0.00035 s, c) En el tiempo 0.00060 s. d) Punto máximo en el tiempo 0.00095 s.	80
III.22.- Golpe frontal oblicuo	81
III.23.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	82
III.24.- ejemplificación gráfica del desplazamiento en los intervalos de tiempo. a) 0.00005 s, 0.00075 m. b) 0.00035 s, 0.0037 m. c) 0.0060 s, 0.0067 m. d) 0.001 s, 0.0112 m	83
III.25.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	84
III.26.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo von Mises en Mega Pascales (MPa), teniendo un valor mínimo y máximo de; a) 0 y 18.29 MPa, b) 0 y 15.98 MPa, c) 0 y 29.36 MPa y d) 0 y 50.22 MPa.	85
III.27.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	86
III.28.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante en mega Pascales (MPa), teniendo un valor mínimo y máximo de; a) -4.31 MPa, 5.72 MPa, b) -4.51 MPa, 5.42 MPa, c) -8.07 MPa, 6.34 MPa y d) -8.59 MPa, 7.83 MPa.	87
III.29.- Valores del deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	88
III.30.- Valores y ejemplificación gráfica de la deformación plástica en el intervalo de	89

tiempo 0 a 0.001 s.

III.31.- Valores del esfuerzo máximo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	90
III.32.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo cortante en mega Pascales (MPa), teniendo un valor máximo de; a) 19.16 MPa, b) 17.14 MPa, c) 32.17 MPa y d) 53.78 MPa.	91
III.33.- Impacto lateral	92
III.34.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	93
III.35.- Valores y ejemplificación gráfica del desplazamiento en metros (m), teniendo valores máximos en los puntos a) 0.0004 m, b) 0.0036 m c) 0.0059 m y d) 0.0096 m.	93
III.36.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.	95
III.37.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo von Mises en mega Pascales (MPa), teniendo un valor mínimo y máximo de; a) 0 y 3.70 MPa, b) 0 MPa y 27.63 MPa, c) - 0.000017 MPa y 40.51 MPa y d) 0.000037 MPa y 46.77 MPa	95
III.38.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	97
III.39.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante en mega Pascales (MPa), teniendo un valor máximo de; a) 1.542 MPa, b) 5.042 MPa, c) 7.175 MPa y d) 9.016 MPa.	97
III.40.- Valores de la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	99
III.41.- Valores y ejemplificación gráfica de la deformación plástica	99
III.42.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.	101
III.43.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo cortante en mega Pascales (MPa), teniendo un valor máximo de; a) 2.091 MPa, b) 14.382 MPa, c) 20.952 MPa y d) 24.921 MPa	101
Capítulo IV	
IV.1.- Casco completo <i>Schutt Advantage</i> [®]	105
IV.2.- Plano y selección para cortar	106
IV.3.- Sección lateral del casco a utilizar	106
IV.4.- Partes seccionadas. a) Parte trasera del casco. b) Parte frontal del casco	107

IV.5.- Nuevo ensamble propuesto	107
IV.6.- Ensamble de las piezas centrales del casco	108
IV.7.- Ensamble de las partes laterales	108
IV.8.- Ensamble de casco terminado	109
IV.9.- Asignación de variables	110
IV.10.- Condiciones para el impacto frontal	111
IV.11.- Asignación de los soportes del estudio	111
IV.12.- Valores para el desplazamiento total en el intervalo de 0 a 0.001 s	113
IV.13.- Valores y ejemplificación gráfica del desplazamiento total en metros (m), Desplazamiento máximo. a) 0.00049 m. b) 0.000410 m. c) 0.0067 m. d) 0.0116 m.	113
IV.14.- Valores para el esfuerzo von Mises en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	115
IV.15.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo von Mises (MPa), Esfuerzo máximo. a) 10.76 MPa. b) 24.77 MPa. c) 31.588 MPa. d) 9.593 MPa.	115
IV.16.- Valores para el esfuerzo cortante en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	117
IV.17.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante (MPa), Esfuerzo máximo. a) 4.739 MPa. b) 11.304 MPa. c) 3.836 MPa. d) 2.568 MPa.	117
IV.18.- Valores para el equivalente plástico en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	119
IV.19.- Valores y ejemplificación gráfica de la deformación plástica en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	119
IV.20.- Valores para el esfuerzo cortante máximo en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	121
IV.21.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo (MPa), Esfuerzo máximo. a) 5.9255 MPa. b) 14.209 MPa. c) 16.432 MPa. d) 5.343 MPa.	121
IV.22.- Valores del desplazamiento total, en el intervalo de 0 a 0.001 s	123
IV.23.- Valores y ejemplificación gráfica del desplazamiento total en metros (m), Desplazamiento máximo. a) 0.00047 m. b) 0.0036 m. c) 0.0065. d) 0.011 m.	123
IV.24.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de 0 a 0.001 s	125
IV.25.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo von Mises (MPa), valor máximo. a) 12.36 MPa., b) 19.41 MPa., c) 30.01 MPa. d) 37.01 MPa	125
IV.26.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de 0 a 0.001 s	127
IV.27.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante (MPa), Valores máximos. a) 0.657 MPa. b) 3.585 MPa. c) 7.678 MPa. d) 5.191 MPa.	127
IV.28.- Valores del equivalente plástico, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	129

IV.29.- Valores y ejemplificación gráfica de la deformación plástica.	129
IV.30.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	131
IV.31.- Valores y ejemplificación del esfuerzo cortante máximo a) 6.259 MPa, b) 10.442 MPa, c) 15.717 y d) 18.852 MPa.	131
IV.32.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	133
IV.33.- Valores y ejemplificación gráfica del desplazamiento en metros (m), Desplazamiento máximo. a) 0.00059 m. b) 0.0041 m. c) 0.0064 m. d) 0.010 m.	133
IV.32.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	135
IV.35.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo von Mises (MPa), valor máximo. a) 9.019 MPa. b) 14.52 MPa. c) 20.943 MPa. d) 24.094 MPa.	135
IV.36.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	137
IV.37.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante (MPa), Valor máximo. a) 0.791 MPa. b) 5.835 MPa. c) 7.299 MPa. d) 7.937 MPa.	137
IV.38.- Valores del equivalente plástico, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	139
IV.39.- Valores y ejemplificación gráfica del equivalente plástico en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.	139
IV.40.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	141
IV.41.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo cortante (MPa), Valor máximo. a) 4.524 MPa. b) 7.739 MPa. c) 11.44 MPa. d) 13.545 MPa.	141

Capítulo V

V.1.- Cascos sometidos a impacto en las mismas condiciones	143
V.2.- Valores para el desplazamiento total en el intervalo de 0 a 0.001 s, para ambos casos de estudio	144
V.3.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del desplazamiento en metros (m), a) casco completo, b) casco segmentado	145
V.4.- Valores del esfuerzo equivalente en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	145
V.5.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo equivalente en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado	146
V.6.- Valores del esfuerzo cortante en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	147
V.7.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado.	147

V.8.- Valores del equivalente plástico en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	148
V.9.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del equivalente plástico en m/m, a) casco completo, b) casco segmentado.	149
V.10.- Valores del esfuerzo cortante máximo en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	149
V.11.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante máximo en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado.	150
V.12.- Valores para el desplazamiento total en el intervalo de 0 a 0.001 s, para ambos casos de estudio	154
V.13.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del desplazamiento en metros (m), a) casco completo, b) casco segmentado.	152
V.14.- Valores del esfuerzo equivalente en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	152
V.15.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo equivalente en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado.	153
V.16.- Valores del esfuerzo cortante en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	154
V.17.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado.	154
V.18.- Valores del equivalente plástico en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	155
V.19.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del equivalente plástico en m/m, a) casco completo, b) casco segmentado.	156
V.20.- Valores del esfuerzo cortante máximo en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	156
V.21.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos esfuerzo cortante máximo en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado	157
V.22.- Valores para el desplazamiento total en el intervalo de 0 a 0.001 s, para ambos casos de estudio	158
V.23.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del desplazamiento en metros (m), a) casco completo, b) casco segmentado.	158
V.24.- Valores del esfuerzo equivalente en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	159
V.25.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo equivalente en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado	160

V.26.- Valores del esfuerzo cortante en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	161
V.27.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado	161
V.28.- Valores del equivalente plástico en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	162
V.29.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del equivalente plástico en m/m, a) casco completo, b) casco segmentado.	163
V.30.- Valores del esfuerzo cortante máximo en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s	
V.31.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante máximo en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado.	

Índice de tablas	Pag.
Capítulo II	
II.1.- Determinación de cargas	29
Capítulo III	
III.1.- Valores para el desplazamiento total, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	71
III.2.- Valores del esfuerzo equivalente, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	73
III.3.- Valores para el esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	75
III.4.- Valores para el equivalente plástico, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	77
III.5.- Valores para el esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	79
III.6.- Valores del desplazamiento total, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	82
III.7.- Valores del esfuerzo equivalente, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	84
III.8.- Valores para el esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	86
III.9.- Valores para el equivalente plástico, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	88
III.10.- Valores para el esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	90
III.11.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	92
III.12.- Valores del esfuerzo equivalente, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	94
III.13.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	96
III.14.- Valores del equivalente plástico, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	98
III.15.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	100
Capítulo IV	
IV.1.- Valores del desplazamiento total, en el intervalo de 0 a 0.001 s	112
IV.2.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	114
IV.3.- Valores para el esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	116
IV.4.- Valores para la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	118
IV.5.- Valores para el esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	120

IV.6.- Valores del desplazamiento total, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	122
IV.7.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	124
IV.8.- Valores para el esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	126
IV.9.- Valores para la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	128
IV.10.- Valores para el esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	130
IV.11.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	132
IV.12.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	134
IV.13.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	136
IV.14.- Valores de la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	138
IV.15.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s	140

Capítulo V

V.1.- Valores máximos y mínimos del comparativo del desplazamiento total	145
V.2.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo equivalente	146
V.3.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante	148
V.4.- Valores máximos y mínimos del comparativo de la deformación plástica	149
V.5.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante máximo	151
V.6.- Valores máximos y mínimos del comparativo del desplazamiento total	153
V.7.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo equivalente	155
V.8.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante	156
V.9.- Valores máximos y mínimos del comparativo del equivalente plástico	158
V.10.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante máximo	159
V.11.- Valores máximos y mínimos del comparativo del desplazamiento total	161
V.12.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo equivalente	163
V.13.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante	164
V.14.- Valores máximos y mínimos del comparativo del equivalente plástico	166
V.15.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante máximo	167

Simbología

<i>RAE</i>	Real Academia de la Lengua Española
<i>p</i>	Cantidad de movimiento
<i>m</i>	Masa
<i>v</i>	Velocidad
<i>I</i>	Impulso
<i>F</i>	Fuerza
<i>t</i>	Tiempo
<i>a</i>	Aceleración
<i>k</i>	Resorte
<i>c</i>	Amortiguador
<i>g</i>	Gravedad
φ	Periodo natural de vibración
π	Número pi
σ	Esfuerzo
ε	Deformación
<i>E</i>	Modulo de Young
σ_{yd}	Esfuerzo de cedencia
σ_u	Esfuerzo último
ε_e	Deformación elástica
ε_p	Deformación plástica
σ_z	Esfuerzo en dirección z normal a la superficie media
<i>Kg</i>	Curva Gaussiana de superficie
<i>K₁</i>	Curva principal 1
<i>K₂</i>	Curva principal 2
ϕ	Ángulo conformado entre el eje de la cáscara y la normal
θ	Ángulo comprendido entre r y cualquier línea de referencia

R_ϕ	Radio de curvatura del meridiano
R_θ	Longitud de la normal entre cualquier punto de la superficie media y el eje de rotación
R	Radio de curvatura del paralelo.
M_x	Momento generalizado eje x positivo
M_{yx}	Momento generalizado eje x negativo
M_y	Momento generalizado eje y positivo
O_y	Esfuerzo generalizado eje y
O_{xy}	Esfuerzo cortante generalizado eje y
O_x	Esfuerzo generalizado eje x
O_{yx}	Esfuerzo cortante lateral generalizado eje y
G_y	Esfuerzo cortante generalizado eje y
G_x	<i>Esfuerzo cortante transversal generalizado eje x</i>
B	<i>Espesor</i>
ϵ_x	Deformación normal eje x
ϵ_y	Deformación normal eje y
ϵ_{xy}	Deformación cortante eje y
ϵ_{yx}	Deformación cortante eje x
δ_x	Deformación momento positivo eje x
δ_y	Deformación momento positivo eje y
δ_{xy}	Deformación momento negativo eje x
δ_{yx}	Deformación momento negativo eje y
ψ_x	Deformación lateral cortante eje y
ψ_y	Deformación transversal cortante eje x
M	Momento
M_0	Momento máximo
M_y	Momento de cedencia
$\dot{\Lambda}$	Razón de energía de disipación

δ_1	Deformación generalizada
δ_2	Deformación generalizada
\dot{v}	Velocidad transversal
P_c	Presión distribuida
P_0	Pulso de presión
P	Presión
L	Longitud de una viga
T	Tiempo de duración de la respuesta
T	Tiempo total
t	Tiempo del pulso depresión
O_θ	Reacciones de fuerza en la membrana de un cascaron
O_ϕ	Reacciones de fuerza en la membrana
O_φ	Reacciones de fuerza en la membrana
v	Desplazamiento radial
R	Reacción del desplazamiento radial
ε_θ	Deformaciones biaxiales en una membrana
ε_ϕ	Deformaciones biaxiales en la membrana
V_m	Desplazamiento máximo radial
C_I	Energía cinética
U_I	Energía total debido a la deformación elástica
E_T	Energía total
W_0	Impulso de velocidad inicial radial hacia el exterior
α	Radio adimensional entre energía elástica y total
β	Rango entre energía plástica absorbida y total de la energía externa
D	Desplazamiento total
σ	Esfuerzo von Mises
m	Metros

<i>Pa</i>	Pascales
<i>s</i>	Segundos
τ	Esfuerzo cortante
<i>Dp</i>	Deformación plástica
τ_{max}	Esfuerzo cortante máximo
<i>MPa</i>	Mega pascales

Objetivo

Optimizar un casco para deporte de contacto, con la finalidad disminuir los esfuerzos y deformaciones que se generan por el impacto producto del desarrollo de la misma actividad deportiva. El trabajo de tesis tendrá como principal objetivo analizar el comportamiento de dos cascos en condiciones controladas sometidos a una carga de impacto en igualdad de condiciones, con la finalidad de obtener los puntos críticos para poder realizar un comparativo entre ambos modelos.

Objetivos particulares

Para alcanzar el objetivo general, es conveniente analizar los siguientes puntos:

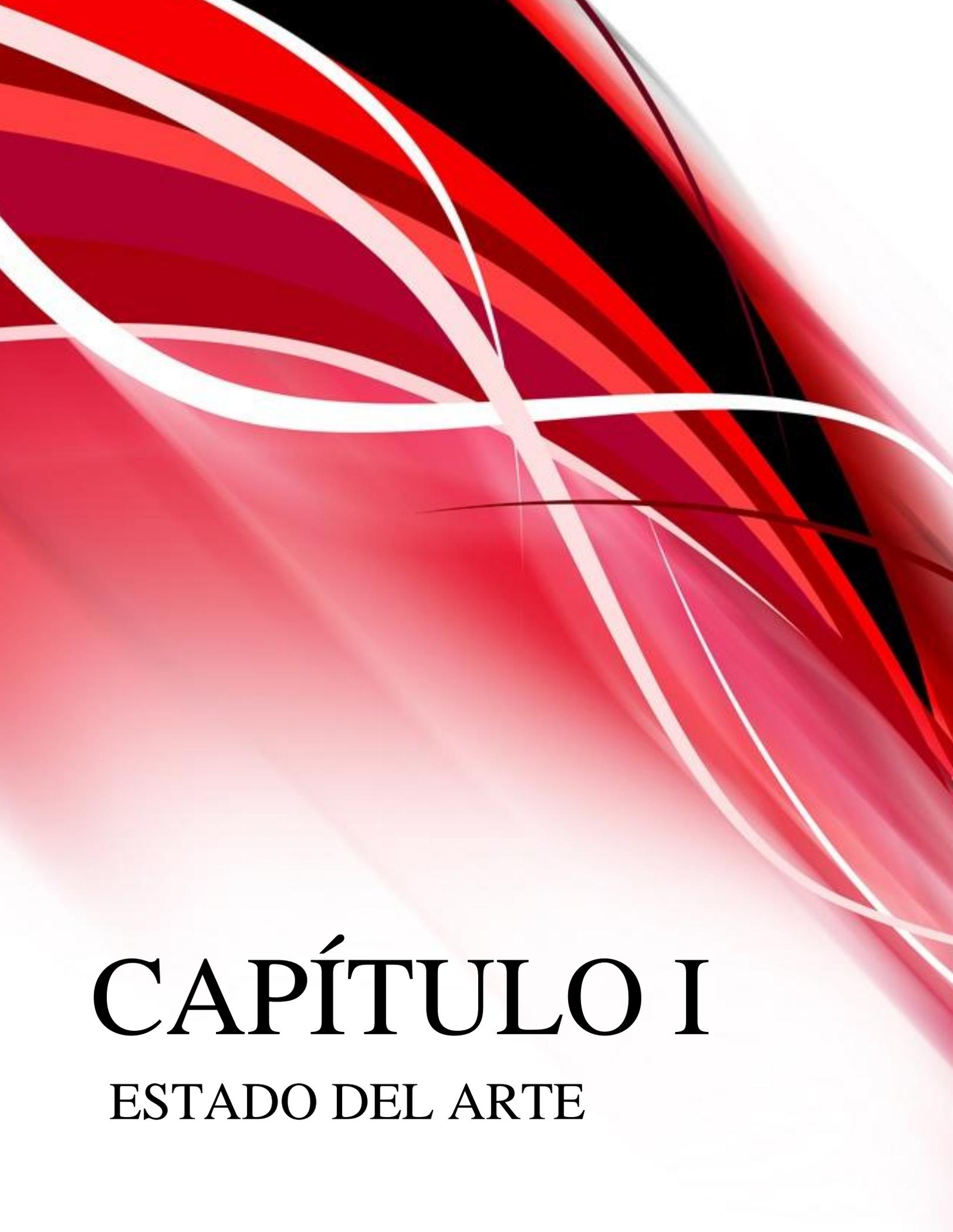
- Conocer las bases teóricas sobre impacto
- Diseñar un tipo de casco que presente un mejor comportamiento al ser sometido a cargas de impacto
- Desarrollar el análisis numérico, esto es con el fin de la ubicación de las zonas críticas.

Justificación

Actualmente la lesión más preocupante en el fútbol americano, es la conmoción cerebral, en las ligas profesionales se han implementado protocolos en cuanto a las lesiones de éste tipo, si bien a primera vista no resultan tan impactante como la ruptura de ligamentos o la fractura, ésta lesión con el paso del tiempo puede causar problemas mucho más graves.

Los fabricantes de cascos se han preocupado por minimizar al máximo las conmociones cerebrales, utilizando diferentes tipos de material en la parte interna del mismo para que la fuerza del impacto se reduzca, por su parte la carcasa (parte externa) ha sufrido ligeros cambios en cuanto a forma conservando la particularidad de ser de una sola pieza. Por esa razón es conveniente la búsqueda de geometrías para mejorar la protección del jugador.

En este trabajo es propuesto el diseño de un casco segmentado, el cual se prevé que tenga una mejor respuesta al ser sometido a un impacto, para ello se hace uso de las herramientas computacionales y del método del Elemento Finito, con el fin de poder medir las zonas críticas en condiciones de impacto y con ello poder implementar mejoras en la protección del jugador y con ellos salvaguardar su integridad física.

The background features a dynamic, abstract composition of flowing, overlapping lines in various shades of red, from deep maroon to bright white. The lines curve and sweep across the frame, creating a sense of movement and depth. The overall effect is modern and artistic.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

I.1.- Generalidades

En un principio, el instinto de conservación ha sido la plataforma de defensa para el desarrollo de la protección del cuerpo. Inicialmente, el vestido para proteger al individuo de las condiciones climáticas. Posteriormente, al presentarse los conflictos bélicos surgen las protecciones estructurales (armaduras y/o cascos) para proteger órganos vitales. Durante la historia han surgido necesidades específicas, las cuales han desarrollado una protección especializada. Por ejemplo; *Plinio El Viejo* en el *Siglo I* (Figura I.1), describe enfermedades pulmonares y envenenamiento por Azufre y Zinc en los trabajadores de una mina y diseña una mascarilla fabricada con vejigas de animales [I.1].

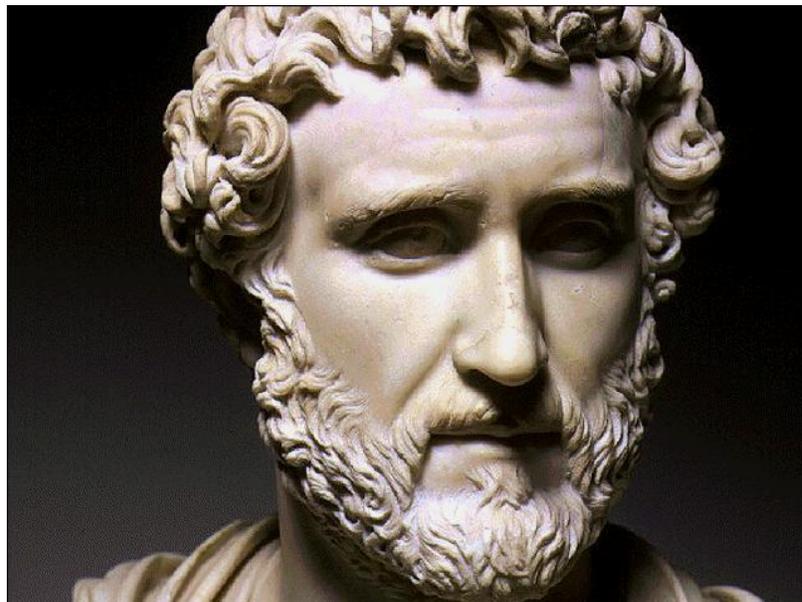


Figura I.1.- Escultura de *Plinio El Viejo*

El trabajo que en esta tesis se presenta, se enfoca en la protección de la cabeza. Por lo anterior y para seguir con el propósito del trabajo propuesto, se debe establecer la siguiente definición; cabeza (del latín *capitia*), es la parte superior del cuerpo del ser humano. En ella se ubican varios de los órganos muy importantes de los sentidos y de los centros nerviosos [I.2].

En la cabeza se encuentra contenido el cerebro y diversos órganos sensoriales (vinculados a la visión, el olfato, la audición y el gusto) [I.3]. En sus trabajos de anatomía *Leonardo Da Vinci*, menciona; *el carácter sedimentado, peculiar o estratificado, del sistema de contacto formado por el hueso del cráneo y por todo lo que contiene – la masa del cerebro, desde luego, pero también*

los tejidos, membranas, humores o músculos que envuelven, protegen, sirven de interfases o de aislantes [I.4].

Teniendo claro la descripción de la cabeza es posible establecer el significado de casco, según la *Real Academia de la Lengua Española*, es; *cobertura de metal o de otra materia, que se usa para proteger la cabeza de heridas, contusiones, etc.* [I.5]. Si bien en un principio éste fue uso exclusivo de los guerreros/soldados, fue en los deportes donde encontró un nuevo campo de acción. Así como, se entiende como deporte a la actividad física individual o colectiva que se practica de forma competitiva [I.6]. La práctica de éste es una parte importante en la vida, sea de forma profesional o recreativa, pero se busca que estas actividades se realicen con la mayor seguridad posible. Si bien existe el riesgo de lesión en todos los deportes, son los deportes de contacto, en donde existe el mayor riesgo de tener una conmoción cerebral ocasionado por un golpe. Es por esto la importancia del uso de un casco protector. A su vez también es importante entender el significado de la palabra impacto, la cual proviene del latín *impactus*, en el diccionario de la *Real Academia de la Lengua Española*, se define como; *choque de un proyectil o de otro objeto contra algo, efecto de una fuerza aplicada bruscamente* [I.7].

I.2.- Antecedentes históricos

La protección de la cabeza frente a lesiones, en caso de impacto, ha motivado un desarrollo tecnológico por parte del ser humano que puede remontarse hasta la prehistoria. Los distintos diseños de cascos de protección que se han utilizado a lo largo de la historia, surgen de la necesidad en cada periodo y para una aplicación específica. Los humanos comenzaron a proteger su cabeza mediante cascos mucho antes de que los mecanismos de las lesiones fueran estudiados. Enseguida se presenta una pequeña relación de los antecedentes históricos más relevantes.

I.2.1.- Cascos en la *Edad Antigua*

Los ejércitos más antiguos documentados, son ubicados en Mesopotamia a mediados del *Siglo XXX a. C.* Una de las representaciones más antiguas es la llamada *Estela de los Buitres* (Figura I.2). Es una representación de la guerra entre las ciudades de *Lagash* y *Humma* en el año 2525 a. C. Se muestra una falange en donde la primera línea tiene escudos cuadrangulares y lanzas largas con punta de metal. Los cascos son probablemente de cuero [I.8].



Figura I.2.- Estela de los buitres

Los cascos son uno de los implementos de protección personal más antiguos, se sabe que han sido utilizados por los acadios/sumerios en el *Siglo XXIII* a. C., los griegos micénicos desde el *Siglo XVII* a. C, los asirios alrededor del año 900 a. C, los antiguos griegos y romanos, en todo el oriente hasta el final del *Siglo XVII* [I.8].

I.2.1.1.- Casco Sumerio-Acadio

Fueron los Acadios (*Siglo XXXIII* a.C.) a quienes se les atribuye el uso de cascos de metal alrededor del *Siglo XX* a. C. [I.9]. Aunque este fuera más del tipo ornamental (Figura I.3).



Figura I.3.- Casco hallado en la tumba de *Meskalamdug*, fabricado oro, 2400 a. C.

I.2.1.2.- Casco Micénico

Inicialmente se construye a partir de cuero combinando diferentes materiales. En la *Iliada*, Homero narra lo siguiente; *En cuanto a Ulises, Meriones le proporciono un arco, carcaj y espada y le cubrió la cabeza con un casco de piel, que por dentro se sujetaba con fuertes correas y por fuera presentaba los blancos dientes de un jabalí* [I.10]. Lo que menciona Homero bien pudiera interpretarse como fabula, pero en realidad se refería al casco micénico, el cual fue usado en el año 1400 a. C. Este tipo de armaduras y casco (Figura I.4) se empleaba en la cultura Micénica en el *Siglo XIII*.



Figura I.4.- Casco micénico

Es en la Grecia *Arcaica* a finales del *Siglo VII* donde surgen los Hoplitas y con ello los ejércitos en forma. En la llamada *Panoplia de Argos* se encuentra el armamento básico Hoplita [I.11].

I.2.1.3.- El casco Kegel

El casco Kegel era básicamente cónico, el cual tenía la cara descubierta. Estaba fabricado en 5 piezas [I.12] y fue precursor de los cascos Griegos en el *Siglo VII* a. C. Está fabricado en bronce, tiene grandes orejeras, la parte superior es cónica (de ahí su nombre kegel, es cono en Alemán) y esta coronado con una cresta (la cual desaparecería en los Siglos siguientes) (Figura I.5). A partir

de éste tipo de casco surgen muchas variantes en el *Siglo V* y *Siglo VI*, destacando, el casco Ilirio, el Frigio, el Corintio y en menor medida en Beocio.



Figura I.5.- Casco Kegel

I.2.1.4.- Casco Frigio

En las tropas de *Alejandro Magno*, en las falanges se utilizaban diferentes cascos, aunque el más usado era el de tipo Frigio (Figura I.6). Resultaba muy eficaz frente a golpes descendentes y en las orejeras ofrecía cierta protección a la cara sin obstruir la visión o el oído. Los cascos eran de forma cónica, con o sin dispositivos de protección de la mejilla y nada para proteger el puente de la nariz. Sin embargo, tenían la ventaja de dar a las tropas una mayor audiencia y visibilidad [I.13].



Figura I.6.- Casco Frigio

I.1.2.5.- Casco Beocio

En la caballería de *Alejandro Magno*, el casco utilizado era el tipo *Beocio*, hecho de bronce y el cual no tenía restricciones de visión y oído (Figura I.7) [I.14].



Figura I.7.- Caballero tesalio con casco Beocio

I.2.1.6.- Casco Ilirio

El casco Ilirio fue una evolución del casco Kegel, fue llamado así por los restos encontrados en esa ciudad (Iliria) [I.15]. Se fue adecuando a las necesidades de protección. En el año 650 a. C. el casco dejaba descubierta la nuca y dificultaba la audición (Figura I.8a).



Figura I.8.- Casco Ilirio. a) Hacia el 650 a. C. b) Hacia el 600 a. C.

Hacia el año 600 a. C. ya contaba con protección en el cuello, aunque seguía teniendo problemas con la audición. (Figura 8b). En ambos ejemplos los cascos estaban fabricados de bronce.

I.2.1.7.- Casco Corintio

El casco Corintio para muchos, es el casco Griego por excelencia. Fue creado a fines del *Siglo VII*, como pieza esencial del armamento Hoplita. Se difundió ampliamente en todo el mundo griego y también fue exportado a otras partes del mundo conocido en ese entonces [I.16]. Éste es uno de los cascos más conocidos e identificables hasta nuestros días. Un ejemplo claro, se encuentra en uno de los bustos del estadista y orador *Pericles* (495-425 a. C.), quien lleva un casco Corintio (Figura I.9a). Ofrecía una protección muy fiable para la cabeza. Sin embargo, restaba visión y audición en la batalla. Por los que los soldados Hoplitas no recibían instrucciones dentro de la misma (Figura I.9b).



Figura I.9.- Casco Corintio. a) Pericles con casco Corintio. b) Vista general de casco Corintio

I.3.- Cascos del *Siglo I* hasta el Medioevo

En esta etapa de la historia y desarrollo de la humanidad, la cual coincide con el nacimiento del imperio romano, los cascos siguen siendo fabricados mayoritariamente de bronce. Aunque, es el comienzo de la fabricación con Hierro. Los cascos romanos no sufren muchos cambios por 400 años. Con la llegada de la *Edad Media* se le da una importancia mayor a las armas y armaduras, con el uso de la caballería [I.17]. A continuación una breve semblanza.

1.3.1.- Casco Montefortino

El casco Corintio se mantuvo vigente hasta el *Siglo I* de nuestra era, pero desde el *Siglo III* a. C. en Italia se comienza a usar otro tipo de casco, el cual es llamado Montefortino. Lo anterior debido al primer lugar donde fue hallado. Este fue el modelo de casco de los ejércitos consulares de la república (desde el *Siglo III* a. C. hasta el *Siglo I* d. C.). Tenía forma de domo y estaban hechos de bronce [I.16]. Tenían una pequeña extensión en la parte trasera como protección del cuello (Figura I.10).



Figura I.10.- Casco Montefortino

1.3.2.- Casco de legionario romano [I.18 y I.19]

Este casco de bronce por dentro, llevaba un disco de Hierro y un casquete de piel para amortiguar la fuerza de los golpes a la cabeza. El cuello tenía forma semiesférica y orejeras sostenidas por bisagras y una pequeña visera. Al frente se adornaba la mayoría de las veces con un penacho de plumas o crines (Figura I.11a). Existía una variante llamada *Coolus*, que cubre el periodo desde el *Siglo III* a. C. hasta el año 79 d. C. aproximadamente. Están inspirados en los cascos Galos del distrito de Coolus. Tienen una protección de cuello algo mayor que la del Montefortino y una punta cónica en la parte superior como soporte para la cresta (Figura I.11b).

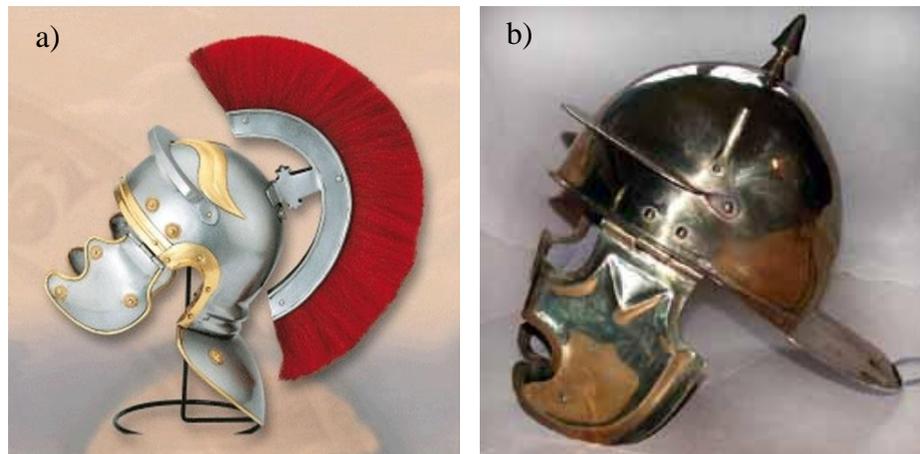


Figura I.11.- Cascos Romanos. a) Casco Legionario. b) Casco Coolus

I.3.3.- Casco Itálico

Los cascos Itálico-Imperiales fueron construidos por herreros itálicos, estaban fabricados en Hierro. Probablemente inspirados en los cascos greco-etruscos o italianos empleados en la época republicana. Fueron usados desde el final del *Siglo I* hasta principios del *Siglo III*. [1.19] (Figura I.12).



Figura I.12.- Casco Itálico –Imperial

I.3.4.- Casco Spangenhelm

Este tipo de casco aparece en el *Siglo III-IV* d. C. es muy usado por influencia germana en tropas romanas y posteriormente en la Edad Media hasta el *Siglo XI*, con alguna ligera modificación. El Spangenhelm, llamado así porque su diseño era uniendo seis o más tiras de metal (Spangen) a

una la banda para la cabeza de la placa de metal, las tiras del casco eran generalmente de bronce y de Hierro (Figura I.13) [I.20].



Figura I.13.- Spangenhelm

I.3.5.- Yelmo

El Yelmo, que comenzó a verse en el campo de batalla en el *Siglo XII*, en sus formas más tempranas, resultó ser un diseño ganador, que se utilizó durante los tres siglos siguientes. Una pieza sencilla de fabricar solía hacerse con 4 piezas remachadas entre sí y con una calva plana. Algunos tenían un visor fijo, normalmente con un aspecto feroz que ayudaba a aumentar, el ya de por sí intimidante aspecto de un caballero a la carga [I.21] (Figura I.14).



Figura I.14.- Yelmo cruzado

I.3.6.- Morrion

El Morrion es un tipo de casco Medieval de infantería usado en los *Siglo XVI* y *Siglo XVII*, con sus bordes arqueados y una cresta encima. El Morrion apareció en Castilla (España) a principios del *Siglo XVI*. Asociado popularmente sólo a los conquistadores de América, el Morrion fue usado en la mayor parte de los países europeos en los *Siglo XVI* y *Siglo XVII* (Figura I.15) [I.22].



Figura I.15.- Morrion Español

I.4.- Cascos en la época contemporánea [I.23 y I.25]

El uso militar de los cascos se redujo después del año de 1670 y las armas de fuego estriada terminó siendo utilizadas por los soldados de a pie después del año de 1700. Sin embargo, en la *Era Napoleónica* se observaron cascos adornando para la caballería (coraceros y dragones), siendo estos más de tipo ornamentales que para ser usados en batalla.

Con el estallido de la *Primera Guerra Mundial* (1914-1918) y el creciente uso de la artillería se había renovado la necesidad del uso de cascos de protección en los enfrentamientos bélicos. Uno de los primeros fue el casco *Adrian* francés (Figura I.16). El cual fue introducido para los confortamientos violentos por el año de 1915. Ya que en un principio el ejército utilizaba un gorro de tela llamado *Quepis*, el cual no ofrecía ningún tipo de protección en las trincheras y era inservible en contra de la metralla. Éste casco estaba fabricado en acero al Carbón. Por lo que era un sistema de protección que era muy barato y sencillo de fabricar. Además, de que fue fácilmente aceptado por belgas e italianos.



Figura I.16.- Casco Adrian

Por su parte en el año de 1915, los británicos fabricaron el casco Brodie (Figura I.17). De igual forma fue fabricado con acero. La ventaja que tenía este casco fue que al ser fabricado de una sola pieza. Se podía utilizar una lámina más gruesa y por su forma de plato ofrecía una mayor protección para los hombros. Varios países emplearon el casco Brodie como parte del equipo de sus soldados, como por ejemplo el ejército de los Estados Unidos.



Figura I.17.- Casco Brodie

Por su parte los alemanes usaron en un principio el casco Prusiano llamado *Pickelhaube* el cual estaba fabricado con cuero y una terminación brillante. Este tipo de casco resultó tan ineficaz como el *quepis* francés, para ello desarrollaron el *Stahlhelm* (Figura I.18). Donde se tomó como

base un casco llamado *Sellet* del *Siglo XV*. El cual ofrecía protección para la cabeza y el cuello. También estaba fabricado en acero y se volvió un icono de Alemania.



Figura I.18.- Stahlhelm del año de 1916

Para la *Segunda Guerra Mundial*, se continúa con el uso de los cascos. El Stahlhelm Alemán sufre algunas modificaciones y se utiliza el modelo M1935 (Figura I.19a). Los estadounidenses utilizan el casco M1 (Figura I.19b), el cual fue muy bien aceptado y se siguió usando hasta 1985. Militares de hoy a menudo usan cascos de alta calidad de materiales balísticos como el kevlar que ofrece una mejor protección. Algunos cascos también tienen buenas cualidades protectoras no balísticas, las amenazas tales como las ondas de choque conmovión de las explosiones.



Figura I.19.- Cascos modernos. a) Modelo M19345. b) Modelo M1.

I.5.- Historia del Futbol Americano [I.26]

En 1823, en Inglaterra, era muy popular el juego de futbol, cuenta la historia que un alumno del colegio de Rugby tomó el balón en sus manos y corrió a la meta para marcar un gol, el equipo contrario relamo la acción por lo que la disputa derivó a que el colegio de Rugby escribiera las propias reglas del deporte que conocemos como Rugby.

El año de 1869 se jugó lo que se considera como el primer partido de Futbol Americano de la historia. Éste fue efectuado entre las universidades de Rutgers (Rutgers College en ese tiempo) y la universidad de Princeton (College of New Jersey) con las llamadas reglas de Rutgers. Las cuales eran una combinación de Soccer y Rugby.

Cuatro años después, Yale, Columbia, Princeton y Rutgers redactaron el primer conjunto de reglas para el Fútbol Intercolegial. Sin embargo, estas reglas prohibían jugadores lanzar la pelota o correr con ella.

En Harvard sabían de antemano que las cuatro escuelas anteriormente mencionadas prohibían el contacto físico agresivo y el correr con la pelota. Por lo que se negaron a asistir a los juegos organizados con esas reglas. La obstinación de Harvard, para aplicar sus propias reglas en el juego en contra de Yale en 1875. Debido a la popularidad de este partido otras universidades de Estados Unidos comenzaron a organizar equipos de Rugby. Por último, en 1876 se celebró una reunión entre la Universidad de Harvard, Columbia, Princeton y Yale, donde las reglas de la Unión de Rugby de Inglaterra fueron adoptadas por las cuatro escuelas, Así nació el Futbol Americano.

I.5.1.- Cascos de protección en el Futbol Americano

Dieciocho muertos y 159 heridos graves se atribuyeron al Fútbol Americano de 1869 a 1905 y 33 más en 1908. Por lo cual, muchos jugadores optaron por usar protección. El primer uso documentado de un casco durante un partido de fútbol se produjo, durante un juego Army - Navy el 2 de Diciembre de 1893 [I.27]. Fue *Joe Reeves*, quien usó un casco de cuero hecho por un zapatero (Figura I.20).



Figura I.20.- Primer casco utilizado en un juego de Futbol Americano

Aunque los esfuerzos por evitar las lesiones no fueron del todo fructíferos, hubo protestas públicas pidiendo la abolición de Fútbol Americano. Por ello el presidente *Theodore Roosevelt*, un enorme aficionado de todos los deportes, convocó a los rectores de las tres grandes escuelas que practicaban el Futbol Americano (Harvard, Yale y Princeton) a la *Casa Blanca* para cambiar la naturaleza violenta del juego. Él dio un ultimátum, o se reforma el juego o se corre el riesgo de ser prohibido [I.28]. Por lo cual el casco y las demás protecciones se hicieron más frecuentes, pero no obligatorias. Para el año de 1915, al caso se le añadieron las aletas y agujeros a la altura de la oreja para una mejor comunicación en el campo.

La próxima innovación llegó probablemente en 1917, en forma de suspensión. Ésta suspensión era en forma de *cuna* dentro de la cáscara de cuero. Se añadieron correas de tela que formaban un patrón en el interior del casco. Con lo que se pretendía que se absorbiera y distribuyera el impacto de mejor forma a todo el sistema corporal del jugador. Además este tipo de adecuaciones permitía la ventilación del participante del juego de Futbol Americano (Figura I.21a). Emplear una protección en la cabeza no fue obligatorio sino hasta 1939, cuando la *NCAA* (National Collegiate Athletic Association) de los Estados Unidos hizo obligatorio que los jugadores utilizaran casco durante los juegos. En ese mismo año surge el casco de plástico, las innovaciones se fueron dando de manera más rápida. Además poco después surge la máscara facial y ésta se

completa en la década de los 70's (Figura I.21b). Para la década de los años 80's los cascos se fabrican con policarbonato y el amortiguamiento se modifica según la compañía que produce el caso (Figura I.21c) [I.28].



Figura I.21.- Cascos de Futbol Americano a) Cuero duro 1917. B) década de los 70's, c) Actual.

1.6.- Biomecánica de impacto

La Biomecánica, utiliza los conceptos básicos de la Mecánica (la acción de las fuerzas físicas), para explicar el comportamiento físico y cinemáticos de los seres vivos, tratando a los tejidos y huesos como sólidos y cuerpos mecánicos. Se puede decir que este campo de investigación ha sido estudiado desde hace mucho tiempo. El ser humano ha tenido la inquietud de explicar y entender, el comportamiento físico y mecánico de los seres vivos. Poniendo un ejemplo, dos grandes mentes del Renacimiento, *Galileo* [I.29] y *Borelli* [I.30], realizaron trabajos en base a la relación entre la fisiología humana y la animal, con teoría de movimiento y Mecánica.

Mientras que el fisiólogo de origen alemán *Julius Wolff* [I.31] y el zoólogo y embriionario *Wilhelm Roux* [I.32] contribuyeron de gran manera al entendimiento de huesos y progreso de la Biomecánica [I.33].

En la década de los 1960's la revista *Mecánica Experimental*, mostró un interés en el crecimiento de la Biomecánica. Desde mediados de 1960 hasta mediados de 1970, esta revista realizó publicaciones que se enfocaron principalmente, en la difusión del potencial de los bioimplantes y explorando las propiedades mecánicas de los tejidos conectivos [I.34]. Gracias a esta revista, en

los 1970's, la Biomecánica se volvería un gran tema de estudio. Por ello en 1973, se funda la Sociedad Internacional de Biomecánica y se establece el simposio de Biomecánica. Todo esto gracias a *Yuan Cheng Fung* [I.35], quien se conoce como el padre de la Biomecánica moderna. Por la publicación de *Biomecánica; Propiedades Mecánicas de los Tejidos Vivos (Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues)*.

Por otro lado, con el crecimiento de los medios de transportes sobre todo terrestres y aéreos el riesgo de impacto aumentó. Lo que propició que se estudiara la tolerancia del cuerpo humano a las fuerzas a las que es sometido al recibir un impacto. Como sucede a menudo en la ciencia, la mala fortuna o los accidentes, generan una observación del resulta y en muchos casos al desarrollo de nuevas metodologías o al estudio de un fenómeno en particular. Tal es el caso de *Hugh DeHaven*. En 1917 fue un cadete de la fuerza aérea canadiense, estuvo involucrado en un accidente aéreo, en el cual el piloto del avión muere a causa de las lesiones. Mientras se recuperaba sus heridas, se da cuenta de que sobreviven gracias al mantenimiento de la integridad de su cabina, en conjunto con el cinturón de seguridad que lo protegió del impacto [I.36]. A consecuencia de esto en 1942 se analiza las caídas de ocho personas, de las cuales siete sobrevivieron, teniendo un rango de velocidades entre 60 y 95 km/h y los diversos objetos a los que impactaron, los cuales fueron; techos de madera, vallas, tierra suave y en dos casos toldos de carros. Calculó las velocidades de impacto y distancias de frenado (deformaciones en los objetos), fueron estimadas desaceleraciones y reacciones para considerar las fuerzas de colisión que recibía el cuerpo [I.37].

En 1946 *Sir Hugh Cairns* mostró que tras la introducción del uso obligatorio de cascos de motociclistas en el ejército se produjo una disminución de la tasa de mortalidad. También señaló que la mayoría de los golpes en los cascos eran de la parte frontal y lateral en lugar de a la corona [I.38]. Se puede decir que aquí surge muchos la investigación en el ámbito de impacto recibido en el cráneo, ya sea en jugadores de Futbol Americano, pilotos de aviones, de automóviles, de motos y en general en los deportes extremos. Así como, en la construcción, seguridad industrial e igualmente el impacto de una bala, como protección para militares y policías. Actualmente se realizan estudios, tomando como base la reconstrucción de los eventos que provocan una lesión. Por ejemplo, las lesiones que se dan con las colisiones de los jugadores en los juegos de Futbol

Americano [I.39]. Asimismo, se ha utilizado el Método del Elemento Finito para reconstruir cascos en accidentes de motociclistas, para comprender una aproximación del mecanismo de lesión en el cráneo [I.40].

I.7.- Planteamiento del problema

La protección de la cabeza ha sido una de las preocupaciones del hombre desde la época antigua, siendo la guerra el principal campo de desarrollo. Actualmente existe regulaciones para mantener a salvo ésta parte importante de nuestro cuerpo, ya sea en el aspecto laboral o recreativo. En México uno de los deportes más practicados es el Fútbol Americano, en el cual una parte importante del equipo de protección es precisamente el casco. El casco de Fútbol Americano, ha mantenido su geometría desde hace 25 años, es decir es de una sola pieza.

El problema presentado en este trabajo, busca la optimización por medio del Método del Elemento Finito (MEF) de un casco de Fútbol Americano, con un diseño segmentado para así poder observar el comportamiento y la absorción de las fuerzas en puntos a las que será sometido. Estas serán colocadas en los puntos de estudio que marca las regulaciones del *Comité Nacional de Normas de Funcionamiento de Equipos para el Atletismo (NOCSAE)*. Realizándose también una prueba en un casco de uso común, para así poder tener una comparativa de resultados. Aunado a un ciclo de cargas mayor a las que puede ser sometido en condiciones reales y así determinar los límites de seguridad que proporcionara.

Durante el trabajo se presentan fundamentos teóricos del impacto mecánico y sus consecuencias que derivan en una conmoción cerebral. En los siguientes capítulos se mostrarán los estudios numéricos. Dependiendo del resultado de los mismos, se espera llegar a una conclusión satisfactoria.

I.8.- Sumario

Durante casi toda la existencia del ser humano, la protección de la cabeza ha sido de suma importancia. Desde el tercer milenio antes de Cristo en Sumeria ya existían cascos de cuero y algunos de metal, aunque estos fueran ornamentales. *Homero* relata el uso de cascos hechos con cuero y colmillos de jabalí. Pero es en el *Siglo VII a. C.* donde comienza el uso en forma de los

cascos de guerra. Durante este periodo y hasta el año 1600, la fabricación era mayoritariamente de bronce y en su última época de Hierro. En la época moderna se encuentra la mayor variedad de cascos, pasando por el bien conocido casco Corintio hasta el yelmo de las cruzadas. Ya en el *Siglo XX* con la llegada de las guerras mundiales y los nuevos armamentos de artillería, donde surge nuevamente la necesidad de usar nuevamente el casco de protección, destacando el Adrian francés, el Brodie inglés y el Stahlhelm alemán, todos ellos ya fabricado de acero. Por otra parte en el *Siglo XIX* surge en Estados Unidos, un nuevo deporte, un híbrido entre dos deportes ingleses como son el Rugby y el Soccer. Éste deporte conocido en México como Fútbol Americano, comienza con reglas basadas en el Rugby. No es hasta el último tercio del siglo cuando en la universidad de Harvard, se escriben la mayoría de las reglas definitivas. En un principio era considerado un deporte salvaje. Prueba de ello, a finales del *Siglo XIX* y principios del *Siglo XX* había 18 jugadores muertos en la cancha. Es precisamente a finales del *Siglo XIX* cuando un jugador de la Marina utiliza la primera protección para la cabeza, un rudimentario casco fabricado de cuero. En la década de 1920's se realizan algunos cambios, se le han añadido tiras para la sujeción y huecos en para mejorar la audición. Hasta el años de 1939, se vuelve obligatorio el uso del casco en los juegos universitarios. Precisamente en 1939 se crea el primer casco de plástico. Para la década de los 1950's surge el primer protector facial. En la década de los 1980's se sustituye el plástico por el policarbonato. Se incluyen los primeros estudios de Biomecánica en los trabajos de *Galileo*. Los primeros estudios sobre la desaceleración en los cuerpos en 1942 y el surgimiento de la *Revista Mecánica Experimental* y las aportaciones del llamado padre de la Biomecánica *Yuan Cheng Fung*.

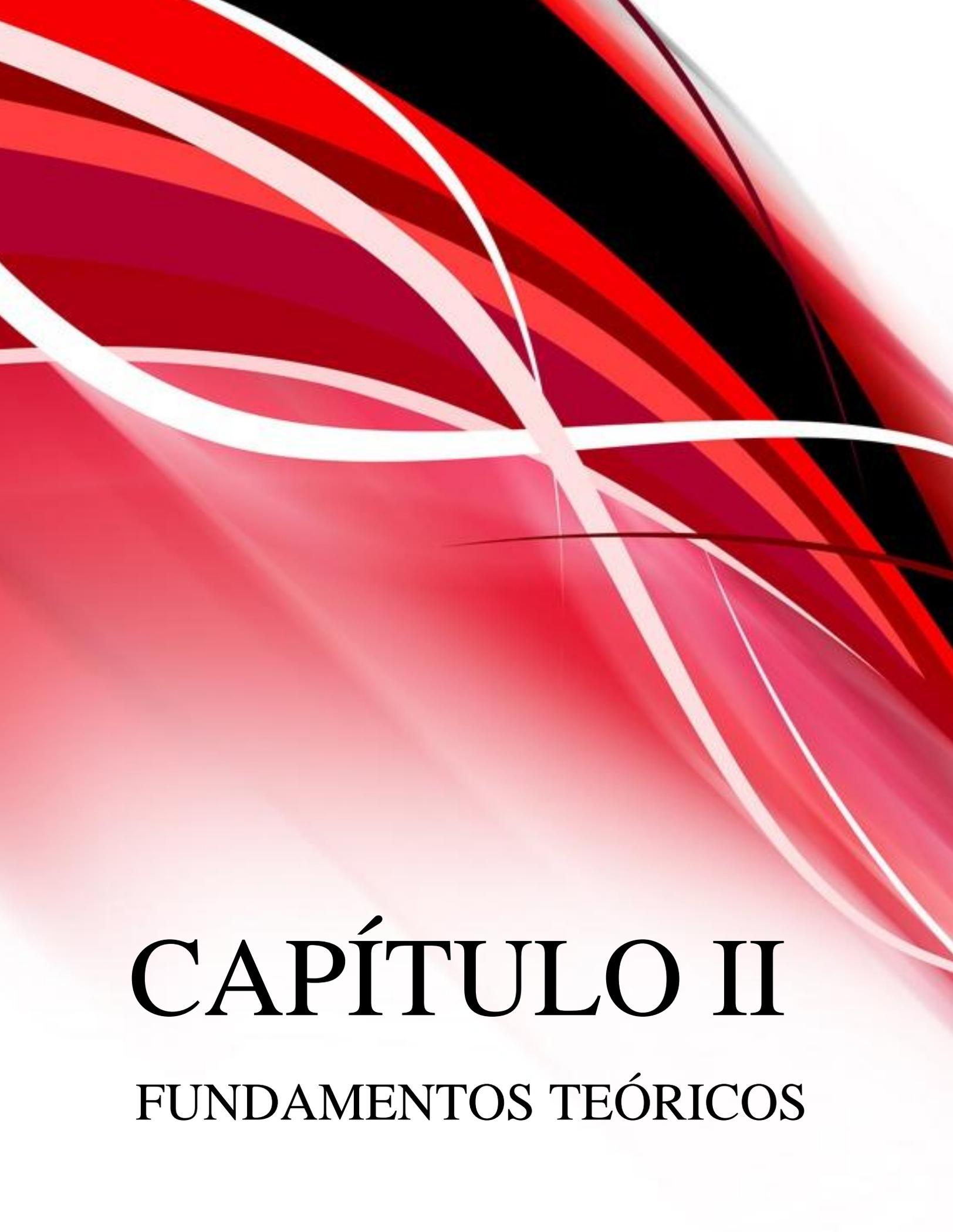
I.9.- Referencias

- 1.- López, H., *Seguridad Industrial y Protección Ambiental para la Pequeña y Mediana Empresa*, Ed. Universidad Iberoamericana, pp 19, 1999.
- 2.- Real Academia de la Lengua Española, *Diccionario de la Lengua Española; Real Academia Española*, Vigésima Segunda Edición, Ed. Planeta Publishing, pp 940, 2003.
- 3.- Le Vay, D., *Anatomía y Fisiología Humana*, 2ª Edición, Ed. Paidotribo, pp 185, 2004.
- 4.- Didi-Huberman, G., *Ser Cráneo Lugar, Contacto, Pensamiento, Escultura*, 1ª Edición, Ed. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Artes, pp 5, 2008.

- 5.- Real Academia de la Lengua Española, *Diccionario de la Lengua Española; Real Academia Española*, Vigésima Segunda Edición, Ed. Planeta Publishing, pp 1173, 2003.
- 6.- Alcoba, A., *Enciclopedia del Deporte*, Librerías Deportivas Esteban Sanz, pp 22, 2001.
- 7.- Real Academia de la Lengua Española, *Diccionario de la Lengua Española; Real Academia Español*, Vigésima Segunda Edición, Ed. Planeta Publishing, pp 3125, 2003.
- 8.- Van den Bosch, E., *Crash Helmet Testing and Design Specifications*, Ed. Technische Universities Eindhoven, pp 1, 2006.
- 9.- Hernández, X. y Rubio, X., *Breve Historia de la Guerra Antigua y Medieval*, Ed. Ediciones Nowtilos, pp 45, 2010.
- 10.- Homero, *La Iliánada*, Ed. Ediciones Ibericas, canto X-260, pp 195, 1965.
- 11.- Lane-Fox, R., *El Mundo Clásico; La Epopeya de Grecia y Roma*, Ed. Crítica, pp 113, 2007.
- 12.- Echeverria-Rey, F., *Ciudadanos, Campesinos y Soldados; El Nacimiento de la Polis Griega y la Teoría de la Revolución Hoplita*, Ed. Ediciones Polifermo, pp 81, 2008.
- 13.- Hackel. W. y Jones. R., *Alexander´s Elite Infantryman´s*, Ed. Osprey Publishing, pp 15-16, 2006.
- 14.- Connolly, P., *Greece and Rome at War*, Ed. Frontline Book, pp 60-60, 2011.
- 15.- Lendon, J. E., *Soldiers & Ghosts; A History of Battle in Clasical Antiquity*, Ed. Yale University, pp 53, 2005.
- 16.- Goldsworthy, A., *El Ejército Romano*, Ed. Ediciones Akal, pp 30-31, 2005.
- 17.- Tubbs, F. R., *Stahlhelm; Evolution of the German Steel Helmet*, Ed. Kent State University Press, 1971.
- 18.- Wilkes, J., *El Ejército Romano*, Ed. Cambridge University Press, pp 12, 1985.
- 19.- Goldsworthy, A., *El Ejército Romano*, Ed. Ediciones Akal, pp 124-124, 2005.
- 20.- Frassetto, M., *Encyclopedia of Barbarian Europe; Society in Transformation*, Ed. ABC-Clio, pp 367, 2003.
- 21.- Azofeifa, I., *Literatura Universal; Introducción a la Literatura Moderna en Occidente*, Ed. Editorial Universidad Estatal a Distancia, pp 45, 1984.
- 22.- Real Armería de Madrid, *Catalogo Descriptivo*, Ed. Editorial Maxtor, pp 146, 2008.
- 23.- Hernández. J., *Todo lo que Debe Saber Sobre la Primera Guerra Mundial*, Ed. Editorial Nowtilus, pp 102, 2007.

-
- 24.- Dunstan, S., *Flak Jackets: 20th Century Military Body Armour*, Ed. Osprey Publishing Ltd, pp 5, 2005.
 - 25.- Hernández, X. y Rubio, X., *Breve Historia de la Guerra Moderna*, Ed. Editorial Nowtilus, pp 232, 2010.
 - 26.- Watterson, J., *College Football: History, Spectacle, Controversy*, Ed. The Johns Hopkins University Press, pp 9-80, 2000.
 - 27.- Levy, M., Ozgur, B., Berry, C., Aryan, H. y Apuzzo, M., *Birth and Evolution of Football Helmet*, pp 656, 2004.
 - 28.- Ellenbogen, R., Berger, M. y Hunt-Barjet, H., *The National Football League and Concussion in Contact Sports*, pp 560, 2010.
 - 29.- López-Chicharro, J. y Fernández-Vaquero, A., *Fisiología del Ejercicio*, Ed. Médica Panamericana, pp 6, 2008.
 - 30.- Mora-Novaro, O. A. y Mora-Carrillo, G., *Historia de la Fisiología; Breve Revisión con Especial Referencia a la Circulación, Respiración, Sistema Nervioso y Glándulas Endocrinas*, Ed. Fundación Canaria Orotava, pp 60-69, 2007.
 - 31.- Carter, D. R. y Beaupré G. S., *Skeletal Function and Form; Mechanobiology of Skeletal Development, Aging and Regeneration*, Ed. Cambridge University Press, pp 4-5, 2001.
 - 32.- Gilbert, S. F., *Biología del Desarrollo*, Ed. Médica Panamericana, pp 66, 2005.
 - 33.- Xu, S. y Grande-Allen, K. J., The evolution of the field of biomechanics through the lens of experimental mechanics, *Experimental Mechanics*, Vol. 50, pp 667-682, 2010.
 - 34.- Mc.Ginnis, P., *Biomechanics of Sports and Exercise*, Third Edition, pp. 3, 2013.
 - 35.- Chien, S., Chen, P. C-Y., Schmid-Schönbein, G. W., Tong, P. y Woo, S, L-Y., *Tributes to Yuan-Cheng Fung on his 90th Birthday; Biomechanics; From Molecules to Man*, Ed. World Scientific, pp 153-155, 2009.
 - 36.- Murray, M., *The Increasing Importance of the Biomechanics of Impact Trauma*, Ed. Sadhana, Vol. 32, No. 4, pp 397-408, 2007.
 - 37.- Hemenway, D., *While We Were Sleeping: Success Stories in Injury and Violence Prevention*, Ed. University of California press, pp 20, 2009.
 - 38.- Moore, R. L., How crash helmets save life, *New Scientist*, Vol. 15. Pp 288-292. 1962.
 - 39.- Post, A., Oeur, A., Hoshizaki, B. y Gilchrist. *An Examination of American Football Helmet Using Brain Deformation Metrics Associated with Concussion*, pp 654, 2010.
-

-
- 40.- Willinger, R. y Baumgartner, D., Numerical and physical modelling of the human head under impact – toward new injury criterion, *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 32, No 1, pp 94-115, 2001.



CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II.1.- Principio del impulso y cantidad de movimiento

Se tiene un concepto coloquial del significado de la palabra impulso, por ejemplo, si se quiere saltar una distancia para cruzar una corriente de agua, se logrará mejor si toma impulso antes del salto. También en todas las situaciones donde una persona quiere derribar una puerta, se aleja de ella y toma impulso para lograrlo. Estas apreciaciones coloquiales de la palabra corresponden mejor al concepto físico de cantidad de movimiento, pero no están muy lejos del concepto que se tratará en este capítulo. Sin embargo, el impulso y la cantidad de movimiento están estrechamente relacionados aunque son conceptualmente diferentes.

La cantidad de movimiento o momento lineal se refiere a objetos en movimiento y es una magnitud vectorial, que desempeña un papel muy importante en la *Segunda Ley de Newton*. La cantidad de movimiento combina las ideas de inercia y movimiento. La conservación de la cantidad de movimiento es la base sobre la que se construye la solución a diversos problemas que implican dos o más cuerpos que interactúan, especialmente en la comprensión del comportamiento del impacto de objetos [II.1]:

$$p = mv \quad \text{II.1}$$

Dónde p es la cantidad de movimiento, m es la masa del objeto y v es la velocidad del objeto. Si la cantidad de movimiento de un cuerpo cambia, también cambia su velocidad, suponiendo que la masa se conserve. Si existe una variación en la velocidad, quiere decir que hay aceleración. *Newton* afirmó que una fuerza debe actuar sobre el cuerpo en un instante determinado; cuanto mayor sea la fuerza más intensa sería la variación en la cantidad de movimiento que el cuerpo experimenta. Existe otro factor que permite variar la cantidad de movimiento y es el tiempo que tarda en actuar esa fuerza sobre el cuerpo. Si dos hombres intentan empujar un auto, aplicando una fuerza en un instante de tiempo muy pequeño, es muy posible que no lo muevan, en cambio si la misma fuerza es aplicada por un lapso de tiempo mayor, posiblemente se moverá. El producto de esta fuerza por el tiempo que tarda en actuar sobre un cuerpo dado se le conoce como impulso [II.2]:

$$I = F \cdot t \quad \text{II.2}$$

Dónde I denota al impulso, F es la fuerza y t es el tiempo. Para entender cuál es la relación entre impulso y cantidad de movimiento se debe partir de la *Segunda Ley de Newton*, la cual indica que; *la aceleración con la que un cuerpo cambia su velocidad es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él* [II.3].

$$F = ma \quad \text{II.3}$$

Pero $a = \frac{dv}{dt}$ por lo que se puede escribir la Ecuación II.3 como:

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad \text{II.3a}$$

Entonces $Fdt = mdv$ y suponiendo que F y m son constantes y en la misma dirección que la velocidad (v), se puede integrar la ecuación:

$$F \int_{t_1}^{t_2} dt = m \int_{v_1}^{v_2} dv \quad \text{II.3b}$$

Teniendo $F(t_2 - t_1) = mv_2 - mv_1$ por lo tanto:

$$I = \Delta p \quad \text{II.4}$$

II.2.- Impacto

En el capítulo anterior, la *RAE* define impulso como; *choque de un proyectil o de otro objeto contra algo, efecto de una fuerza aplicada bruscamente*. Para el objeto de éste trabajo se desea observar las cargas de impacto, o también llamadas cargas súbitas, de choque o impulsivas, desde el punto de vista de los impactos físicos, como el proceso involucrado en una colisión de uno o más objetos [II.4]. El impacto contiene una amplia gama de variantes para especificar su estudio, se puede utilizar una metodología simple, observando las deformaciones que se generan en los cuerpos, se puede definir como impactos a baja velocidad y a alta velocidad. Los impactos a baja velocidad dan como resultado presiones de contacto que causan solo pequeñas deformaciones,

que solo se observará una deformación significativa en una pequeña región adyacente al área de contacto. Para los impactos a alta velocidad se observan grandes deformaciones cerca del área de contacto, que son el resultado del flujo plástico. Las cuales presentan gruesas manifestaciones, como son grietas o penetraciones. Para ambos casos, en impactos a baja velocidad e impactos a alta velocidad, las deformaciones coinciden con la fuerza de contacto que causa variaciones de velocidad en las masas involucradas [II.5]. Pueden dividirse en tres categorías según la severidad de aplicación [II.5]:

1. Cargas que se mueven con rapidez de magnitud constante.
2. Cargas aplicadas bruscamente.
3. Cargas de impacto directo.

Para poder describir los puntos anteriores se ejemplifican tres casos (Figura II.1), teniendo en cada caso, una masa (m), un resorte (k) y para el primer caso un amortiguador (c). En la Figura II.1a se tiene el primer caso de cargas de movimiento acelerado de magnitud constante, que la masa mostrada se encuentra sostenida por el amortiguador. De manera que solamente toca la parte superior del resorte y es liberada rápidamente. Debido al amortiguador se aumenta la fuerza de rozamiento, lo que previene que se aplique bruscamente la acción de la gravedad por la masa (mg).

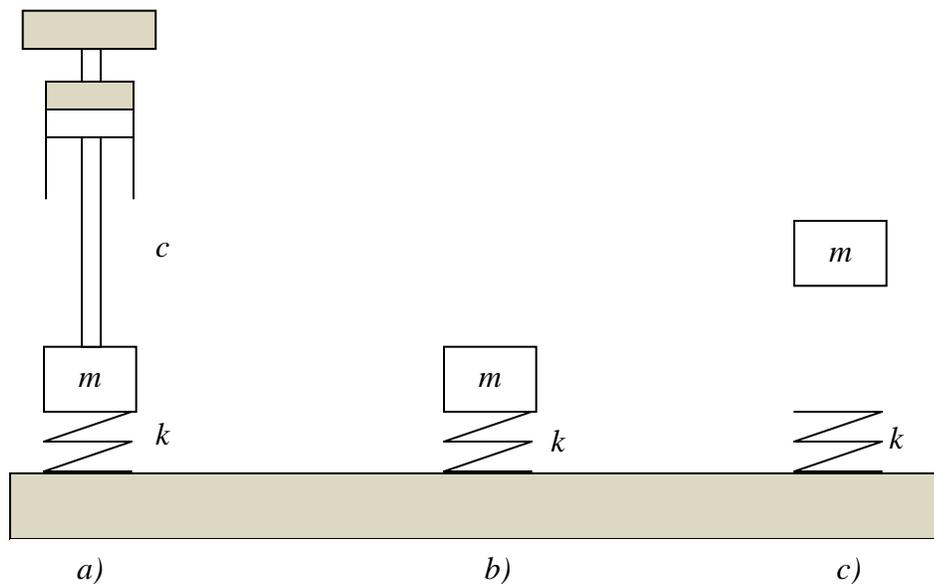


Figura II.1.- Niveles de cargas a impacto producidas por la liberación de masa m

En el segundo caso (Figura II.1b) la masa no se encuentra sujeta al amortiguador. Por lo que en este caso se aplica instantáneamente toda la fuerza del producto de la masa por la gravedad (mg), lo que da como resultado las cargas aplicadas bruscamente. En el tercer caso (Figura II.1c) se ejemplifica una carga de impacto directo donde se observa que la masa no se encuentra sujeta al amortiguador y se le adiciona una cantidad de energía cinética antes de que impacte en el resorte [II.6].

En el primer caso (Figura II.1a), debido a la acción del amortiguador, se aplica la acción de la gravedad por la masa (mg) en forma gradual. Mientras que cuando la carga se llega a aplicar con lentitud suficiente puede considerarse como carga estática. La forma de distinguir entre carga de impacto y carga estática en esta situación es comparar el tiempo requerido para la aplicación de la carga con el período natural de vibración de la masa sin amortiguador en el resorte, para explicar un poco el término de periodo natural, imagine una masa (Figura II.1b), que se encuentra sujeta al resorte y es empujada contra él y se libera bruscamente. La masa se moverá de arriba hacia abajo en repetidas ocasiones o mejor dicho vibrará, con un intervalo fijo el cual será, las veces consecutivas que se encuentra en su punto superior o el resorte en tensión; y en su punto inferior o comprimido. Este intervalo de tiempo es el denominado *periodo natural de vibración* de la masa en el resorte, determinado por la Ecuación II.5, por medio de esta ecuación se puede determinar que entre mayor sea la masa y menos resistente el resorte se tendrá un periodo mínimo de vibración (o, es menor la frecuencia natural de vibración del sistema).

$$\varphi = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{II.5}$$

Una vez entendido el periodo natural de vibración del sistema, se puede determinar si el tiempo (t) requerido para aplicar la carga es mayor que tres veces el periodo natural (φ), los efectos dinámicos son insignificantes y se pueden considerarse como cargas estáticas. Si el tiempo de carga es menor de la mitad del periodo natural, existe definitivamente una carga de impacto. Pero dentro de estas dos determinaciones existe un área en la que se encuentra una incertidumbre (también llamada zona gris) (Tabla II.1) [II.6].

Tabla II.1.- Determinación de cargas

Tipo de carga	Tiempo requerido para aplicar la carga
Estática	$t > 3\varphi$
“Zona Gris”	$\frac{1}{2}\varphi < t < 3\varphi$
Dinámica	$t < \frac{1}{2}\varphi$

Las cargas de impacto pueden actuar de distinta formas, ya sea en compresión, tensión, flexión torsión o una combinación de estas. Una diferencia importante entre la carga estática y la de impacto es que las partes con carga estática deben diseñarse para soportar cargas, en tanto que las partes sujetas a impacto deben diseñarse para absorber energía. Las propiedades de resistencia del material por lo común varían con la velocidad de las aplicaciones de carga. En general, esto trabaja en forma favorable debido a que tanto la resistencia a la fluencia no obstante, la carga rápida tiende a favorecer la fractura de material frágil. Con el fin de comprender lo antes mencionado de los materiales, a continuación se explica el comportamiento elástico y plástico de estos, para de esta manera comprender la acción realizada debida a agentes externos dentro de la geometría del material y su capacidad de deformación.

II.3.- Comportamiento elástico y elasto-plástico de los materiales

El límite elástico es la carga máxima que un material elástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplican cargas superiores a este límite, el material experimenta deformaciones permanentes y no recupera su forma original al retirar las cargas. En general, un material sometido a cargas inferiores a su límite de elasticidad es deformado temporalmente de acuerdo con la *Ley de Hooke* [II.7].

Los materiales sometidos a cargas superiores a su límite de elasticidad tienen un comportamiento elasto-plástico (Figura II.2). Si las cargas ejercidas continúan aumentando el material alcanza su punto de fractura. El límite elástico marca, por tanto, el paso del campo elástico a la zona de fluencia. Más formalmente, esto comporta que en una situación de tensión uní axial, el límite elástico es el esfuerzo admisible a partir de la cual se entra en la superficie de fluencia del material [II.8].

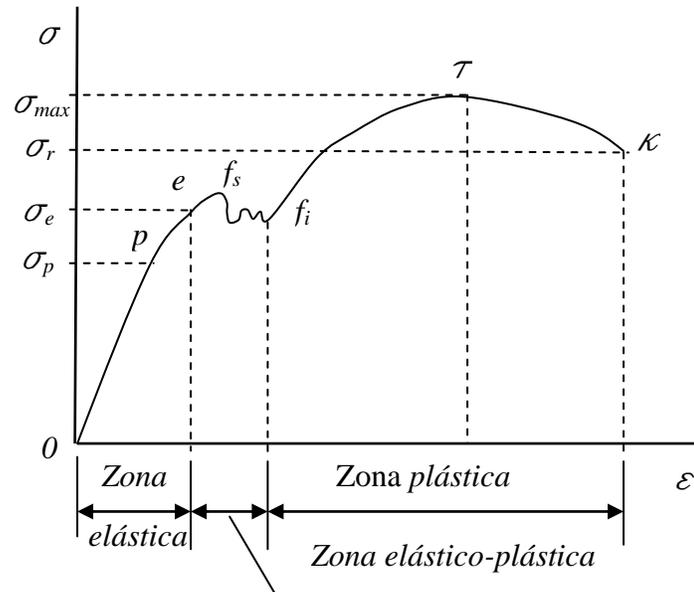


Figura II.2.- Diagrama esfuerzo-deformación

II.3.1.- Cascarones

Un cascarón es una estructura con superficie curva, que por lo general es capaz de transmitir cargas en más de dos direcciones hacia los apoyos. Se constituye un componente de alta eficiencia estructural cuando tiene conformación, proporciones y apoyos de modo que transmita las cargas sin doblarse ni torcerse.

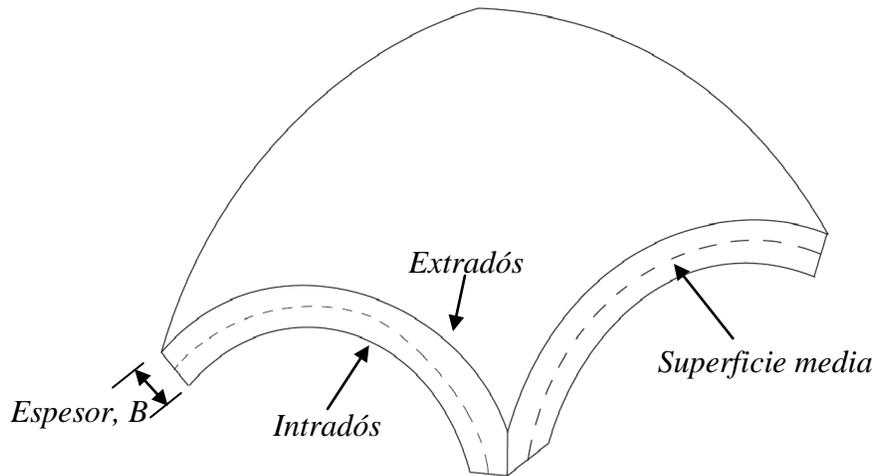


Figura II.3.- Cascarón

Su espesor es pequeño en comparación con sus otras dimensiones, pero no suele ser tan delgado como para hacer que las deformaciones sean excesivas comparadas con su espesor. Un cascarón

se define por la geometría de la superficie media que este posea, la cual se encuentra a la mitad de la distancia entre la superficie externa (extradós) y la superficie interna (intradós). Su espesor es la distancia normal a la superficie media entre el extradós y el intradós (Figura II.3) [II.9].

II.3.2.- Clasificación de superficies de cascarón [II.10-II.11]

Los cascarones se pueden clasificar a partir de la geometría de su superficie media atendiendo a los criterios que se exponen a continuación:

- a) Curvatura *Gaussiana* de la superficie.- En cualquier punto A sobre una superficie cualquiera, se puede trazar un plano tangente a la cáscara. Un vector normal a dicho plano tangente es considerado un vector normal a la superficie en ese punto (Figura II.4).

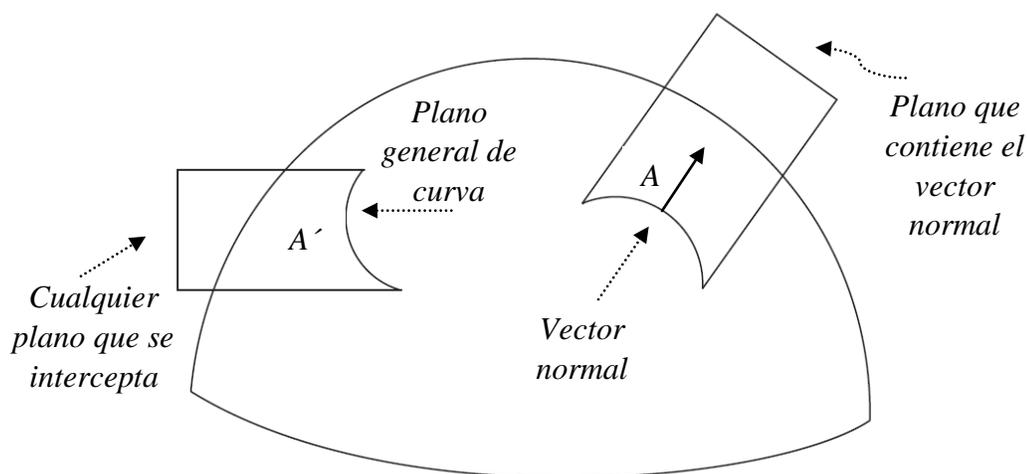


Figura II.4.- Intersección de los planos con la superficie

Un número infinito de planos pueden intersectar la superficie y atravesar el punto A . Un plano que intersecta el punto A y contiene al vector normal es un plano normal a la superficie media en ese punto. La curva plana formada por la intersección de este plano normal con la superficie es denominada *Sección Normal* de la superficie en ese punto. Cada una de estas curvas planas posee su curvatura local y su correspondiente radio de curvatura. Del infinito número de secciones normales, se posee un valor mínimo y un valor máximo de curvatura. Estas líneas curvas, que resultan ser

ortogonales entre sí, son llamadas Secciones Principales y sus curvaturas, denotadas por K_1 y K_2 , se denominan *Curvaturas Principales* de la superficie en el punto A. El producto de las curvaturas principales $K_g = K_1 \cdot K_2$ es llamado curvatura *Gaussiana* de la superficie en el punto A. Si una de las curvaturas principales es igual a cero la superficie tiene una curvatura *Gaussiana* igual a cero. La superficie posee una curvatura *Gaussiana* positiva si $K_g > 0$ y una curvatura *Gaussiana* negativa si $K_g < 0$ (Figura II.5).

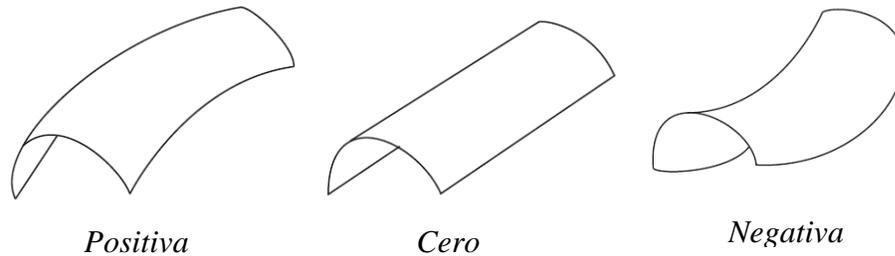


Figura II.5.- Tipos de curvatura *Gaussiana*

b) Superficies generadas.- Estas se pueden dividir en superficies de revolución y superficies traslación.

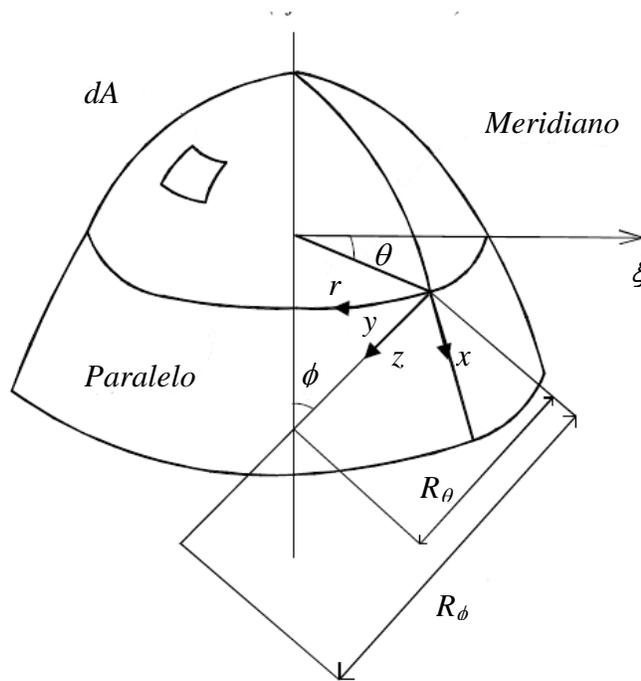


Figura II.6.- Cascaron por revolución

Cascarón por revolución. ϕ , ángulo conformado entre el eje de la cáscara y la normal del cascarón en el punto bajo consideración sobre la superficie media del cascarón. θ , ángulo comprendido entre r y cualquier línea de referencia, perpendicular al eje del cascarón. R_ϕ , radio de curvatura del meridiano. R_θ , longitud de la normal entre cualquier punto de la superficie media y el eje de rotación. R , radio de curvatura del paralelo.

- Superficies de revolución.- Son generadas por la rotación de una línea curva alrededor de un eje fijo. Tal curva es llamada meridiano y el plano que la contiene *Plano Meridiano*. Las intersecciones de la superficie con planos perpendiculares al eje de rotación son círculos paralelos, los cuales son denominados paralelos (Figura II.6).
- Superficies de traslación.- Son generadas por medio del deslizamiento de una línea (recta o curva) a lo largo de otra línea (recta o curva), manteniendo constante la orientación del plano que contiene a la curva que se desliza. Ejemplos de superficies de traslación se pueden observar en la Figura II.7.

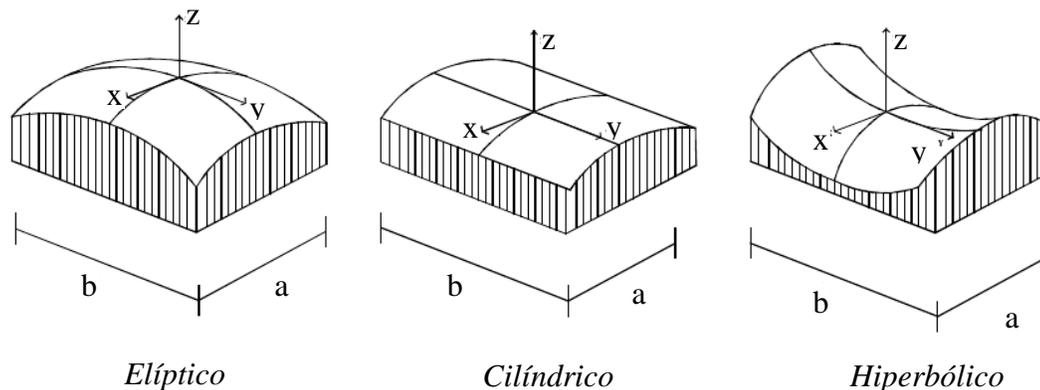


Figura II.7.- Superficies de traslación

a) Longitud de la curva guía. b) Longitud de la curva que forma el cascarón.

II.3.3.- Comportamiento estático-plástico de cascarones

La mayoría de los materiales dúctiles que se utilizan hoy en día, tienen un amplio margen de uso después de su punto de cedencia. Esta capacidad de resistencia, se puede utilizar en diseños

estructurales para estimar un factor de seguridad contra varias cargas extremas. Cuando el material después de la cedencia, se comporta de manera lineal, se determina que tiene un comportamiento perfectamente plástico. Para entender un poco más el comportamiento dinámico, es necesario explicar el comportamiento estático-plástico de estructuras tipo cascaron, como lo es un casco. Para ello se toma como ejemplo los recipientes a presión de pared delgada. Para lo cual se realiza la simplificación de que se utiliza un material elástico, perfectamente plástico (Figura II.3) [II.12]. Al tomar como partida la Figura II.2, el estudio plástico de cualquier material resulta complicado, debido al cambio de pendiente en cada punto de la zona plástica. En base a esto, se toma el material de una forma ideal. Es decir, un material perfectamente plástico, dicha idealización (Figura II.8), simplifica los cálculos teóricos para una carga estática de colapso plástico.

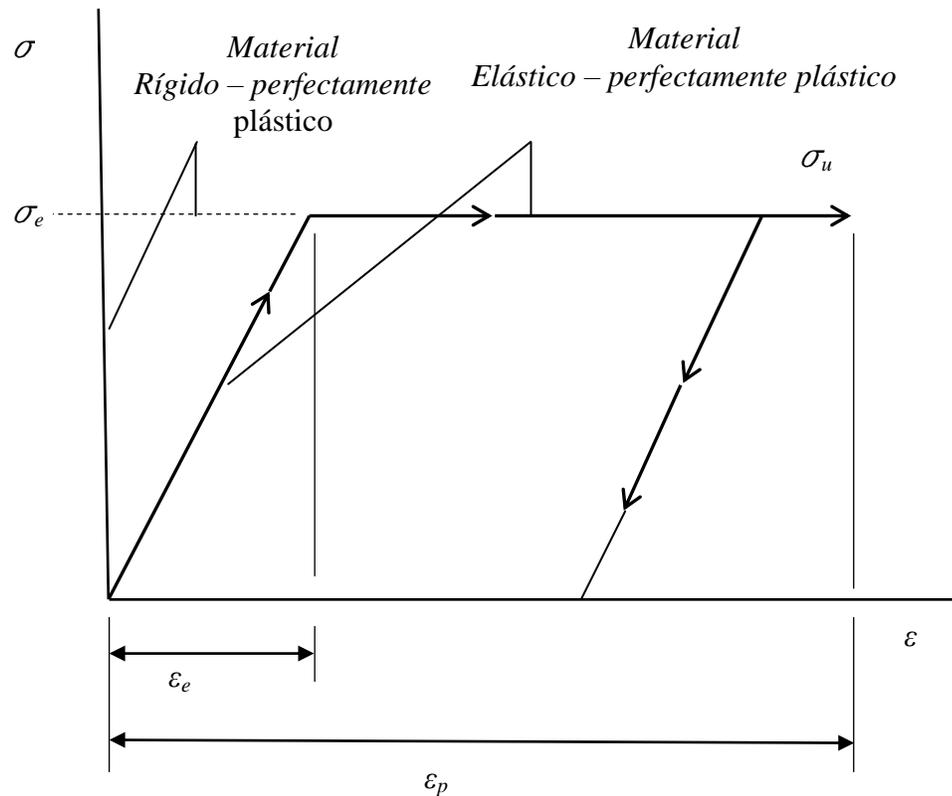


Figura II.8.- Idealización de materiales, *Rígido – Perfectamente Plástico* y *Elástico – Perfectamente Plástico*

De esta manera se considera un flujo plástico controlado por un criterio de cedencia multidimensional. Para la finalidad de este trabajo es de suma importancia ubicar en que campo

se encuentran las estructuras tipo cascaron, Por ello cabe señalar que las dimensiones lateral, o transversal, de la estructura tipo cascaron se supone que sean menores en relación con la dimensión de la superficie media. En esta circunstancia, el esfuerzo en dirección z (σ_z) en la Figura II.4, que es tomado como normal a la superficie media, puede descartarse. Sin embargo, los esfuerzos resultantes en la Figura II.4. Son reemplazados por diez resultantes de esfuerzos o esfuerzos generalizados [II.13]:

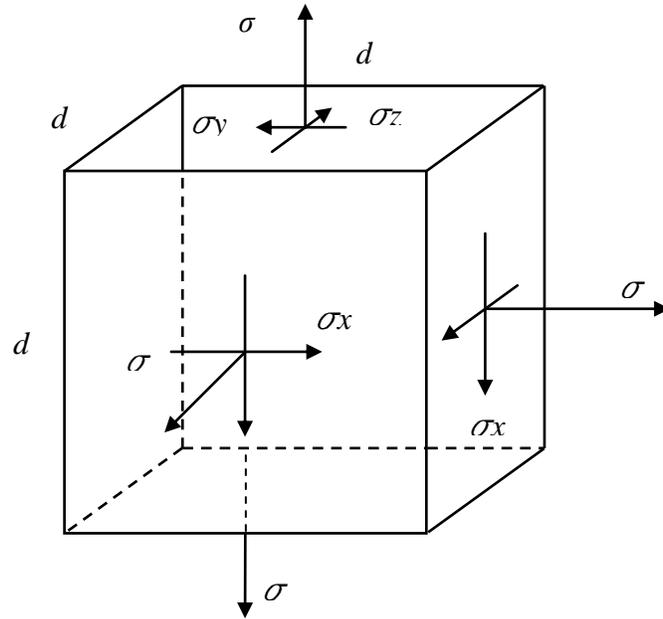


Figura II.9.- Esfuerzos en un cuerpo tridimensional

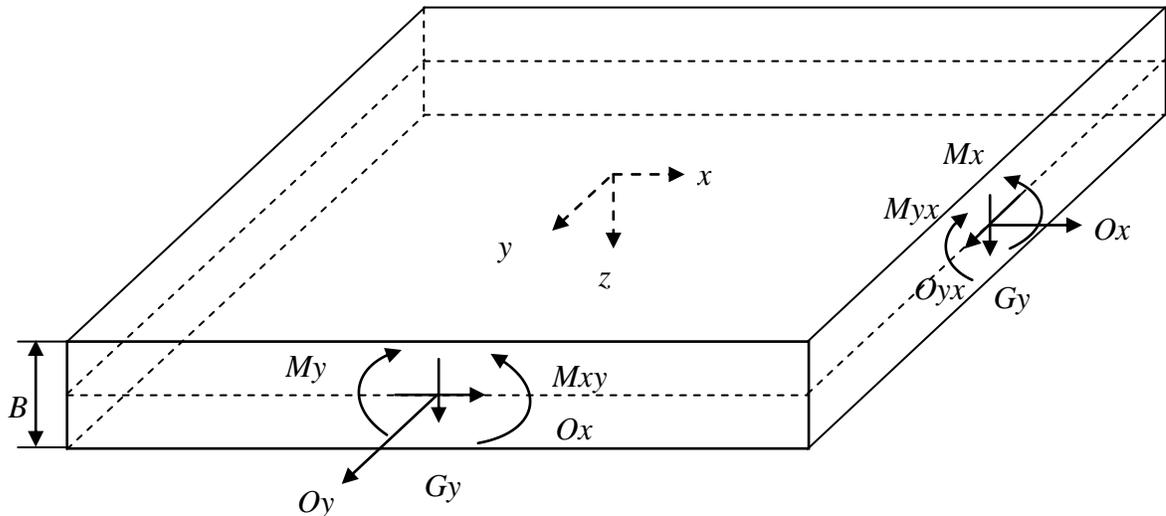


Figura II.10.- Esfuerzos generalizados que actúan en un caparazón de pared delgada

En la Figura II.9, se muestra las reacciones en tres dimensiones que se generan en un cuerpo, en el caso de que se tenga una estructura, considerada como un cascarón de pared delgada, con espesor (B), los esfuerzos generales en el eje del espesor (z) son eliminados y por lo tanto se considera una superficie bidimensional con diez esfuerzos generalizados (Ecuación II.6) (Figura II.10).

$$\begin{aligned}
 O_x &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_x dz, & O_y &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_y dz, & O_{xy} &= O_{yx} = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{xy} dz, \\
 M_x &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{xz} dz, & M_y &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{yz} dz, & M_{xy} &= M_{yx} = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{xz} dz \\
 G_x &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{xz} dz \text{ y } G_y = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_{yz} dz
 \end{aligned} \tag{II.6}$$

De acuerdo con la Figura II.10, la deformación de un cascarón se expresa en términos de desplazamiento de la superficie media. Por lo que corresponden las deformaciones con los cambios de curvatura en la superficie, y son asociados con la ecuación siguiente:

$$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}, \delta_x, \delta_y, \delta_{xy} = \delta_{yx}, \psi_x \text{ y } \psi_y \tag{II.7}$$

Incluyendo las deformaciones y esfuerzos generalizados. En la Ecuación II.6 para los esfuerzos y Ecuación II.7 para las deformaciones, se puede determinar que el cálculo de la energía total de disipación por unidad de superficie de área, con un valor ya sea positivo o cero, mediante la ecuación siguiente:

$$\dot{\Lambda} = O_x \dot{\varepsilon}_x + O_y \dot{\varepsilon}_y + O_{xy} \dot{\varepsilon}_{xy} + O_{yx} \dot{\varepsilon}_{yx} + M_x \dot{\delta}_x + M_y \dot{\delta}_y + M_{xy} \dot{\delta}_{xy} + M_{yx} \dot{\delta}_{yx} + G_x \dot{\psi}_x + G_y \dot{\psi}_y \tag{II.8}$$

II.4.- Flujo de cedencia

En el estudio de una viga simple, las reacciones generan esfuerzos de cedencia y se concibe como un eje completamente plástico. En el caso de estudio en cascarones, este criterio es insuficiente para estudiar dicho comportamiento.

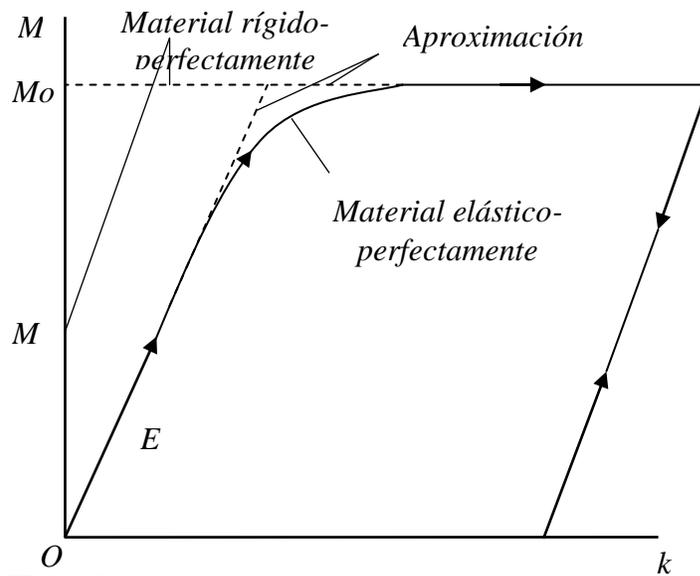


Figura II.11.-Curva característica para una viga de sección transversal rectangular

Para esto es necesario desarrollar superficies de cedencia en el espacio, junto con los esfuerzos generalizados, obtenidos por la Ecuación II.6, utilizándolos como coordenadas, en conjunción con las curvas de movimiento de la Figura II.6, da como resultado el comportamiento de uno de estos ejes. En el caso de que los esfuerzos generalizados se encuentren en la superficie es imposible generar una cedencia plástica. En cambio si se utiliza una combinación de estos esfuerzos localizados en la superficie, se origina un flujo plástico, considerando que el material es perfectamente plástico, los esfuerzos no pueden caer fuera de la superficie de cedencia [II.14].

Basándonos en el postulado de estabilidad de *Drucker*, el cual indica; *el trabajo que realiza una serie de fuerzas externas que actúan en un cuerpo, deben de ser positivas durante su aplicación, y positivas, o cero, a través del ciclo completo de aplicación y remoción de las fuerzas externas; se puede mostrar que una superficie de cedencia, debe de ser convexa*. Para ilustrar lo anterior, se tiene la Figura II.12a, al contrario de la Figura II.12b, la cual muestra una superficie no convexa. Por consiguiente, no es admisible tomando como base el postulado de estabilidad de *Drucker*. Si la cedencia inicial del material se ha obtenido experimentalmente en los puntos *C* y *D*, en la Figura II.12b, la curvatura demanda que la porción de la condición de cedencia que se encuentre entre los puntos *C* y *D* debe caer del lado derecho de, o en, una línea recta que une a estos dos puntos *C* y *D* [II.15].

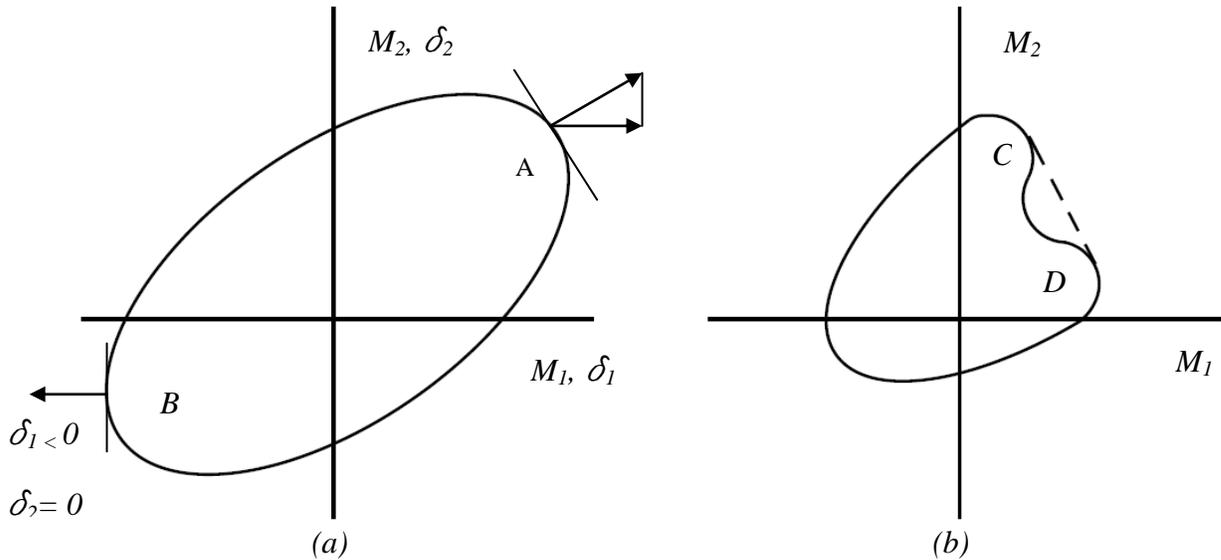


Figura II.12.- Curvaturas. a) Curva convexa con regla normalizada. b) Curva no convexa de superficie de cedencia.

Dentro de estas superficies de cedencia puede haber una combinación de esfuerzos generalizados que caen internamente, cuando esto ocurre se le determina como flujo plástico con una razón de energía de disipación positiva, es decir, mayor o igual a cero ($\dot{\Lambda} \geq 0$). Por lo que una razón de deformación, debe de ser trazada a lo largo de los ejes correspondientes en la superficie de cedencia como lo indica la Figura II.12a. El vector de deformación generalizado, asociado con el flujo plástico, debe de ser normal al correspondiente punto del esfuerzo generalizado en la superficie de cedencia (Figura II.7a) en el punto A, y se generan dos componentes de la razón de deformación generalizada $\dot{\delta}_1$ y $\dot{\delta}_2$, pero la magnitud de la deformación generalizada $\dot{\delta}$ no se conoce y por consiguiente tampoco su velocidad transversal \dot{v} . Debido a que en este estudio se trabaja con la suposición de un cascarón de pared delgada, el caso de los esfuerzos cortantes transversales puede ser descartados junto con las deformaciones laterales o transversales (ψ_x y ψ_y). Pero se considera necesario el mantener en las ecuaciones los esfuerzos cortantes (G_x y G_y) como reacciones necesarias para mantener el equilibrio.

II.4.1.- Teorema del límite inferior

Si cualquier sistema de esfuerzos generalizados se puede generar a través de una estructura que se encuentra en equilibrio con las cargas aplicadas y que en ningún punto viola las condiciones de

cedencia, entonces la estructura no colapsará, o se encuentra en el punto de colapso (inicio de colapso) [II.16].

II.4.2.- Teorema del límite superior

Si la razón de trabajo del sistema de cargas aplicadas durante cualquier colapso cinemáticamente admisible de una estructura es igual a la correspondiente razón de disipación de energía interna, por consecuencia el sistema de cargas causara colapso, o inicio de colapso, de la estructura [II.16].

II.4.3.- Cargas dinámicas

Cuando un elemento se somete a cargas dinámicas, se produce una respuesta inelástica. La energía externa es lo suficientemente grande para causar una deformación permanente o se genera un daño visible. En la mayoría de los problemas estructurales dinámicos plásticos, no es posible utilizar una metodología de análisis estática estándar, con factores de magnificación dinámicos, ya que el estudio en esta área en general se utiliza para el diseño de sistemas que absorban energía.

Si se toma el caso de una viga simplemente apoyada, el punto mínimo de colapso estático es en el momento cuando se le aplica una presión distribuida con un valor de $p_c = 2M/L^2$. En la Figura II.3 se observa que para un material rígido, perfectamente plástico, cuando se presentan presiones menores de p_c , la viga permanece rígida. Ahora bien, para cuando se incrementa la presión y resulta mayor que p_c , el material se encuentra en la zona plástica y ya no es posible el equilibrio estático. Para que suceda esto se debe de ignorar tanto la influencia del endurecimiento por deformación, los cambios de la geometría y efectos de desviaciones finitas. Por lo antes mencionado si a la viga se le aplica súbitamente una presión mayor a p_c , la viga entra en la zona plástica y por lo tanto es deformada permanentemente y se generan fuerzas de inercia. Si esta presión se aplica durante un lapso lo suficientemente largo de tiempo se presentarán deformaciones transversales, o laterales, excesivas. Si después de un tiempo es removido el pulso de presión, entonces una energía final externa ha sido impartida a la viga. Ya que se ha aplicado una presión mayor a p_c la viga es deformada permanentemente cuando toda la energía externa sea absorbida a través de la deformación plástica [II.17]. Para el análisis dinámico propuesto con

respuesta plástica es posible realizar las mismas suposiciones y simplificaciones que se utilizan para un análisis estático con comportamiento plástico. El material al recibir una carga dinámica se fragiliza, lo que se puede interpretar como que la influencia elástica juega un papel menor en los problemas que involucran grandes deformaciones plásticas. Siempre y cuando la energía dinámica total externa sea mucho mayor que la cantidad de energía que pueda recibir de manera totalmente elástica sea absorbida, si este es el caso se puede descartar la zona elástica en los problemas dinámicos.

Para estudiar el comportamiento dinámico se debe de seguir la metodología propuesta por *Norman Jones*, que indica lo siguiente [II.18]:

1. Postular un campo de velocidades cinemático, que describe el comportamiento del elemento estudiado. Para definir este campo cinemático de velocidades, consigue ser sugerido por las características del perfil de colapso estático del material.
2. Involucrar los requerimientos normados de plasticidad, esto con el fin de buscar la proporción apropiada de la superficie de cedencia que es asociada con el campo de velocidad supuesto en el punto anterior.
3. Es posible en este paso completar la solución integrando las ecuaciones diferenciales que gobiernan y satisfacen las condiciones iniciales y de frontera.
4. Como cuarto paso o final, es necesario examinar si no existen violaciones de la cedencia durante cualquier momento de la respuesta completa, o para ciertos valores de los parámetros; si es violada se debe adquirir una nueva solución generando un campo de velocidad alterno, el cual puede obtenerse de la naturaleza de la violación a la cedencia, repitiendo los pasos anteriores hasta encontrar una solución teórica exacta.

Antes de comenzar con el desarrollo de ecuaciones con el fin de definir el comportamiento de un cascarón esférico, es de primordial importancia precisar que el elemento se somete a un pulso de presión simétrica axial con la historia de forma rectangular representado en ejes presión contra tiempo, descrito por las ecuaciones siguientes:

$$p = p_0; \quad 0 \leq t \leq t$$

II.9

$$p = 0, \quad t \geq t \quad \text{II.10}$$

Donde T es la duración de la respuesta, t es el tiempo total y t es el tiempo del pulso de presión.

II.5.- Cascaron esférico elástico, perfectamente plástico, sujeto a una presión dinámica esférica [II.19]

Es importante determinar para el estudio propuesto en este trabajo, un elemento en el que se consideren tres dimensiones y el objeto a estudio debe de ser un cascarón completamente esférico. Dentro de esta sección se desarrollará el análisis con tres distintos tipos de material:

- Elástico.
- Elástico, perfectamente plástico.

Con el fin de observar los efectos elásticos y plásticos en el material. En el caso de utilizar un método considerando al material rígido, perfectamente plástico, observar su precisión. El cascarón examinado se encuentra sujeto a un pulso de presión dinámica interna esférica simétrica con forma rectangular, descrita por las Ecuaciones II.9 y II.10.

II.5.1.- Ecuaciones utilizadas

La Figura II.13 muestra el cascarón esférico que se encuentra sometido a una respuesta simétrica esférica, observando los esfuerzos cortantes planos y radiales. Así como los momentos flexionantes, que estos últimos son considerados como cero ya que la respuesta es simétrica. Mientras tanto las reacciones de fuerzas en la membrana se observan $O_\theta = O_\phi = 0$. Para que de esta manera el elemento mostrado en la Figura II.9 requiera:

$$m \frac{d^2}{dt^2} v - \frac{2\sigma}{R} + p = 0 \quad \text{II.11}$$

Se observa que m es la masa por unidad de superficie de área del cascarón. Como se ha considerado una respuesta simétrica de la misma manera se consideran las deformaciones biaxiales de la membrana en el cascarón esférico como $\varepsilon_\theta = \varepsilon_\phi = \varepsilon$, de donde se deduce que:

$$\varepsilon = -\frac{v}{R} \quad \text{II.12}$$

Considerando que v es el desplazamiento radial mostrado en la Figura II.13, es negativo, debido a que se dirige hacia adentro de la membrana.

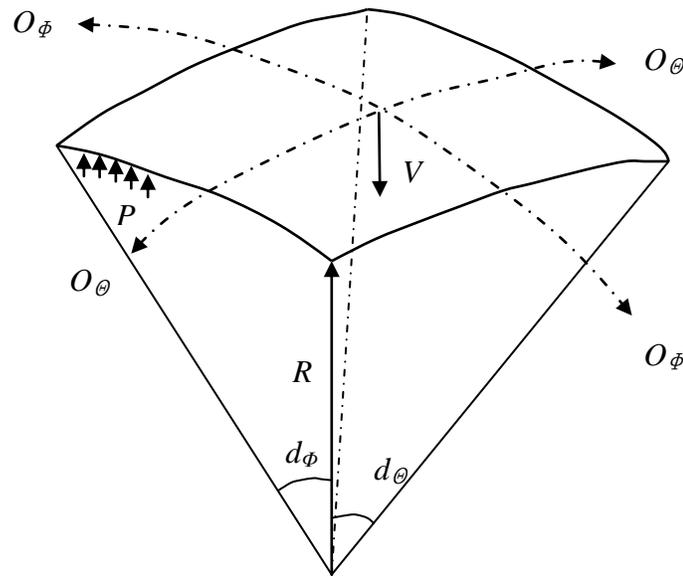


Figura II.13.- Segmento de un cascarón esférico

II.5.2.- Respuesta elástica

Primeramente es necesario desarrollar un análisis para un cascaron completamente elástico, para de esta manera observar los puntos críticos de esta zona de comportamiento del material. Se consideran tres etapas de movimiento, con respecto al tiempo de aplicación de la carga.

II.5.2.1.- Primer etapa de movimiento cuando $0 \leq t \leq t$

La fuerza de reacción se considera igual para todos los planos, por lo que para un material elástico se observa que:

$$0 = \frac{EBs}{(1-s)} \quad \text{II.13}$$

En la cual si se sustituye la deformación elástica, mostrada en la Ecuación II.12, se obtiene:

$$0 = \frac{-EBs}{(1-s)R} \quad \text{II.14}$$

De la misma manera si se sustituye esta consideración de un material elástico con su respectiva deformación en la Ecuación II.11 debe de escribirse como:

$$m \frac{d^2}{dt^2} v + \frac{2EBv}{(1-s)R^2} = -p_0, \quad 0 \leq t \leq t \quad \text{II.15}$$

Utilizando la consideración de que las presiones son iguales para el rango utilizado de la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2}{dt^2} v + r^2 v = -d, \quad 0 \leq t \leq t \quad \text{II.16}$$

Siendo los valores de r y d :

$$r^2 = \frac{2EBs}{(1-s)R^2} \quad \text{II.17a}$$

$$d = \frac{p_0}{m} \quad \text{II.17b}$$

Utilizando estos valores de r y d en la Ecuación II.16 se obtiene la siguiente solución:

$$v = \frac{d\{\cos(rt)-1\}}{r^2} \quad \text{II.18}$$

Esta solución es cuando se satisfacen las condiciones iniciales del desplazamiento y velocidad $v = \dot{v} = 0$ para un tiempo $t=0$.

II.5.2.2.- Segunda etapa de movimiento cuando $t \leq T$

Utilizando la consideración de que la presión se iguale con cero, sea liberada, acorde con la Ecuación II.10, donde para un pulso de presiones rectangular se considera un tiempo $t \geq t$, sustituyendo en la Ecuación II.16 sea:

$$\frac{d^2}{dt^2}w + r^2w = 0 \quad \text{II.19}$$

Que dentro de la segunda etapa ahora gobierna el comportamiento dinámico, o bien para predecir el desplazamiento radial, se obtiene una solución de:

$$v = \frac{d\{1-\cos(rt)-\text{sen}(rt)\text{sen}(sr)\}}{r^2} \quad \text{II.20}$$

Se obtiene cuando se iguala esta ecuación del desplazamiento radial y la velocidad radial, con la Ecuación de la etapa anterior II.18, para el desplazamiento radial, y derivando con respecto al tiempo la Ecuación II.18 en un , para obtener la velocidad radial.

Cuando el tiempo llega a una igualdad de $t = T$, o bien cuando la velocidad es cero $v \dot{=} 0$, es considerado que se ha llegado al desplazamiento radial máximo, o bien cuando:

$$\tan(rT) = -\frac{\text{sen}(rt)}{1-\cos(rt)} \quad \text{21}$$

Sustituyendo esta ecuación en la Ecuación II.20, se puede obtener una ecuación que prediga el desplazamiento radial máximo.

$$v_m = -\frac{\sqrt{2d}\sqrt{1-\cos(rt)}}{r^2} \quad \text{II.22}$$

II.5.2.3.- Tercera etapa de movimiento cuando $t \geq T$

En la primer etapa de movimiento se observa la carga del elemento; en la segunda se observa cuando termina la dicha carga y por ultimo en esta tercera etapa de movimiento el cascarón

esférico comienza a descargar elásticamente cuando el tiempo $t = T$ y la respuesta es gobernada por las ecuaciones de la segunda etapa de movimiento II.19 y II.20, las cuales se mantienen válidas para la consideración de esta etapa de movimiento donde $t \geq T$.

II.5.2.4.- Análisis del estado de energía

En cuanto al estudio con respecto a la energía, se debe observar que la energía cinética en un cascarón esférico para el tiempo $t = \epsilon$, satisfaciendo esta igualdad cuando es liberado el pulso de presión rectangular, es igual a $C_1 = \frac{m(4\pi R^2)v^2(Et)}{2}$ donde la primer derivada del desplazamiento con respecto al tiempo $\dot{v}(\epsilon)$, es dado por la ecuación II.18, la cual satisface el desplazamiento en la primer etapa de movimiento, pero ahora para un $t=\epsilon$, por lo tanto:

$$C_1 = \frac{\pi(1-s)p_0^2 R^4}{EB} \text{sen}^2(rt) \quad \text{II.23}$$

La energía total debida a la deformación elástica asociada con los esfuerzos biaxiales de la membrana en el elemento estudiado se considera $U_1 = \frac{(20s)(4\pi R^2)}{2}$, ahora bien para un tiempo $t = \epsilon$ se obtiene:

$$U_1 = \frac{\pi(1-s)p_0^2 R^4}{EB} (\text{cos}^2(rt) - 1)^2 \quad \text{II.24}$$

Considerando que el pulso total de presiones es rectangular, debe impartir una energía total que satisfaga la siguiente ecuación:

$$E_T = - \int_0^t p_0 \dot{v}(4\pi R^2) dt \quad \text{II.25}$$

Incluyendo la derivada de la ecuación II.18, que se aplica para el elemento del que se está realizando este estudio, la energía total E_T , Ecuación II.25, se escribe:

$$E_T = \frac{2\pi(1-s)p_0^2 R^4(1-\text{cos}(rt))}{EB} \quad \text{II.26}$$

Ahora bien si es requerido que $C_I + U_I = E_T$ para la conservación de la energía ha sido demostrado con el análisis anterior.

II.5.2.5.- Carga impulsiva

Una carga impulsiva es cuando la presión inicial alcanza un elevado valor, $p_0 \rightarrow \infty$, y en un tiempo demasiado corto, $t \rightarrow 0$, por lo que para la conservación del momento lineal para un tiempo $t = 0$ se necesita:

$$mW_0 = p_0 t \quad \text{II.27}$$

Donde; m = Masa, W_0 = Impulso de velocidad inicial radial hacia el exterior, p_0 = Presión inicial y t = Tiempo. Se puede observar claramente que la primera etapa de movimiento, cuando $0 \leq t \leq t$, desaparece en el tiempo $t \rightarrow 0$, entonces sustituyendo el valor, en la Ecuación II.21

$$\tan(rT) = -\frac{\text{sen}(rt)}{1-\cos(rt)} \quad \text{II.27a}$$

II.5.3.- Respuesta elástica, perfectamente plástica [II.20]

Ya habiendo explorado la respuesta elástica que tiene un cascarón totalmente esférico, que es válido cuando los esfuerzos que se encuentran en la membrana de este elemento permanecen en el rango elástico o bien cuando se cumple que el esfuerzo de reacción sea menor o igual al esfuerzo inicial:

$$0 \leq \sigma_0 \quad \text{II.28}$$

Donde por definición el esfuerzo es σ , para un cascarón sólido de sección transversal homogéneo y con un espesor B , por lo que el cascarón esférico permanece dentro de la zona elástico lo que muestra la Ecuación II.14, siempre que se cumpla la siguiente ecuación:

$$-v \leq \frac{R\sigma_0(1-s)}{EB} \quad \text{II.29}$$

Sólo mientras que el desplazamiento v sea menor que cero ($v < 0$) para presiones internas.

Asumiendo que la desigualdad de desplazamiento II.29, se satisface durante la primera etapa de movimiento, cuando $0 \leq t \leq t$, que se encuentra en el límite de la zona elástica; y solo es violada cuando el tiempo $t \geq t$, en este punto se llega a la segunda etapa de movimiento, cuando $t \leq t \leq t_1$, los detalles de este análisis son estudiados en las siguientes secciones.

II.5.3.1.- Primer etapa de movimiento $0 \leq t \leq t$

El análisis de esta etapa, debido a las consideraciones anteriores, en la que el casarón esférico analizado se encuentra aún en la zona elástica, es idéntico al mostrado en el apartado anterior.

II.5.3.2.- Segunda etapa de movimiento $t \leq t \leq t_1$

Del análisis realizado en la sección anterior, sobre sale la Ecuación gobernante II.19 y la que describe el desplazamiento radial Ecuación II.20, ambas permanecen válidas durante esta consideración de la respuesta elástica, perfectamente plástica, hasta el tiempo t_1 cuando el desplazamiento en este tiempo es:

$$v(t_1) = \frac{-R0_0(1-s)}{EB} \quad \text{II.30}$$

II.5.3.3.- Tercer etapa de movimiento $t_1 \leq t \leq T_1$

La primer etapa explica lo que sucede en el material dentro de la zona elástica, para la segunda etapa de movimiento, se explica la reacción al punto de iniciar la cedencia plástica, como el cascarón continua con los esfuerzos en la membrana constantes llega a esta tercer etapa de movimiento donde el tiempo donde T es definido por la Ecuación II.21, definiendo los esfuerzos como:

$$O_\theta = O_\varphi = O_0 \quad \text{II.31}$$

Para cuando estos esfuerzos son iguales, las Ecuaciones II.10 y II.12 ceden.

$$\frac{d^2}{dt^2} = \frac{2O_0}{mR} \quad \text{II.32}$$

Integrando esta ecuación se obtiene el desplazamiento para esta tercer etapa de movimiento

$$v = \frac{O_0 t^2}{mR} + X_1 t + Y_1 \quad \text{II.33}$$

Para resolver las constantes de integración X_1 y Y_1 se obtienen coincidentes con la Ecuación II.32 ahora para un tiempo $t = t_1$, y derivando la Ecuación II.20 en un tiempo $t = t_1$, se establece que:

$$X_1 = -d \frac{[(1-\cos(rt))\text{sen}(rt_1) + \text{sen}(rt)\cos(rt_1)]}{r} - \frac{2O_0 t_1}{mR} \quad \text{II.34}$$

Y para la segunda constante

$$Y_1 = -\frac{RO_0(1-s)}{EB} - \frac{O_0 t_1^2}{mR} - X_1 t_1 \quad \text{II.35}$$

Como lo indica la consideración de esta etapa de movimiento, continúa hasta que el tiempo o bien cuando la velocidad llega a cero donde:

$$T_1 = -\frac{mRX_1}{2O_0} \quad \text{II.36}$$

Obteniendo un desplazamiento máximo radial indicado por:

$$v_m = Y_1 - \frac{mRX_1^2}{4O_0} \quad \text{II.37}$$

II.5.3.4.- Cuarta etapa de movimiento $t \geq T_1$

A diferencia del estudio para un material elástico, en el que solamente se cuentan con tres etapas de movimiento, las cuales serían una carga, el punto máximo y por último la descarga, ahora como se cuenta no solo con una respuesta elástica, sino también se estudia su correspondiente plástico, es necesario utilizar cuatro etapas de movimiento, primero la carga en la zona elástica, segundo una carga dentro de la cedencia hasta el tiempo final, y finalmente es examinado. La

Ecuación II.12 indica la deformación elástica, pero se debe de observar con los cambios considerados en esta etapa que la deformación elástica es $\varepsilon = -\frac{(v_m - v)}{R}$ durante la descarga. Por lo tanto, la ecuación de equilibrio II.11, junto con la ecuación II.10 se convierte en:

$$m \frac{d^2}{dt^2} v - \frac{2 \left[\frac{O_0 + EB(v_m - v)}{(1-s)R} \right]}{R} = 0 \quad \text{II.38}$$

O bien:

$$\frac{d^2}{dt^2} v + r^2 v = f \quad \text{II.39}$$

Donde

$$f = \frac{2 \left[\frac{O_0 + EBv_m}{(1-s)R} \right]}{mR} \quad \text{II.40}$$

$$v = \left(v_m - \frac{f}{r^2} \right) (\cos(rt) + \text{sen}(rT_1)\text{sen}(rt)) + \frac{f}{r^2}, t \geq T_1 \quad \text{II.41}$$

Cuando se satisfacen las condiciones iniciales de desplazamiento coincidentes con el desplazamiento máximo, $v = v_m$, y una velocidad igual con cero, $\dot{v} = 0$, para un tiempo $t = T_1$. El desplazamiento radial mínimo v^* , ocurre en un tiempo $t = T_2$ cuando la velocidad es cero $\dot{v} = 0$, o

$$T_2 = T_1 + \frac{\pi}{r} \quad \text{II.42}$$

Y el desplazamiento radial mínimo asociado es:

$$v^* = -v_p + 2 \frac{\pi}{r^2} \quad \text{II.43}$$

El promedio final del desplazamiento radial es tomado como $v_p = \frac{f}{r^2}$, o

$$v_p = \frac{f}{r^2} \quad \text{II.44}$$

II.5.3.5.- Análisis del estado de energía

En este punto del estudio en el cual se analiza la energía, las ecuaciones empleadas anteriormente, considerando un material elástico, para las energías externas cinéticas y deformación para, siguen siendo validas, para determinar C_1 (II.23), U_1 (II.24) y E_T (II.26). Cuando inicialmente ocurre la cedencia plástica en el tiempo $t = t_1$ se genera la energía elástica de deformación calculada por $\frac{(4\pi R^2)(2O)\left(\frac{-v(t_1)}{R}\right)}{2}$, que cuando se aplica para la Ecuación II.14 se convierte en:

$$U_2 = \frac{4\pi EBv(t_1)^2}{1-s} \quad \text{II.45}$$

La energía cinética asociada en $t = t_1$ es:

$$C_2 = 2\pi m R^2 v(t_1)^2 \quad \text{II.46}$$

Donde $v(t_1)$ se encuentra derivando respecto al tiempo de la Ecuación II.20, con la evaluación de $t=t_1$. Es ahora relativamente sencillo mostrar que $C_2+U_2=E_T$, lo que es requerido para la conservación de la energía. La energía plástica disipada durante la tercer etapa de movimiento, donde $t_1 \leq t \leq T_1$, igual a $\frac{2O_0(4\pi m R^2)[-v_m+v(t_1)]}{R}$, o

$$\Lambda_3 = 8\pi O_0 R [v(t_1) - v_m] \quad \text{II.47}$$

Ahora, el radio a dimensional entre la energía elástica y total puede ser expresado como:

$$\alpha = \frac{U_2}{E_T} \quad \text{II.48}$$

En el cual si se utiliza la Ecuación II.26:

$$\alpha = \frac{1}{2\zeta^2(1-\cos(2m\psi_0))} \quad \text{II.49}$$

Donde

$$\psi_0 = \frac{rt}{2\pi} \quad \text{II.50}$$

Y

$$\zeta = \frac{p_0}{p_c} \quad \text{II.51}$$

Es un rango a dimensional ente la magnitud del pulso de la presión dinámica y la presión de colapso estático para un cascaron esférico, perfectamente plástico.

$$p_c = \frac{2O_0}{R} \quad \text{II.52}$$

El periodo de vibración de un cascarón elástico lineal es $T = \frac{2\pi}{r}$ por lo que $\psi_0 = \frac{r\epsilon}{2\pi} = \frac{\epsilon}{T}$ es un rango a dimensional entre la duración del pulso de presión rectangular y el periodo elástico natural. El rango entre la energía plástica absorbida y el total de la energía externa es

$$\beta = \frac{\Lambda_3}{E_T} \quad \text{II.53}$$

Mientras el radio entre las energías plástica a elástica es $\frac{\beta}{\alpha} = \frac{1}{\alpha} - 1$.

II.5.3.6.- Carga impulsiva

El análisis anterior permanece valido para una velocidad impulsiva de carga que satisfaga la Ecuación II.27, para un $p_0 \rightarrow \infty$ y $\epsilon \rightarrow 0$. La primer etapa de movimiento con duración ϵ por

consiguiente se desaparece, mientras que la duración de la segunda etapa en que ahora se convierte en la primer etapa para una carga impulsiva, para un $\epsilon \rightarrow 0$ y $p_0 \rightarrow \infty$

$$\text{sen}(rt_1) = -\frac{rv(t_1)}{W_0} \quad \text{II.54}$$

Donde de la sección en que se realiza la discusión de energía, para un material elástico, perfectamente plástico, se adquiere:

$$\psi_1 = \frac{rt_1}{2\pi} = \frac{t_1}{T} \quad \text{II.55}$$

Y es el periodo natural para un cascarón esférico elástico lineal, donde

$$L = \frac{mEBW_0^2}{2(1-s)O_0^2} \quad \text{II.56}$$

Es una energía cinética inicial a dimensional. La segunda y tercera etapa de movimiento, para un $\epsilon \rightarrow 0$ y $p_0 \rightarrow \infty$, es:

$$\frac{X_1}{W_0} = -\cos(2\pi\psi_1) - 2\pi\psi_1 L^{-1/2} \quad \text{II.57}$$

En consecuencia

$$T_1 = t_1 + \sqrt{L} * \left(\frac{T}{2\pi}\right) \cos(2\pi\psi_1) \quad \text{II.58}$$

Y

$$\frac{v_m}{v(t_1)} = 1 + \frac{L}{2} \cdot \cos^2(2\pi\psi_1) \quad \text{II.59}$$

Finalmente, se puede mostrar junto con la ayuda de la Ecuación siguiente que:

$$\frac{v_m}{v(t_1)} = \frac{(L+1)}{2} \quad \text{II.60}$$

II.6.- Sumario

En éste capítulo se muestra la relación existente entre impulso y cantidad de movimiento, uniendo estas dos definiciones: el impulso de la fuerza que actúa sobre una partícula en el intervalo de tiempo es igual a la cantidad de movimiento de la partícula en el mismo intervalo de tiempo y como ambos conceptos se relacionan con la segunda ley de *Newton*. También se busca indicar la reacción que se tiene dentro de las propiedades del material, al recibir la aplicación de un agente externo bruscamente. Las cargas de impacto físico se dividen en base a su severidad, se pueden ordenar en tres grupos: cargas de movimiento acelerado, cargas aplicadas bruscamente y cargas de impacto directo. Usando para ello un diagrama de cuerpo libre en el cual intenta ejemplificar, la deformación como un resorte, y la gradualidad de aplicación de una masa con un amortiguador, para explicar cómo se determina si una carga es estática o dinámica, de acuerdo a al tiempo de aplicación de la carga. Los cascarones son estructuras con superficies curva, su espesor es pequeño en comparación a las otras dimensiones que definen su superficie. Estos elementos se definen por la geometría de su superficie medía, la cual se encuentra a la mitad de la distancia entre las superficies exteriores. Los cascarones se pueden clasificar en base a la geometría de su superficie media como: curvatura *Gaussiana* de la superficie y superficies generadas, donde las superficies generadas se pueden sub-clasificar como superficies de revolución y superficies de traslación. El comportamiento de estos elementos está relacionado directamente con la geometría que éste posee, a pesar que las acciones internas que actúan en el son independientes de esta. Se puede puntualizar que en el límite inferior se tiene que en cualquier sistema de esfuerzos se puede generar a través de una estructura que se encuentra en equilibrio con las cargas aplicadas y si no rebasa la condiciones de cedencia, la estructura no colapsará, y para el límite superior, si el trabajo en el sistema de cargas aplicadas durante cualquier colapso cinemáticamente admisible, corresponde a la razón de disipación de energía interna, por lo que el sistema de cargas causará el colapso o el inicio de este dentro de la estructura. Por lo que, se debe entender el comportamiento estático del material, observar que cuando se somete a cargas dinámicas, se produce una respuesta inelástica, la energía es lo suficientemente grande para causar deformación permanente, para un análisis dinámico, se puede

Optimización por medio de análisis numérico de un casco para deporte de contacto

partir con las mismas simplificaciones y suposiciones. Para un análisis estático con comportamiento plástico; considerando que el material al recibir una carga dinámica, se fragiliza, lo que se puede interpretar como que la influencia elástica que involucran grandes deformaciones plásticas, cuando la energía dinámica total externa sea mucho mayor que la cantidad de energía que pueda recibir de manera totalmente elástica sea absorbida; si este es el caso se puede descartar la zona elástica en los problemas dinámicos, por decir se vuelve un material rígido.

II.7.- Referencias

- 1.- Martínez, J., *Mecánica Newtoniana*, Ed. Edicions UPC, pp 67, 2000.
- 2.- Bedford, A. y Fowler, W., *Dinámica; Mecánica para Ingeniería*. Ed. Pearson, 5 Edición, pp 225-225, 2008.
- 3.- González-López de Guereñu, F., Sánchez-Ruiz, M. y Solis-Fraile, R., *PCPI-Graduado Ámbito Científico-Tecnológico*, Ed. Editex, pp 170, 2010.
- 4.- Beer, F. P. y Johnston Jr., E. R., *Mecánica Vectorial para Ingenieros; Dinámica*, Ed. McGraw Hill, Sexta Edición, pp 693-695, 1998.
- 5.- Stronge, W. J., *Impact Mechanics*, Ed. Cambridge University Press, pp 1-2, 2004.
- 6.- Juninall, R. C. y Marshek, K. M., *Fundamentals of Machine Component Design*, 3^a Edición, Ed. John Wiley and Sons Inc, pp 275-277, 2000.
- 7.- Salán, M., *Tecnología de Procesos y Transformación de Materiales*, Ed. Edicions UPC, pp 39, 2005.
- 8.- Dowling, N. E., *Mechanical Behavior of Materials; Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*, Ed. Prentice Hall, pp 3-4, 1993.
- 9.- Chronowicz, A., *Diseño de Cascarones*, Ed. Continental, pp 12-17, 1961.
- 10.- Goldenverizer, A., *Teoría de los Cascarones Elásticos Delgados*, Ed. Continental, pp 147-153, 1963.
- 11.- Heyman, J., *Esqueleto de Piedra, Mecánica de la Arquitectura de Fabrica*, Ed. Cambridge University press, pp 87-88, 1995.
- 12.- Hodge, P. G., *Limit Analysis of Rotationally Symmetric Plates and Shells*, Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp 9-14, 1963.
- 13.- Venkatraman, B. y Patel, S. A., *Structural Mechanics With Introductions to Elasticity and Plasticity*, Ed. McGraw Hill, pp 54, 1970.

-
- 14.- Horne, M. R., *Plastic Theory of Structures*, Ed. Pergamon Press, pp 129-130, 1979.
 - 15.- Drucker, D. C., A more fundamental approach to plastic stress-strain relations, *Proceedings First US Congress of Applied Mechanics*, ASME, pp 487-491, 1995.
 - 16.- Dalmau, M. y Vilardell, J., *Análisis Plástico de Estructuras*, Ed. Edicions UPC, pp 85-91, 2003.
 - 17.- Hodge, P. G., *Plastic Analysis of Structures*, Ed. R. E. Krieger Pub. Co., pp 92, 1981.
 - 18.- Jones, N., *Structural Impact*, Ed. Cambridge University Press, pp 62-65, 1989.
 - 19.- Hodge, P. G., *Limit Analysis of Rotationally Symmetric Plates and Shells*, Ed. Prentice-Hall, pp 94-130, 1963.
 - 20.- Baker, W. E., The elastic-plastic response of thin spherical shells to internal blast loading, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 27, No. 1, pp 139-144, 1960.



CAPÍTULO III

ANÁLISIS DEL CASCO ACTUAL

III.1.- Generalidades.

La mecánica de medios continuos es una rama de la física que propone un modelo unificado para sólidos deformables, sólidos rígidos y fluidos. El término medio continuo se usa tanto para designar un modelo matemático, como cualquier porción de material cuyo comportamiento se puede describir adecuadamente por ese modelo. La mecánica de los sólidos deformables estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos deformables ante diferentes tipos de situaciones como la aplicación de cargas o efectos térmicos. Estos comportamientos, más complejos que el de los sólidos rígidos, se estudian en mecánica de sólidos deformables introduciendo los conceptos de deformación y de tensión. Una aplicación típica de la mecánica de sólidos deformables es determinar a partir de una cierta geometría original de sólido y unas fuerzas aplicadas sobre el mismo, si el cuerpo cumple ciertos requisitos de resistencia y rigidez. Para resolver ese problema, en general es necesario determinar el campo de tensiones y el campo de deformaciones del sólido. [III.1].

Los esfuerzos se miden indirectamente por medio de las deformaciones que sufre el material, el concepto de esfuerzo es necesario y útil para la ingeniería, la ciencia y la tecnología.

El estado general del esfuerzo /deformación se describe matemáticamente por las matrices de esfuerzo y matrices de deformación y según sea la naturaleza del material su comportamiento se describe usualmente por graficas esfuerzo deformación, donde el material caracterizado así, presenta diferentes regiones elásticas, plásticas y puntos característicos muy útiles para el diseño mecánico. En particular, son útiles las regiones lineales elásticas definidas por los módulos de *Young* que cumplen con la ley de *Hooke*, así como regiones elásticas posibles que no cumplen esta linealidad, los puntos de fluencia y puntos de ruptura muy utilizados en aplicaciones de diseño en ingenierías. La resistencia del material no es el único parámetro que debe utilizarse al diseñar o analizar un elemento mecánico; controlar las deformaciones para que el elemento cumpla con el propósito para el cual se diseñó tiene la misma o mayor importancia. El análisis de las deformaciones se relaciona con los cambios en la forma del elemento que generan las cargas aplicadas. Un concepto muy útil es el denominado Deformación Unitaria, el cual relaciona la deformación respecto a las dimensiones originales. La unidad utilizada se conoce como Microdeformación [III.2].

III.2.- Introducción al Método del Elemento Finito.

Existe un gran número de problemas reales de Ingeniería para los cuales no se puede obtener una solución que se acerque a la realidad. Esto puede deberse a la complejidad de las ecuaciones diferenciales que lo gobiernan o bien las dificultades con las condiciones que intervienen con este. Para éste tipo de problemas se puede auxiliar con aproximaciones numéricas. El método del elemento finito (*MEF*), es una técnica de análisis numérico para obtener soluciones aproximadas para una amplia variedad de problemas de ingeniería que involucran esfuerzos, transferencia de calor, fluido, etc. El método del elemento finito se apoya en la discretización de un dominio, en un gran número de elemento y así poder obtener la solución. Básicamente un problema puede ser dividido en sub-problemas y su solución es obtenida mediante la unión de cada una de las soluciones de estos sub-problemas, esto es logrado mediante la división de la geometría a analizar en un gran número de formas simples [III.3].

El *MEF*, consiste en dividir mediante una malla el objeto de estudio en componentes geoméricamente homogéneos, a lo que se le conoce con el nombre de *elementos* [III.4], los cuales representan el *dominio* y conectan a los *nodos* [III.5], los nodos son puntos donde se ubican las variables de cálculo, por ejemplo si a cada nodo se le introduce un vector de desplazamiento, al realizar el estudio se genera una dirección y dimensión del desplazamiento en cada nodo, y mediante la unión de los elementos se conoce el desplazamiento total del objeto a estudio. Los vectores de desplazamiento en cada nodo se conocen como *grados de libertad* [III.6], en caso de utilizar tres dimensiones, se puede tener desplazamiento horizontal, vertical y longitudinal, y a su vez cada plano puede tener una componente de giro en su propio eje. De esta manera se pueden ingresar distintas variables a cada nodo, ya sean de desplazamiento, acción de una fuerza, presión, velocidad, contacto, etc., y con esta información cada nodo genera ecuaciones particulares que serán resueltas, para después unir las y generar el estudio del cuerpo en su totalidad.

III.2.1.- Introducción al Método del Elemento Finito. [III.7]

El empleo de métodos de discretización y aproximación numérica para la obtención de soluciones es conocido desde tiempos antiguos. Los egipcios utilizaban métodos de discretización para calcular el volumen de las pirámides. *Arquímedes*, de igual manera, usaba este principio para

calcular áreas y volúmenes, por otro lado en oriente, el matemático *Liu Hui* hacia uso de un polígono regular para calcular longitudes de circunferencias.

El desarrollo de este método como se conoce hoy en día ha estado ligado a lo hecho por *Courant* en los años 40. Donde propone el uso de funciones polinómicas para la formulación en subregiones triangulares para la aproximación de soluciones. No fue hasta el trabajo presentado por *Turner, Clough, Martin y Topp* donde introdujeron la aplicación de elementos finitos simples como barras y placas triangulares, con la aplicación de cargas, para realizar el análisis de estructuras aeronáuticas en donde se utilizó formalmente el término de discretización. Las herramientas computacionales han aportado un medio eficaz para la aplicación de éste método, ya que la unión de métodos de análisis con las técnicas de diseño y fabricación permite la realización de un diseño más confiable.

III.2.2.- Generalidades del método

En cualquier sistema analizar por este método se puede definir 3 aspectos:

- Dominio.- Es el espacio geométrico donde se analizará el problema.
- Condiciones de frontera.- Son todas las variables conocidas y que afectan al sistema que se realizara. Estas pueden ser cargas, desplazamientos, temperatura, etc.
- Incógnitas.- Son las variables que se desean conocer después de la aplicación de las condiciones de carga y frontera.

La idea principal de este método, parte de la división de un elemento continuo en un conjunto de pequeños elementos dependiendo de la naturaleza física del problema, pueden ser líneas, áreas o volúmenes. Cada elemento es identificado por el número de nodos que es definido por una secuencia global de números de nodos. (Figura III.1)

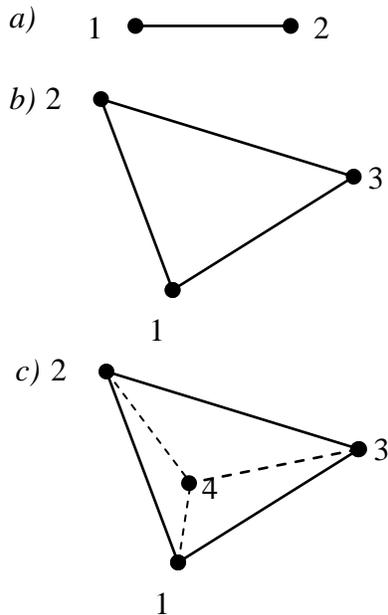


Figura III.1.- Descripción de elementos. a) Línea. b) Área. c) Volumen.

Los elementos están interconectados por una serie de puntos llamados nodos, éstos especifican la localización de coordenadas en el espacio donde los grados de libertad y acciones del problema físico existen. Sobre estos nodos se evalúan las incógnitas fundamentales del problema. En elementos estructurales, estas incógnitas son los denominados desplazamientos nodales, ya que a partir de estos se pueden calcular las incógnitas restantes como tensiones, deformaciones unitarias, etc. También son denominadas grados de libertad, los cuales determinan el estado y/o posición del nodo, dependiendo del problema estudiado, estos grados de libertad pueden ser

- Desplazamientos.
- Temperatura.
- Presión.
- Velocidad.
- Potencial eléctrico.
- Potencial magnético.

III.2.3.- Procedimiento de análisis por el método de elemento finito [III.8]

Aunque el procedimiento del *MEF* puede variar dependiendo del problema y de la solución, las etapas básicas involucradas en cualquier análisis son similares y consisten en:

III.2.4.- Fase de Pre-procesamiento

En esta fase se define la geometría, las propiedades de los materiales que estarán en el modelo, el tipo de elemento a utilizar, así como el tipo de análisis a realizar. Posterior a esto se prosigue con los siguientes aspectos:

- Desarrolla y discretiza el dominio en nodos y elementos, se selecciona el más apropiado para el análisis, ya que en la variación del tamaño y el tipo son primordiales para la solución del problema. La discretización es la parte fundamental del método, ya que la precisión del resultado dependerá de los detalles de esta.
- Se asume una función de forma para representar el comportamiento físico de un elemento.
- Se desarrollan las ecuaciones para el elemento las cuales se obtiene utilizando los principios teóricos disponibles. Estas ecuaciones describen la relación entre los grados de libertad y los parámetros nodales para el elemento.
- Se unen los elementos para representar el problema en su totalidad.
- Finalmente, se aplican las condiciones de carga y de frontera, las últimas son las restricciones o soportes que puedan existir en el problema. Dichas condiciones comúnmente especificadas en valores conocidos.

III.2.5.- Fase de solución

Durante esta fase se permite aplicar las condiciones de carga y frontera. Con el modelo ya generado se procede a obtener la solución deseada al problema planteado. Durante esta fase se:

- Resuelve una serie de ecuaciones algebraicas lineales y no lineales de una manera simultánea para obtener una solución nodal, como lo puede ser valores de desplazamiento o temperatura.

III.2.6.- Fase de post-procesamiento

En esta fase se tienen las herramientas necesarias para mostrar los resultados, los cuales se puede mostrar en forma de gráficas y/o animaciones. También generar análisis posteriores al modelo, tales como una secuencia de carga y descarga y la obtención de información adicional como esfuerzos principales, transferencia de calor, etc.

III.2.7.- Aplicaciones del Método de Elemento Finito [III.9]

El *MEF* puede ser utilizado para resolver cualquier problema en varias áreas de ingeniería como mecánica d sólidos, de fluidos, térmicos e incluso análisis estáticos y dinámicos. Los problemas que pueden ser resueltos por este método se pueden dividir en de equilibrio, de valor propio y transitorios. Los problemas de equilibrio generalmente son estables, es decir, las condiciones de frontera y cargas aplicadas no cambian conforme al tiempo, algunos problemas típicos son:

- Análisis estático de vigas, placas, carcasas, puentes y estructuras de concreto.
- Distribución de temperatura en sólidos y fluidos.
- Análisis de esfuerzos en recipientes sujetos a presión, materiales compuestos y cualquier componente mecánico.

Los problemas de valor propio de igual manera son estables, sin embargo incluyen la estimación de los modos de vibración y las frecuencias naturales en solidos:

- Frecuencia natural y estabilidad en estructuras.
- Frecuencias naturales y estabilidad en aeronaves.

En los problemas transitorios, el *MEF* estudia problemas de propagación en medios continuos con respecto al tiempo:

- Propagación de esfuerzos, respuesta de las estructuras a cargas periódicas.
- Respuesta de aeronaves a cargas súbitas, así como su respuesta dinámica.
- Transferencia de calor, análisis de motores a combustión interna, turbinas, etc.
- Mecánica de la fractura bajo cargas dinámicas.

III.2.8.- Ventajas y limitaciones del MEF [III.10]

Aunque este método puede aplicar a casi cualquier problema, no quiere decir que se la única solución. Existe un gran número de métodos numéricos disponibles. Sin embargo, dependiendo de la complejidad del problema se debe hacer la selección del método correcto. Tiene numerosas ventajas sobre otros métodos numéricos, Algunas de estas son:

- Este método es aplicable a cualquier problema real como análisis de esfuerzos, de fluidos, de transferencia de calor, etc...
- No existen restricciones a cerca de la geometría, se puede utilizar prácticamente cualquier geometría compleja.
- No hay restricciones en la aplicación de las condiciones de frontera.
- Se pueden analizar materiales isotrópicos, ortotrópicos, así como compuestos.
- La precisión deseada puede ser obtenida con la implementación de una malla que se adapte a las necesidades del diseñador.
- Existe una gran variedad de programas computacionales que ayudan en la aplicación de este método numérico, como son *ANSYS*, *NISA*, *ABAQUS*, *ALGOR*, por mencionar algunos.

Algunas limitaciones del MEF son:

- La solución obtenida puede ser utilizada para un solo problema específico.
- Una gran cantidad de datos es requerida.
- Generalmente se tiene que analizar una gran cantidad de resultados.
- La experiencia, un buen juicio ingenieril y un entendimiento del problema físico son requeridos para el modelado en el MEF.
- Una pobre selección del elemento o la discretización puede llevar a resultados erróneos.

III.3.- Modelado de casco.

Hoy en día las herramientas computacionales son de gran ayuda e importancia en el diseño de elementos ya sean mecánicos o de arquitectura, por mencionar algunos. La principal finalidad de las herramientas de Diseño Asistido por Computadora (*CAD* por sus siglas en inglés) es la de desarrollar, analizar y optimizar el diseño dentro de la Ingeniería. Normalmente éste tipo de programas proporciona al usuario una interfaz gráfica que permite introducir y manipular objetos geométricos en 2 y 3 dimensiones [III.11].

El uso de estos programas ayuda a la reducción de tiempo. Incrementa la productividad ya que el realizar un dibujo en cualquier programa computacional de dibujo resulta ser hasta 3 veces más rápido que la forma convencional. El poder realizar un diseño tridimensional permite una mayor visualización del componente. Se utilizan los diseños y se aumenta la precisión en el dibujo permitiendo así la eliminación de la mayoría de los prototipos.

El programa *CAD* seleccionado para modelar el casco seleccionado fue *SolidWorks*[®] 2015, en éste programa computacional se pueden generar de manera sencilla dibujos en *2D* y *3D*.

Con la finalidad de realizar el estudio numérico y poder establecer el comportamiento de un casco en condiciones de impacto, es necesario configurar el modelo lo más cercano a la realidad en cuanto a dimensiones y espesores. Para ello se tomó como base un casco *Schutt Advantage*[®], talla *XL* y modelo 2010 (Figura III.2)



Figura III.2.- Casco *Schutt Advantage*[®]

1. Se desarma por completo el casco, quitando la barra y los gajos del amortiguamiento para dejar sólo la carcasa del mismo (Figura III.3).



Figura III.3.- Carcasa

2. Se toman medidas del casco, haciendo un bosquejo del mismo (Figura III.4).

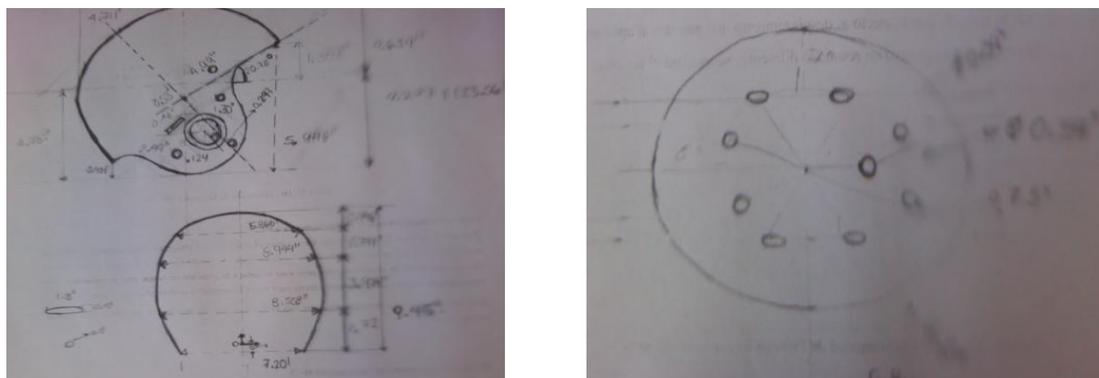


Figura III.4.- Bosquejo y medidas de la carcasa

3. En el programa *SolidWorks*, en un documento nuevo se comienza a realizar el modelado, iniciando por el contorno lateral (Figura III.5a) y el contorno frontal (Figura III.5b).

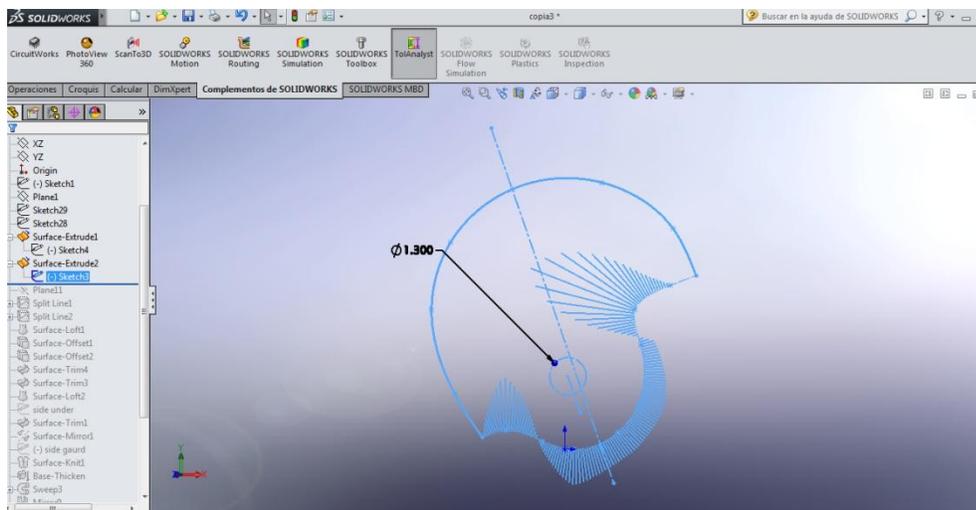


Figura III.5a.- contorno lateral del casco

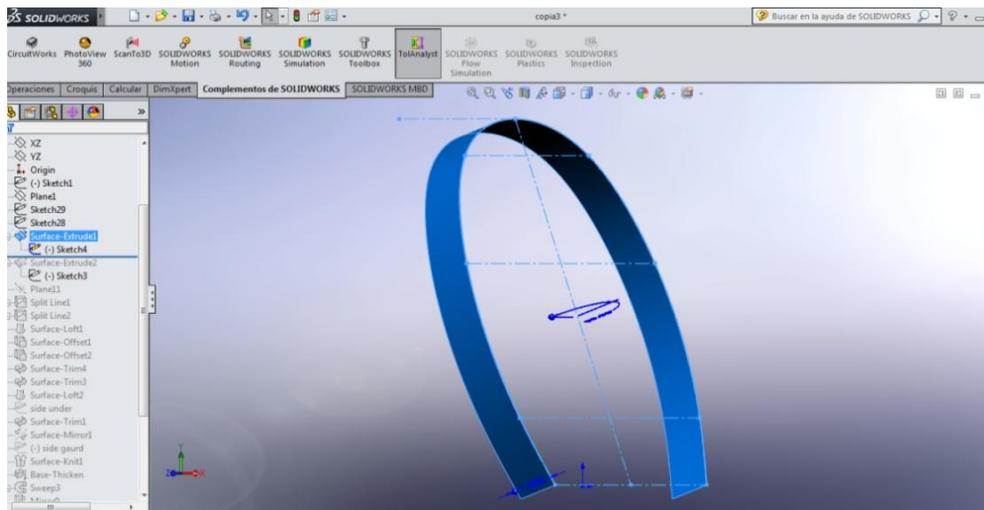


Figura III.5b.- vista frontal del casco

4. Así como, teniendo en consideración los dos contornos entre-cruzados (Figura III.6), se unen con superficies para recubrir los contornos.

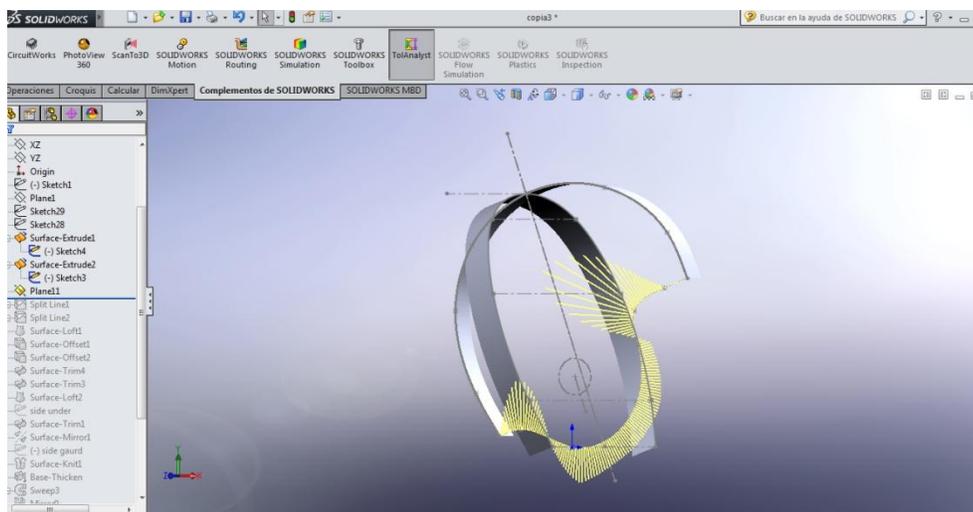


Figura III.6.- Contornos montados

5. Para generar el cascaron (carcasa) del casco (Figura III.7a) se desarrolla la superficie completa del casco (Figura III.7b) comenzando por las secciones laterales.

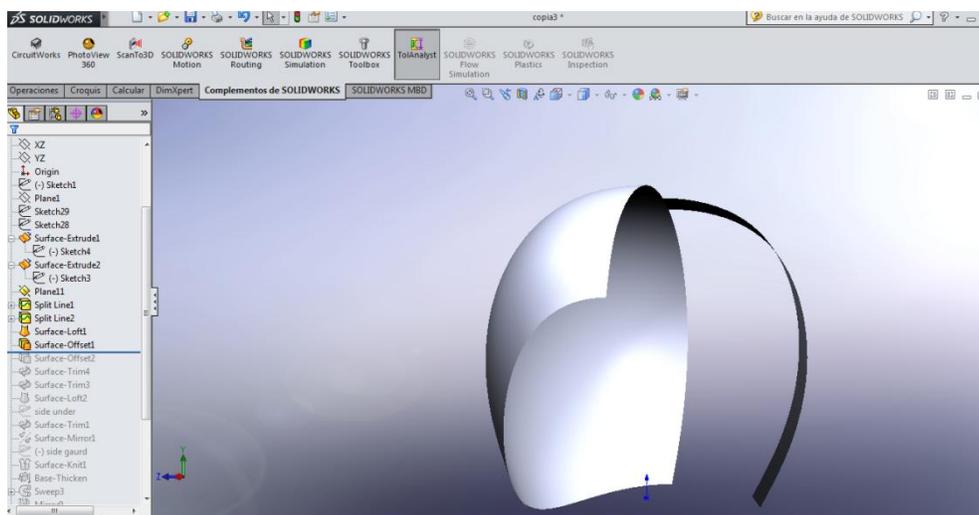


Figura III.7a.- Se genera el contorno lateral como una chapa

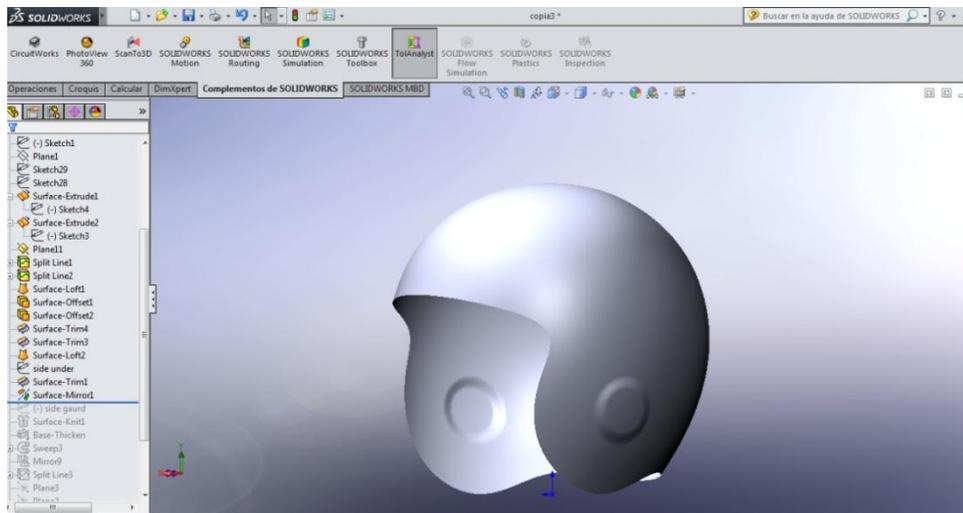


Figura III.7b.-cascarón terminado, sin espesor

Se da el espesor y se termina el modelado (Figura III.8), guardándola con la extensión *parasolid* (*.x_t).

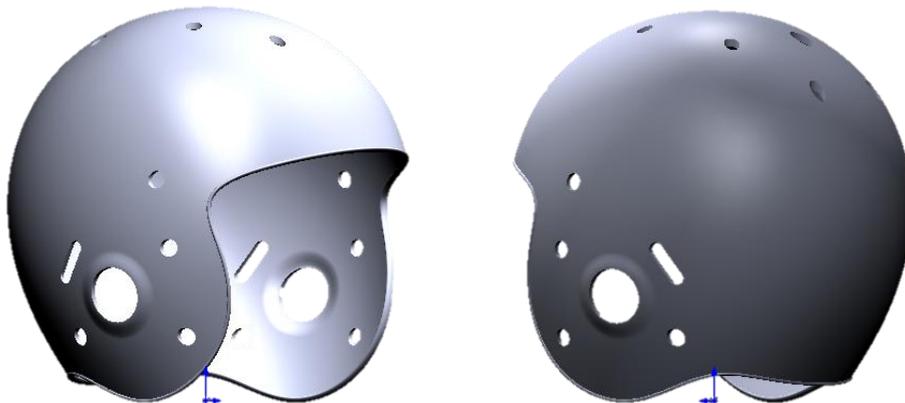


Figura III.8.- Casco terminado

III.4.- Particularidades del estudio

La principal particularidad del estudio, es el ser dinámico, por tratarse de un impacto, para lo cual se explica la metodología usada.

1. Dentro del programa *ANSYS WORKBENCH 15.0*[®], se seleccionan la unidades del proyecto, en el menú *unidades* seleccionar el sistema métrico (kg, m, s, °C, A, N, V).
2. Seleccionar *Explicit Dynamic* (Dinámico Explícito)

3. En el menú, seleccionar *Engineering Data* (datos de Ingeniería) e introducir las propiedades del policarbonato seleccionando new material (material nuevo) dando el nombre de casco, en las *Physical Properties* (propiedades físicas), seleccionar densidad y dar el valor 1200 kg/m^3 . Seleccionar *Isotropic Elasticity* (Isotrópico Elástico) y anotar el módulo de Young $2.28 \times 10^9 \text{ Pa}$ y una relación de Poisson de 0.37. Seleccionar dentro del menú *Plasticity*, la opción *Bilinear Isotropic Hardening* (endurecimiento isotrópico bilinear) un esfuerzo de cedencia de $6.5 \times 10^7 \text{ Pa}$ y un módulo tangente de 0.
4. Dados de alta las propiedades del material del casco, en el módulo *Design Modeler* (diseño y modelado) se importa la geometría del casco seleccionando su ubicación, se verifica que se haya importado correctamente.
5. Se selecciona el módulo *Model* (modelo), al abrir el modulo se carga la geometría por default (Figura III.9), se le asigna el material *Casco* previamente establecido y se procede a realizar un mallado automático.
6. Para introducir las condiciones dinámicas del estudio, dentro del submenú *Initial Conditions* (condiciones iniciales) se introduce la velocidad del casco 9.3 m/s [III.12] en el eje X y en los ajustes del análisis se introduce un tiempo final de 0.001 s . (Figura III.10).
7. Con el fin de restringir los movimientos del modelo, se selecciona en la barra de herramientas *Supports* (soportes), en el submenú se selecciona *Fixed Support* (soporte fijo) y se selecciona la parte interior del casco para simular la sujeción de la cabeza. (Figura III.11).

Outline of Schematic A2: Engineering Data			
	A	B	C
1	Contents of Engineering Data		source
2	Material		
3	Casco		

Properties of Outline Row 4: Casco			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	1200	kg m^{-3}
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's ...	
5	Young's Modulus	$2.28\text{E}+09$	Pa
6	Poisson's Ratio	0.37	
7	Bulk Modulus	$2.9231\text{E}+09$	Pa



Figura III.9.- Asignación del material a la geometría

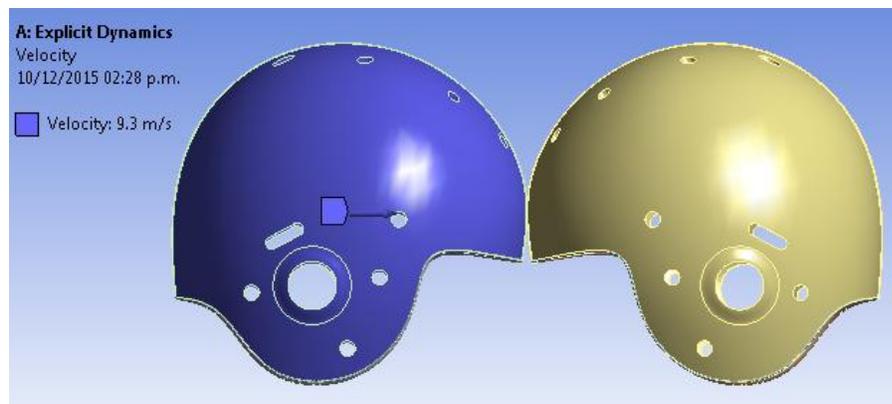


Figura III.10.- Condiciones para el impacto frontal

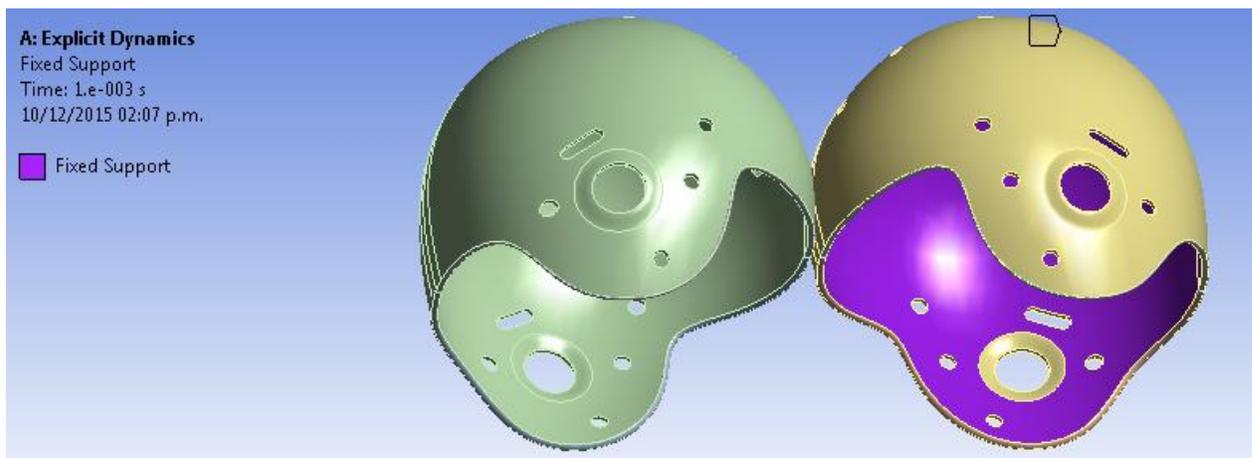


Figura III.11.- Asignación de los soportes del modelo

III.4.1.- Obtención de resultados

Para la obtención de resultados se utiliza el módulo de mecánica, observando tres casos de estudio los cuales son; impacto frontal, impacto frontal oblicuo y lateral. Por ser estos los más comunes, entre dos cascos del mismo material, seleccionando los siguientes parámetros a evaluar:

1. Desplazamiento total.
2. Esfuerzo von Mises.
3. Esfuerzo cortante.
4. Deformación plástica.
5. Esfuerzo cortante máximo.

III.5.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal

A continuación se desarrollan los análisis numéricos.

III.5.1.- Desplazamiento total *D*

Indica el primer momento en el que impactan los cascos, desde el momento en que inician el contacto, hasta el punto en que el desplazamiento llega a observarse físicamente.

Tabla III.1.- Valores para el desplazamiento total, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m)	Máximo (m)
0.00000	0	0.0000000
0.00005	0	0.0004710
0.00010	0	0.0009530
0.00015	0	0.0014796
0.00020	0	0.0019721
0.00025	0	0.0024964
0.00030	0	0.0030594
0.00035	0	0.0036378
0.00040	0	0.0041555
0.00045	0	0.0046992
0.00050	0	0.0053249
0.00055	0	0.0058805
0.00060	0	0.0064924
0.00065	0	0.0069941
0.00070	0	0.0073662
0.00075	0	0.0078009
0.00080	0	0.0081690
0.00085	0	0.0087300
0.00090	0	0.0092889
0.00095	0	0.0098684
0.00100	0	0.0104490

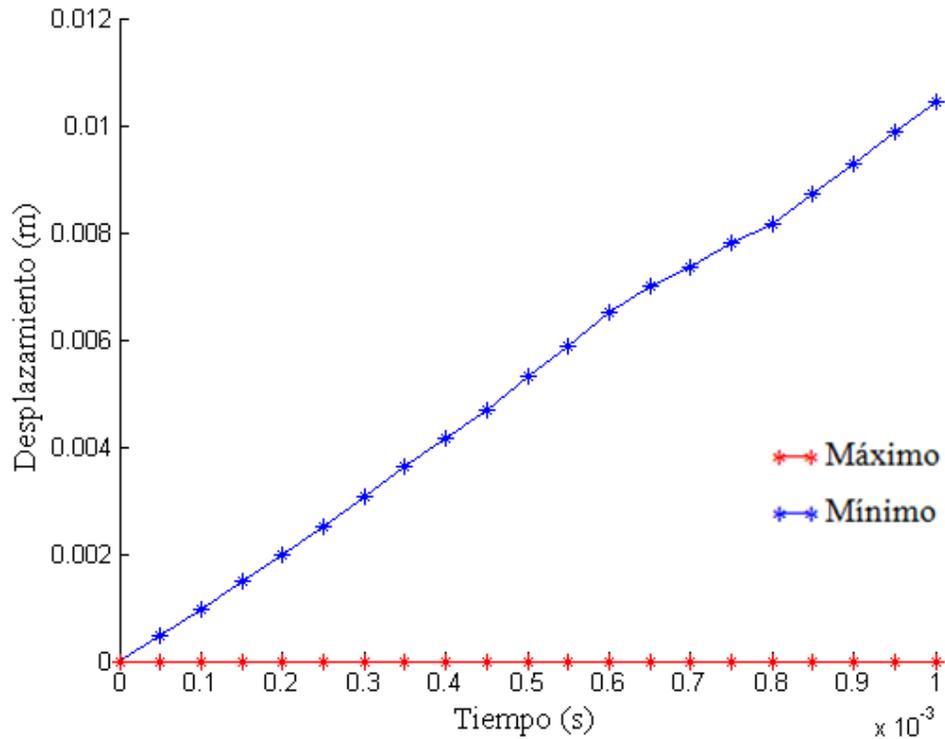


Figura III.12.- Valores del desplazamiento total, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

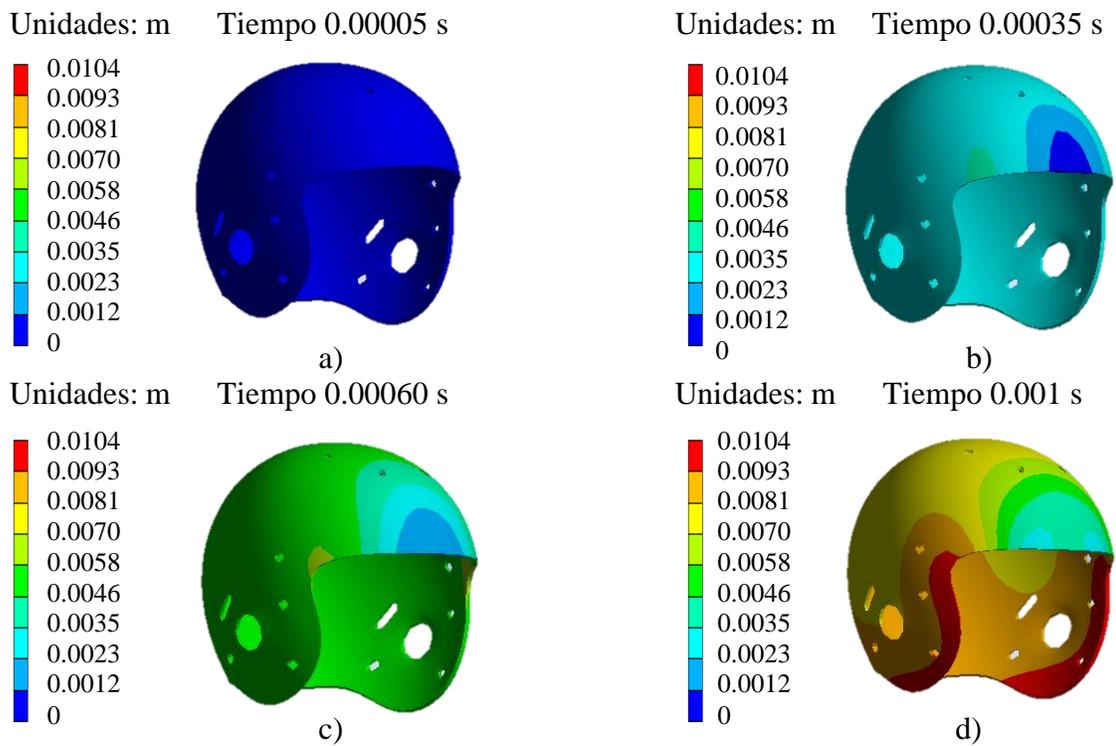


Figura III.13.- Ejemplificación gráfica del desplazamiento en los intervalos de tiempo a) 0.00005 s, 0.00047 m. b) 0.00035 s, 0.0036 m. c) 0.0060 s, 0.0064 m. d) 0.001s, 0.010 m.

Si se observa la Tabla III.1 y en la Figura III.10, se aprecia que el desplazamiento no es completamente lineal, se puede decir que el casco por su estructura, resiste el impacto, por lo cual se desplaza de forma inconstante, en la Figura III.10a, se puede observar el casco sin ningún desplazamiento en un tiempo cero, en la Figura III.10b se observa un primer contacto, el cual no es considerable. En la Figura III.10c, se aprecia ya el impacto y el primer desplazamiento, en la Figura III.10d, se observa el desplazamiento que sufre el casco, el cual se dan en las partes laterales.

III.5.2.- Esfuerzo von Mises (σ)

Dentro de la falla del material se debe considerar el esfuerzo von Mises a tensión, observando el máximo punto de éste para considerar de importancia su acción.

Tabla III.2.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo(MPa)
0.00000	0.00000	0
0.00005	0.00000	26.107
0.00010	0.00000	18.231
0.00015	0.00000	19.532
0.00020	0.00000	32.386
0.00025	0.00000	20.042
0.00030	0.00000	20.535
0.00035	0.00000	19.051
0.00040	0.00000	25.634
0.00045	0.00000	22.269
0.00050	0.00000	21.458
0.00055	0.00000	24.155
0.00060	0.00000	27.566
0.00065	0.00000	29.443
0.00070	0.00000	30.453
0.00075	0.00003	32.527
0.00080	0.00002	33.981
0.00085	0.00005	34.924
0.00090	0.00003	36.316
0.00095	0.00007	38.895
0.00100	0.00004	38.770

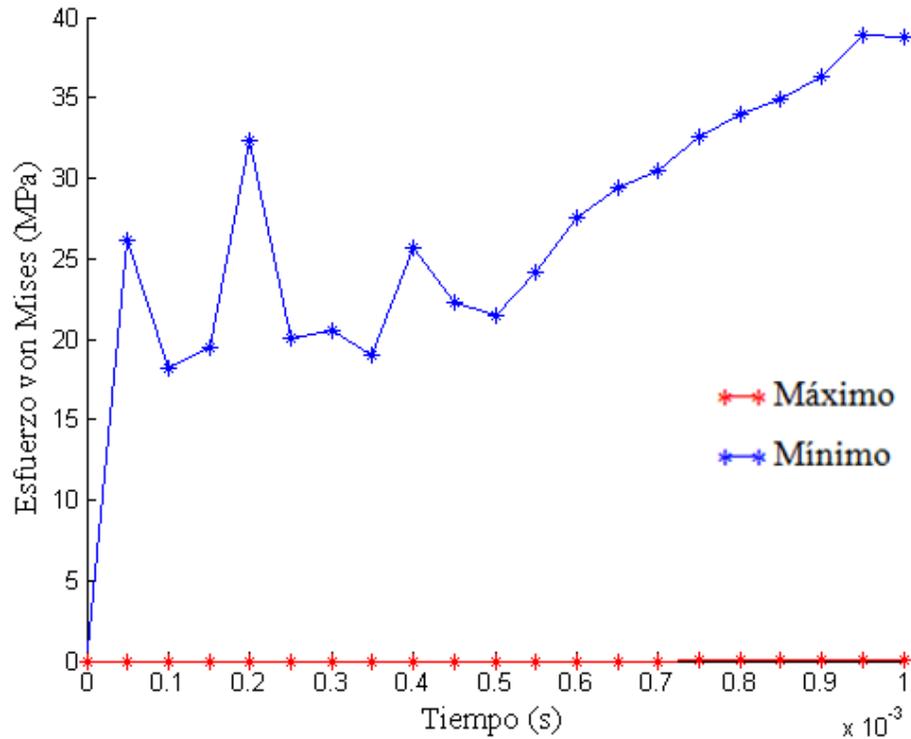


Figura III.14.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.

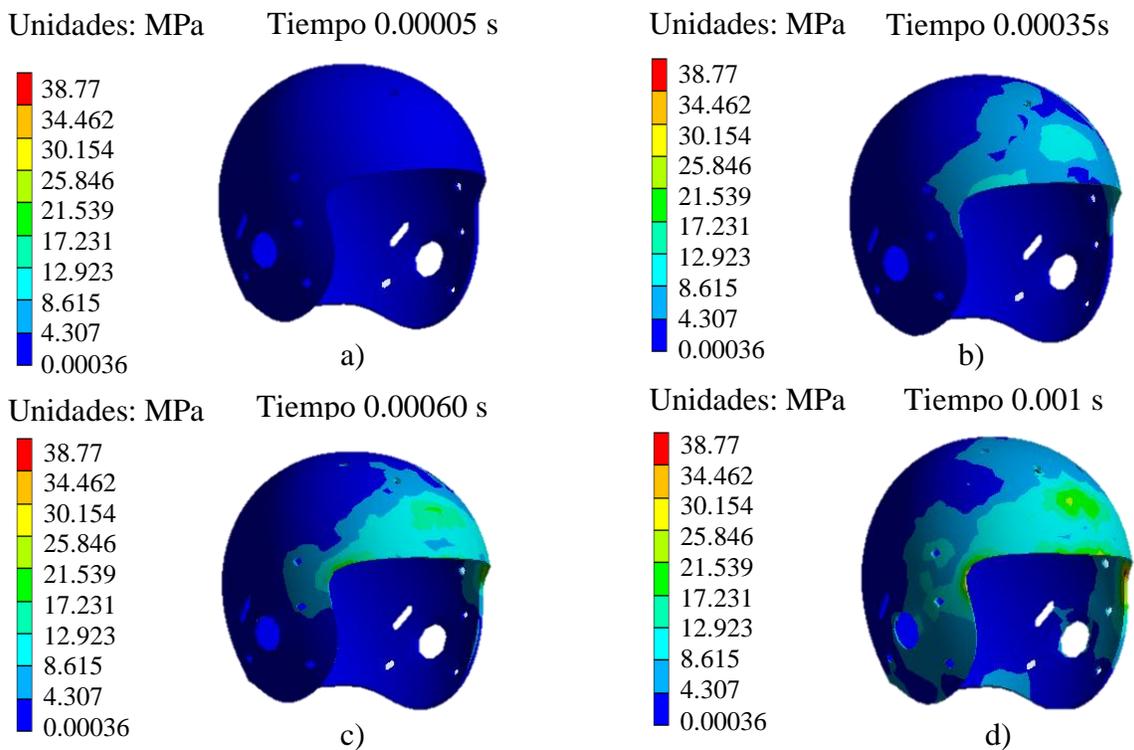


Figura III.15.- Ejemplificación gráfica de los valores del esfuerzo von Mises. a) 0.00005s, máx. 26.10 MPa, b) 0.00035s, máx. 19.05 MPa. c) 0.00060s, máx. 27.56 MPa. d) 0.001s, min 0.00004 MPa, máx. 38.77 MPa.

Los valores presentados en la Figura III.12a, indican valores de esfuerzos a tensión de 26.10 MPa. En la Figura III.12d, se observa el final del tiempo que dura el impacto teniendo un esfuerzo a tensión de 38.77 Mpa. Por otro lado en la Figura III.14, muestra la constancia de los esfuerzos a compresión, pero existe un pico súbito en los esfuerzos a tensión en el tiempo 0.00020s de 32.38 MPa, para luego experimentar una caída, para luego incrementarse nuevamente hasta los 38.895 MPa casi al final del impacto.

III.5.3.- Esfuerzo cortante (τ)

Con el fin de observar de qué tipo de esfuerzo es al que cede el material, se analizan los esfuerzos cortantes, que indican el comportamiento tanto a tensión como a compresión del material sujeto a impacto, se muestran los resultados en el plano XY por ser el más crítico.

Tabla III.3.- Valores para el esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	-3.6463	4.0685
0.00010	-5.6468	4.3857
0.00015	-4.6455	6.3100
0.00020	-8.4520	6.7855
0.00025	-3.8225	4.7759
0.00030	-6.1435	5.4892
0.00035	-8.1109	5.0538
0.00040	-11.579	6.0491
0.00045	-10.688	5.7418
0.00050	-8.1934	7.7087
0.00055	-10.357	6.3739
0.00060	-7.8730	6.4490
0.00065	-8.8445	6.6139
0.00070	-11.797	6.8662
0.00075	-9.4691	7.2229
0.00080	-9.7838	7.2814
0.00085	-9.9817	7.3387
0.00090	-11.212	7.2545
0.00095	-10.642	8.7388
0.00100	-12.166	6.8548

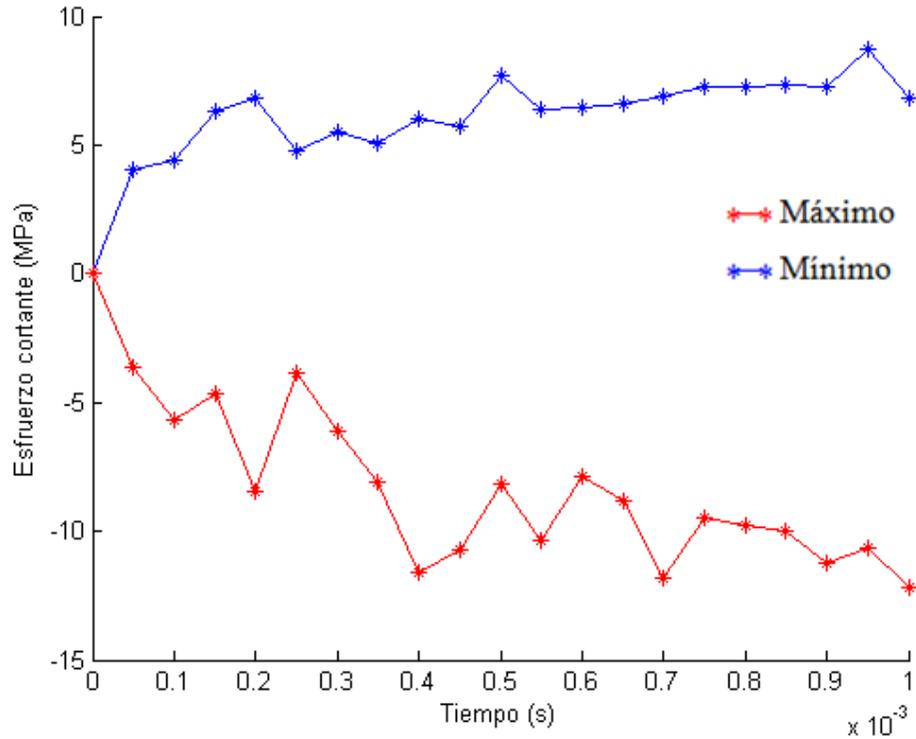


Figura III.16.- Valores para el esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.

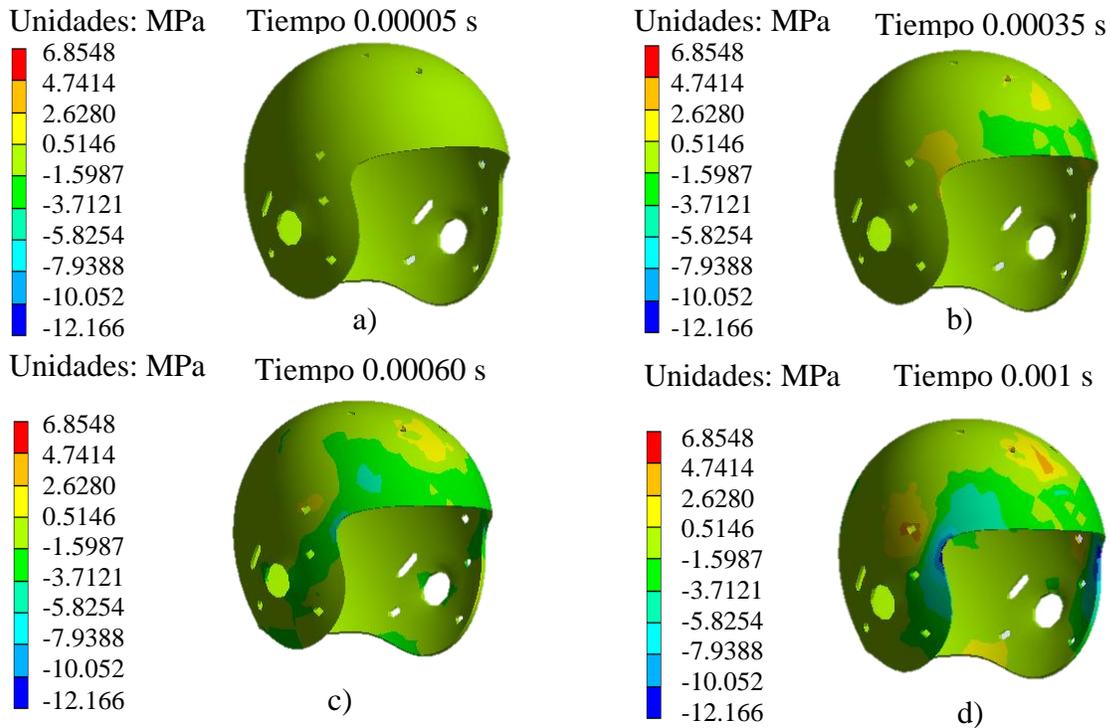


Figura III.17.- Ejemplificación gráfica de los esfuerzos cortantes máximos y mínimos. a) -3.646 MPa, 4.068 MPa, al principio del impacto. b) -8.110 MPa, 5.053 MPa, c) -7.873 MPa, 6.449 MPa y d) -12.166 MPa, 6.854 MPa al final del impacto.

En la Figura III.16, se puede observar que los valores se suceden de manera constante tanto en tensión como a compresión, se puede determinar que la estructura del casco no falla por el trabajo de los esfuerzos cortantes.

III.5.4.- Deformación plástica (D_p)

Ya que se está considerando la zona elástica, así como la plástica del material, recordando que en las cargas de impacto se tiene un comportamiento frágil del material debido a lo súbito de la carga, se usa el análisis del equivalente plástico la deformación del material.

Tabla III.4.- Valores para la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m/m)	Máximo (m/m)
0.00000	0	0.000000
0.00005	0	0.000000
0.00010	0	0.000000
0.00015	0	0.000000
0.00020	0	0.000000
0.00025	0	0.000000
0.00030	0	0.000000
0.00035	0	0.000000
0.00040	0	0.000000
0.00045	0	0.000000
0.00050	0	0.000000
0.00055	0	0.000000
0.00060	0	0.000000
0.00065	0	0.000000
0.00070	0	0.000000
0.00075	0	0.000000
0.00080	0	0.000000
0.00085	0	0.000023
0.00090	0	0.000930
0.00095	0	0.001523
0.00100	0	0.002280

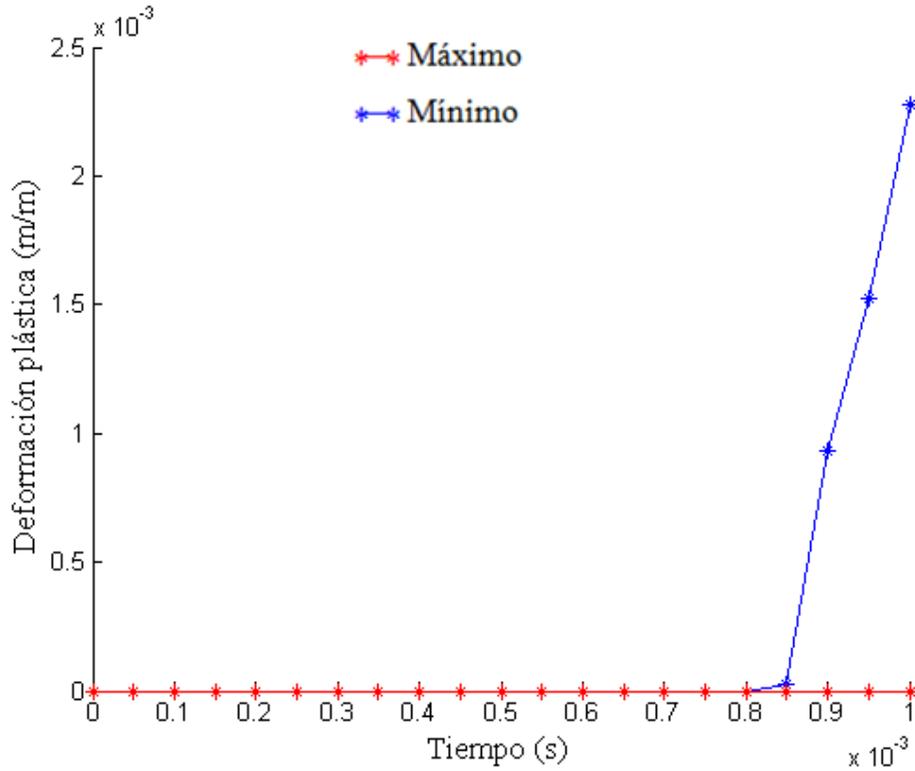


Figura III.18.- Valores para la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

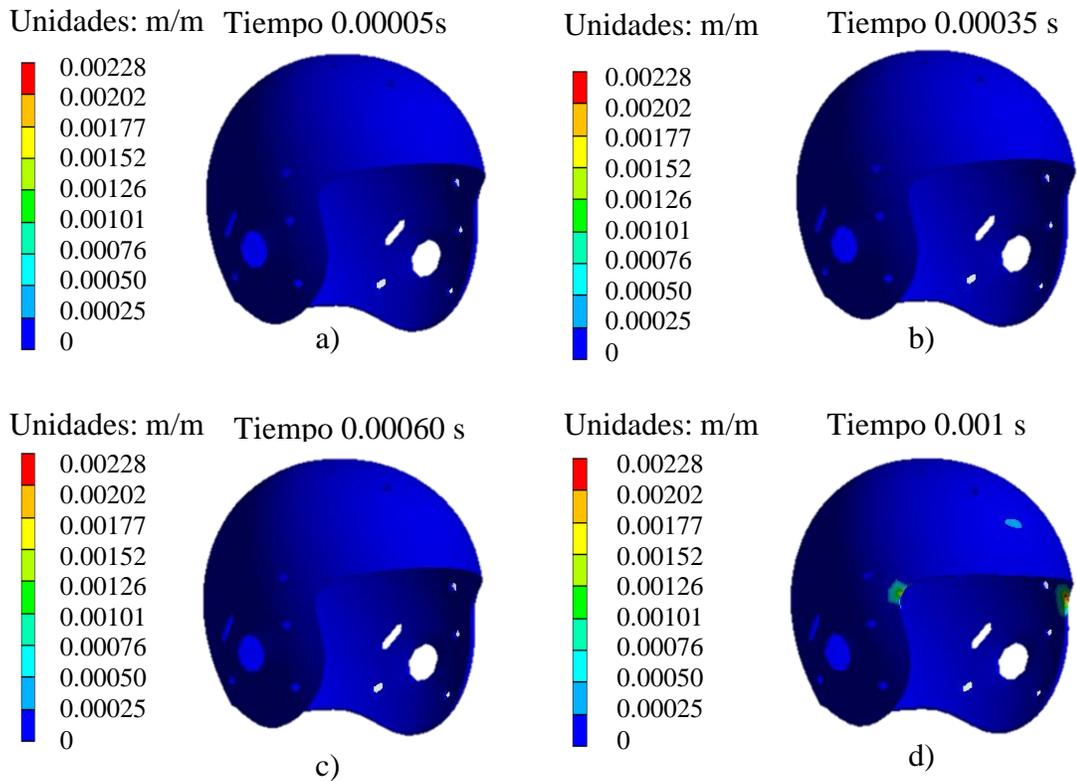


Figura III.19.- Ejemplificación gráfica de los valores de la deformación plástica

Se observa en la Tabla III.4 y en la Figura III.15, no se observa una deformación importante durante todo el todo el análisis.

III.5.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x.}$)

Dentro de la falla del material al cortante, se debe de observar el máximo punto de este para considerar la importancia de su acción.

Tabla III.5.- Valores para el esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0.0000000	0.000
0.00005	0.0000000	28.441
0.00010	0.0000000	18.992
0.00015	0.0000000	22.096
0.00020	0.0000000	37.077
0.00025	0.0000000	21.779
0.00030	0.0000000	23.662
0.00035	0.0000000	21.210
0.00040	0.0000000	28.415
0.00045	0.0000000	24.476
0.00050	0.0000000	23.629
0.00055	0.0000000	26.572
0.00060	0.0000000	30.467
0.00065	0.0000000	32.848
0.00070	0.0000000	34.163
0.00075	0.0000285	36.750
0.00080	0.0000260	38.449
0.00085	0.0000473	39.643
0.00090	0.0000392	41.333
0.00095	0.0000781	44.170
0.00100	0.0000416	44.081

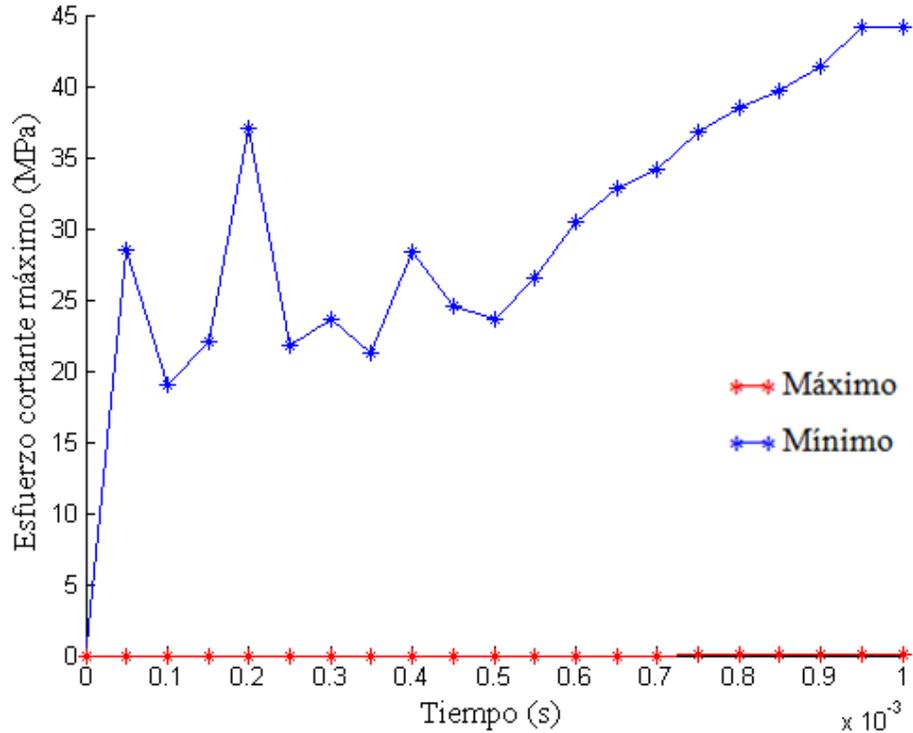


Figura III.20.- Valores para el esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

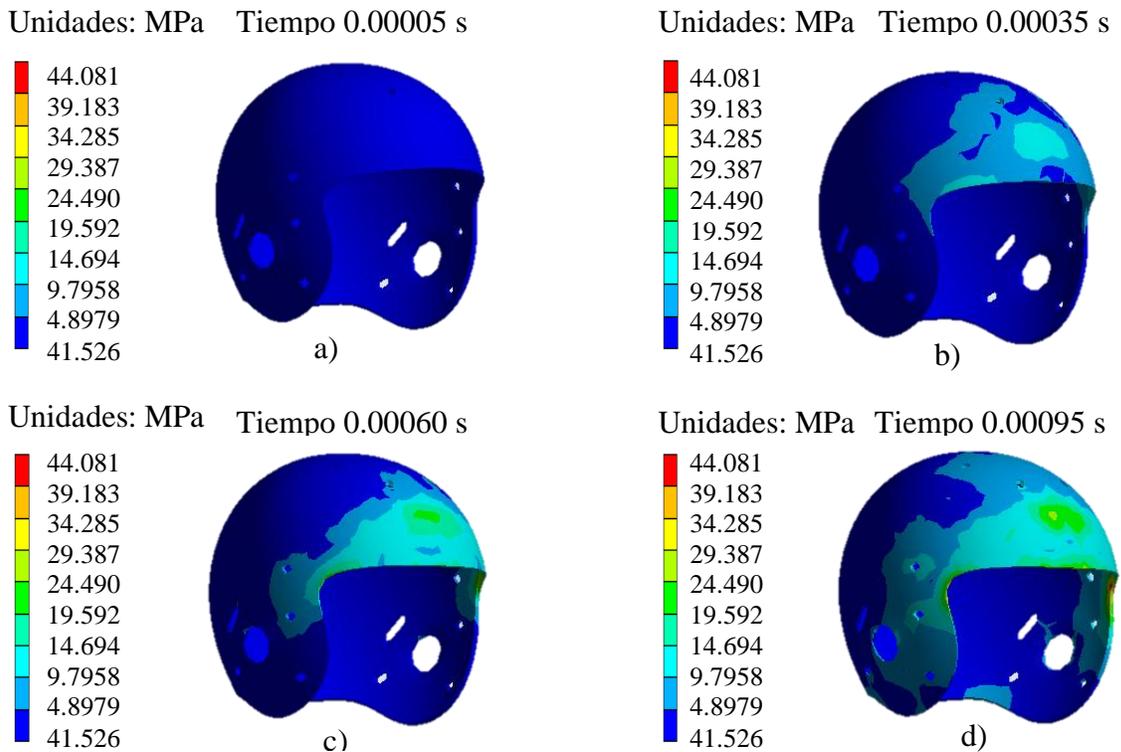


Figura III.21.- Ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo. a) Inicio del impacto. b) En el tiempo 0.00035 s, c) En el tiempo 0.00060 s. d) Punto máximo en el tiempo 0.00095 s.

Se observa el momento del contacto (Figura III.20) en el tiempo 0.00005 s, iniciando los esfuerzos cortantes de manera alternada, hasta el punto en el tiempo 0.0005 s a partir del cual se desarrollan de forma parabólica, hasta a llegar a un punto máximo en el tiempo 0.00095 s con un valor de 44.170 MPa. Por lo que se puede decir que el material no llega a la fractura.

III.6.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal oblicuo

Se utiliza el mismo modelo del estudio anterior, ya que es el mismo objeto el que se desea someter al estudio, igualmente se somete a una carga dinámica siguiendo la misma metodología anterior, con la variante de que la zona de impacto se mueve 45 grados hacia la parte izquierda del casco (Figura III.22).

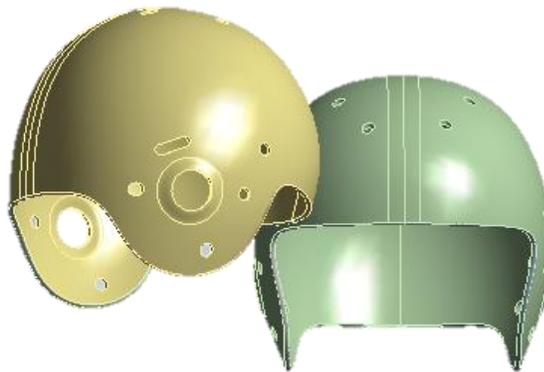


Figura III.22.- Golpe frontal oblicuo

III.6.1.- Desplazamiento total D

Indica el primer momento en el que impactan los cascos, desde el momento en que inician el contacto, hasta el punto en que el desplazamiento llega a observarse físicamente.

Tabla III.6.- Valores del desplazamiento total, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m)	Máximo (m)
0.00000	0	0.000000
0.00005	0	0.000512
0.00010	0	0.001045
0.00015	0	0.001700
0.00020	0	0.002024
0.00025	0	0.002499
0.00030	0	0.003118
0.00035	0	0.003783
0.00040	0	0.004359
0.00045	0	0.004912
0.00050	0	0.005401
0.00055	0	0.006045
0.00060	0	0.006713
0.00065	0	0.007437
0.00070	0	0.007914
0.00075	0	0.008358
0.00080	0	0.008987
0.00085	0	0.009669
0.00090	0	0.010292
0.00095	0	0.010843
0.00100	0	0.011264

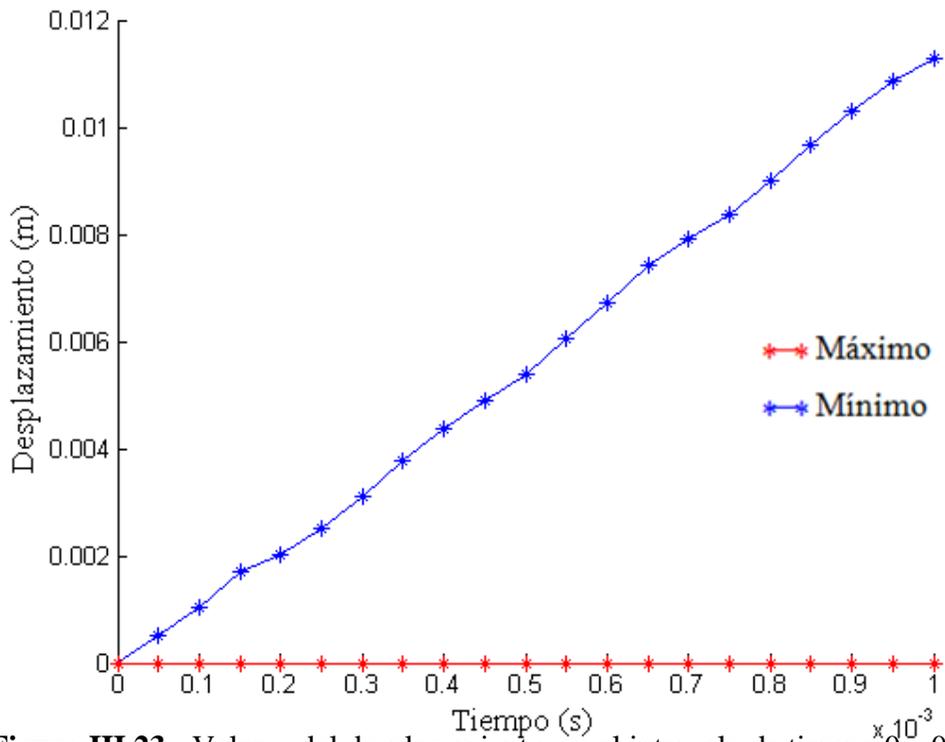


Figura III.23.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

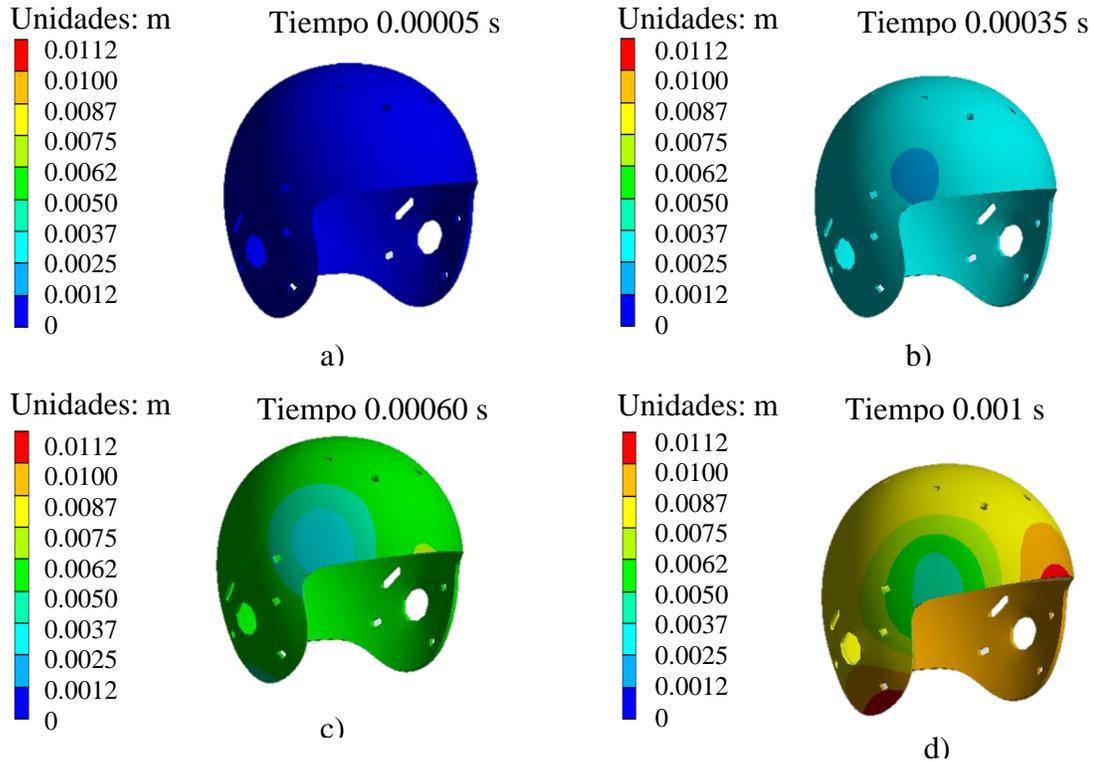


Figura III.24.- ejemplificación gráfica del desplazamiento en los intervalos de tiempo.
 a) 0.00005 s, 0.00075 m. b) 0.00035 s, 0.0037 m. c) 0.0060 s, 0.0067 m. d) 0.001 s, 0.0112 m

En la Tabla III.6 y en la Figura III.23, se aprecia que el desplazamiento casi es completamente lineal aunque por muy poco, en la Figura III.24a, se puede observar el casco sin ningún desplazamiento en un tiempo de 0.00005 s, en la Figura III.24b, en un tiempo de 0.00035 s, se observa un primer contacto en la zona frontal oblicua del lado izquierdo del casco y un movimiento en toda la superficie, a partir de este punto se puede observar un comportamiento lineal en la Figura III.22. En la Figura III.24c, se aprecia el desplazamiento en la totalidad del casco, en la Figura III.24d, se observa el desplazamiento que sufre el casco, teniendo el punto crítico la zona contraria a donde fue impactado

III.6.2.- Esfuerzo von Mises (σ)

Es importante realizar un estudio del esfuerzo principal máximo, ya que puede indicar el momento en el que resulta la falla de material.

Tabla III.7.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	0	18.295
0.00010	0	23.073
0.00015	0	19.105
0.00020	0	18.509
0.00025	0	13.998
0.00030	0	16.800
0.00035	0	15.981
0.00040	0	16.717
0.00045	0	20.230
0.00050	0	23.712
0.00055	0	26.901
0.00060	0	29.366
0.00065	0	32.394
0.00070	0	36.259
0.00075	0	41.369
0.00080	0	44.713
0.00085	0	46.859
0.00090	0	47.218
0.00095	0	47.630
0.00100	0	50.228

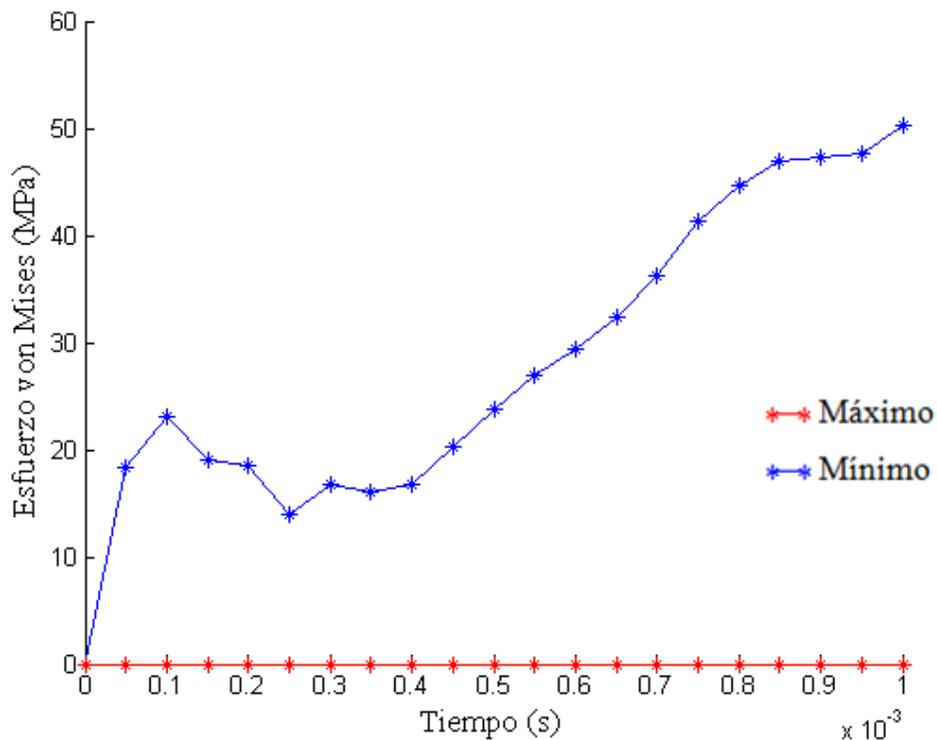


Figura III.25.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

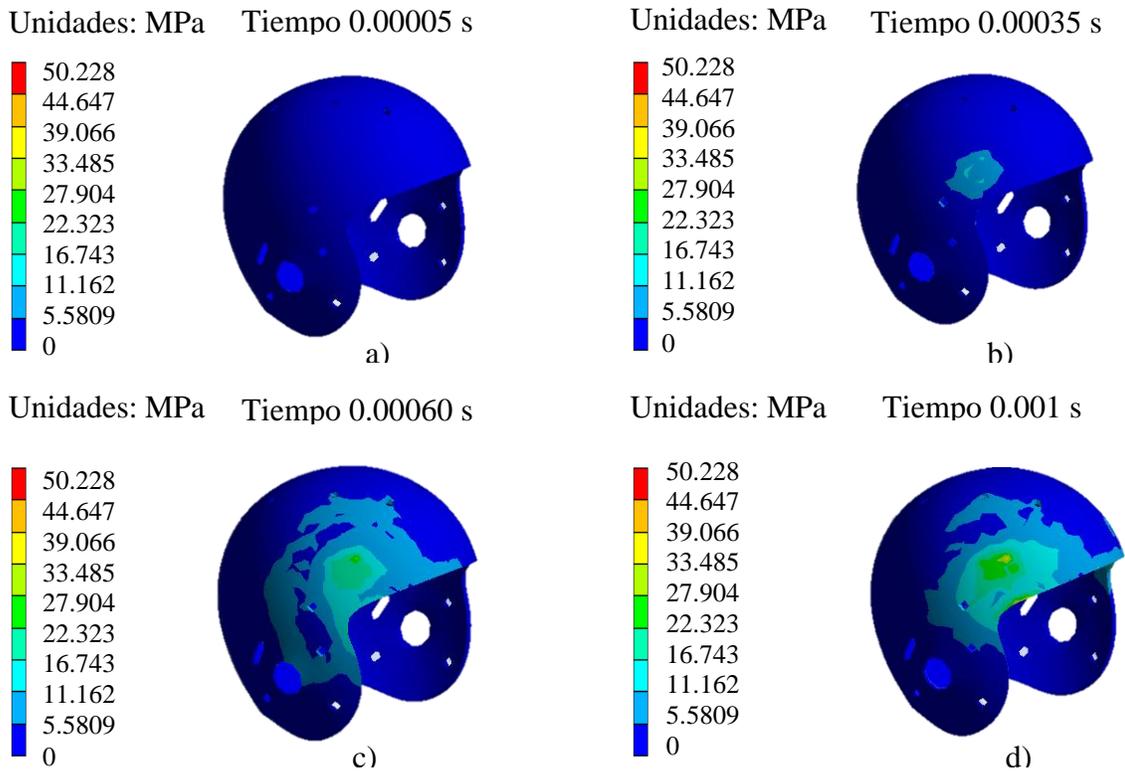


Figura III.26.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo von Mises en Mega Pascales (MPa), teniendo un valor mínimo y máximo de; a) 0 y 18.29 MPa, b) 0 y 15.98 MPa, c) 0 y 29.36 MPa y d) 0 y 50.22 MPa.

Los valores presentados en la Figura III.26a, indican valores de esfuerzos a tensión y a compresión en el inicio del contacto del casco. En la Figura III.26b, se observa el campo de distribución de los esfuerzos en la superficie lateral del casco, teniendo valores de 0 MPa a compresión y 15.98 MPa a tensión. Así mismo en la Figura III.26c en el tiempo 0.00060 s, se obtiene valores a compresión de 0 y 29.36 MPa, se tiene el punto más alto en el tiempo 0.001 de 50.22 MPa tensión.

III.6.3.- Esfuerzo cortante (τ)

Con el fin de observar de qué tipo de esfuerzo es al que cede el material, se analizan los esfuerzos cortantes, que indican el comportamiento tanto a tensión como a compresión del material sujeto a impacto, se presentan los resultados del esfuerzo cortante en el plano YZ por ser los valores más críticos.

Tabla III.8.- Valores para el esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	-4.3104	5.7249
0.00010	-7.2558	6.0509
0.00015	-6.0356	7.5817
0.00020	-4.5951	5.9851
0.00025	-5.3015	5.9628
0.00030	-4.5653	4.0418
0.00035	-4.5115	5.4220
0.00040	-5.6485	5.6416
0.00045	-5.9308	7.6030
0.00050	-6.3700	4.7671
0.00055	-7.9639	5.2613
0.00060	-8.0795	6.3495
0.00065	-7.7021	7.2901
0.00070	-8.1930	7.9419
0.00075	-7.9534	8.3453
0.00080	-8.2005	7.9482
0.00085	-8.2125	7.7627
0.00090	-8.5583	7.7676
0.00095	-8.7038	7.5375
0.00100	-8.5917	7.8312

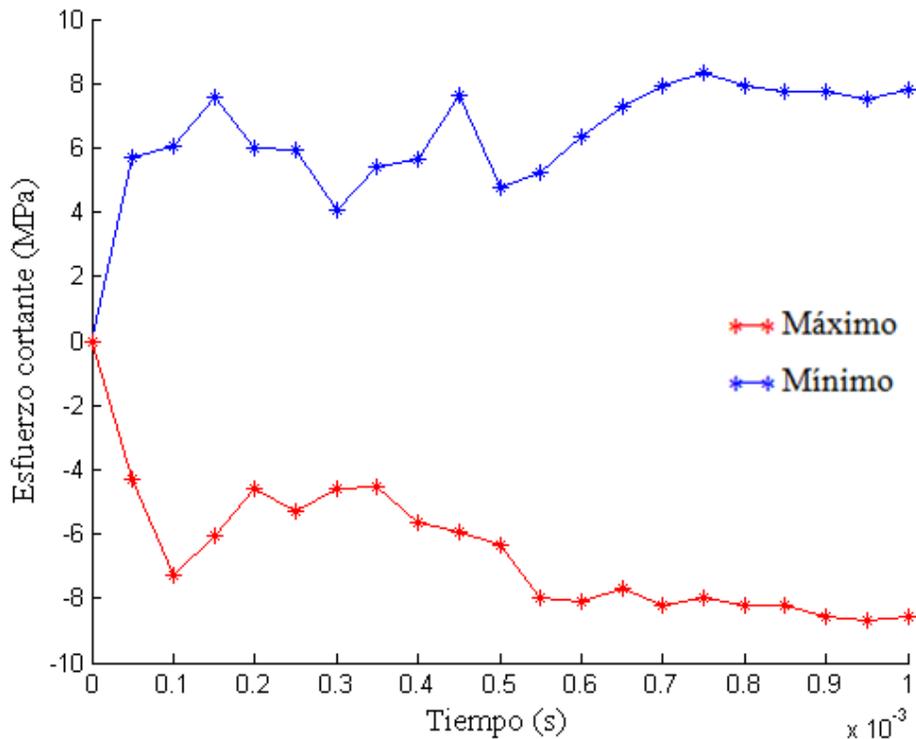


Figura III.27.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

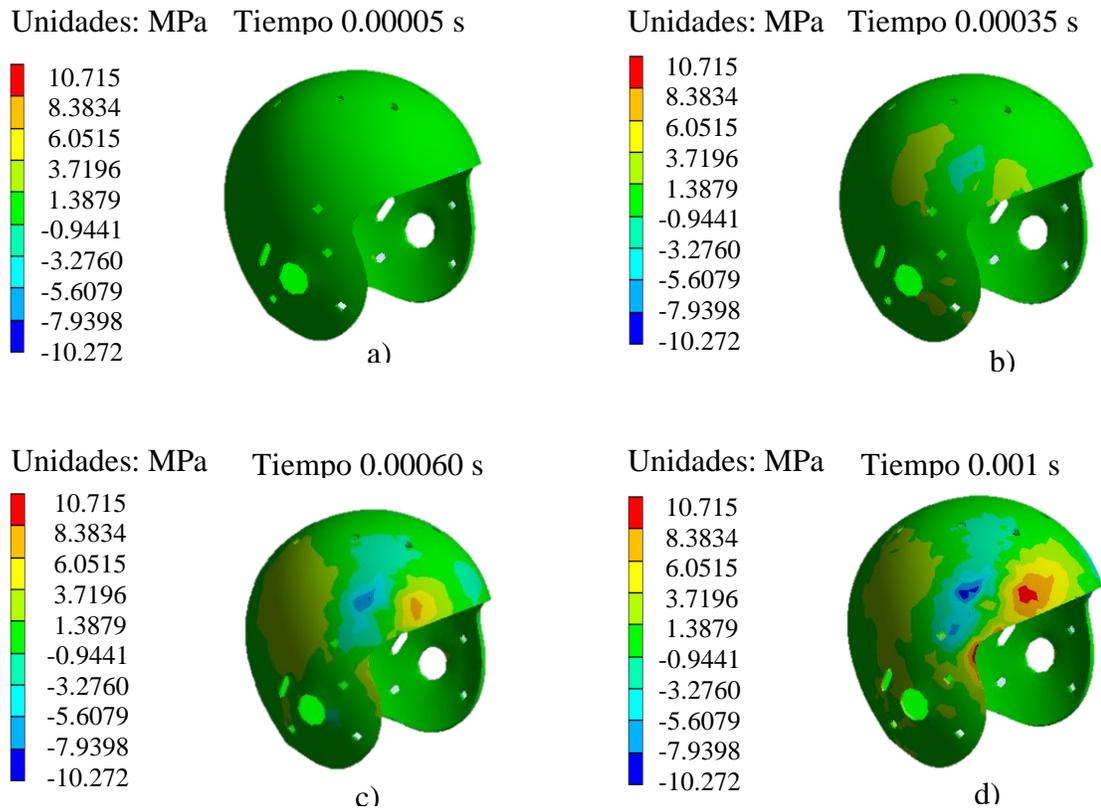


Figura III.28.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante en mega Pascales (MPa), teniendo un valor mínimo y máximo de; a) – 4.31 MPa, 5.72 MPa, b) -4.51 MPa, 5.42 MPa, c) - 8.07 MPa, 6.34 MPa y d) -8.59 MPa, 7.83 MPa.

Los valores suceden de una manera constante (Figura III.27) tanto en tensión como en compresión, se puede determinar que la estructura del casco no falla por el trabajo de los esfuerzos cortantes. (Figura III.28)

III.6.4.- Deformación plástica (D_p)

Ya que se está considerando la zona elástica, así como la plástica del material, recordando que en las cargas de impacto se tiene un comportamiento frágil del material debido a lo súbito de la carga, se usa el análisis del equivalente plástico para observar el fenómeno de la deformación del material.

Tabla III.9.- Valores para la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m/m)	Máximo (m/m)
0.00000	0	0.00000
0.00005	0	0.00000
0.00010	0	0.00000
0.00015	0	0.00000
0.00020	0	0.00000
0.00025	0	0.00000
0.00030	0	0.00000
0.00035	0	0.00000
0.00040	0	0.00000
0.00045	0	0.00000
0.00050	0	0.00000
0.00055	0	0.00000
0.00060	0	0.00000
0.00065	0	0.00016
0.00070	0	0.00031
0.00075	0	0.00045
0.00080	0	0.00064
0.00085	0	0.00210
0.00090	0	0.00266
0.00095	0	0.00321
0.00100	0	0.00395

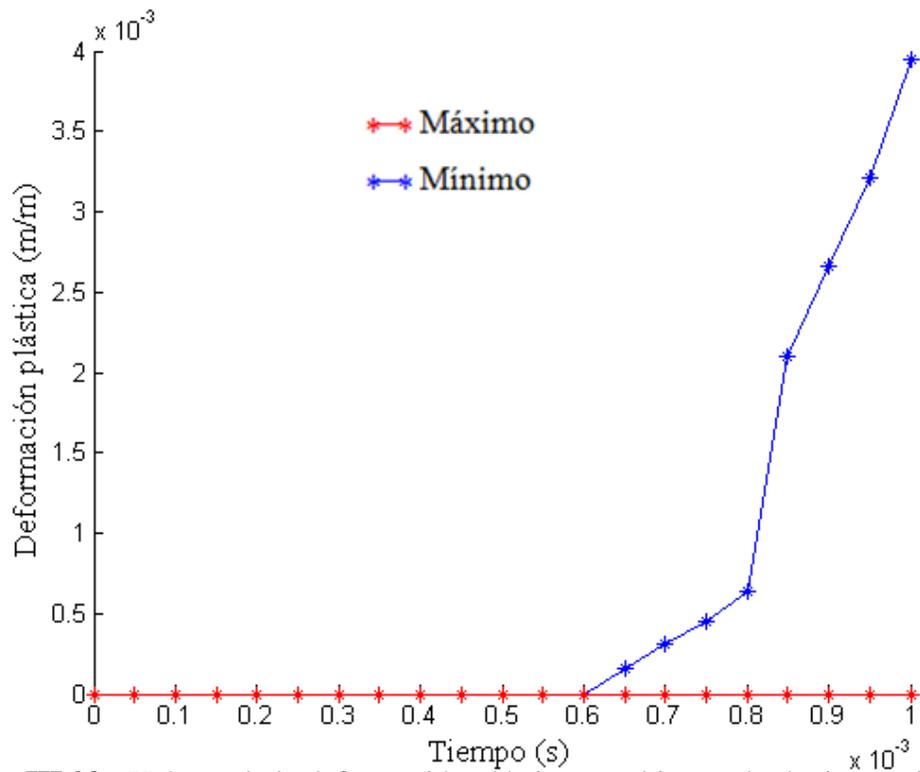


Figura III.29.- Valores de la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

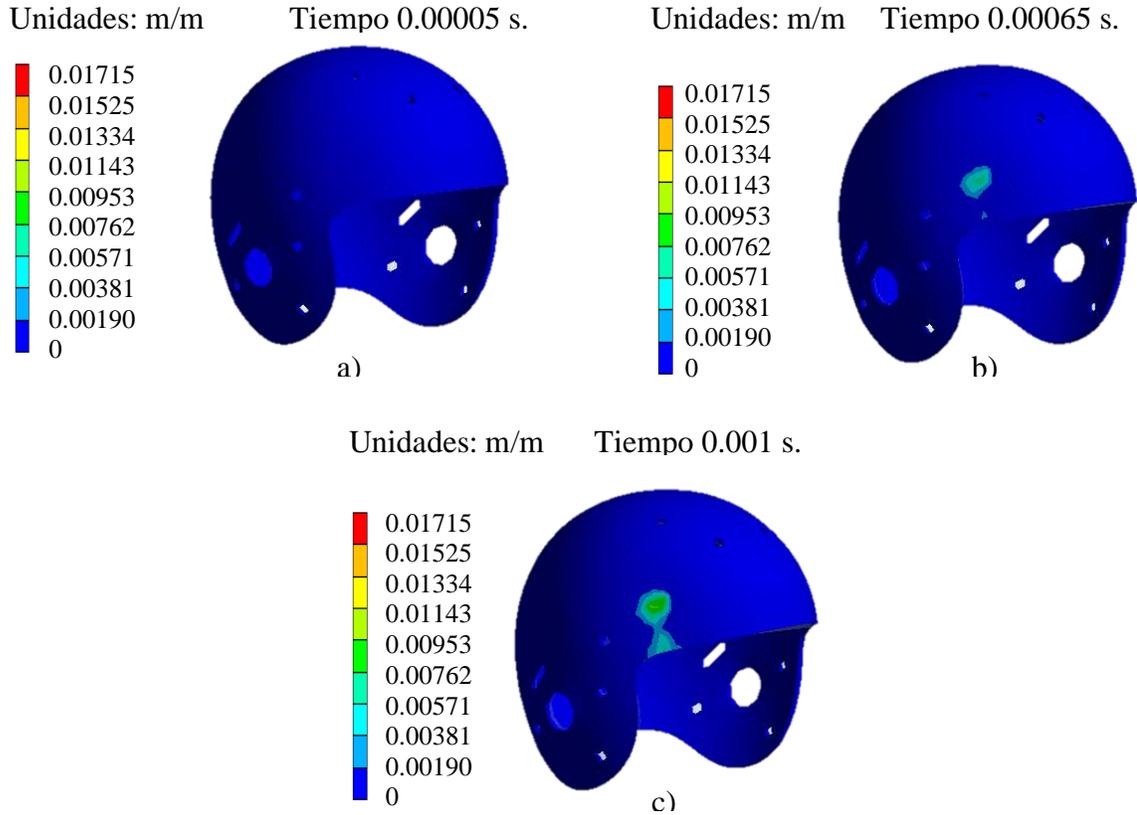


Figura III.30.- Valores y ejemplificación gráfica de la deformación plástica en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Como se ha observado en los análisis de desplazamiento y esfuerzos, dentro del primer intervalo, el contacto de impacto sucede en el punto de 0.00005 s (Figura III.30a) se originan valores de 0 hasta el tiempo 0.00035 s (Figura III.30b) teniendo el valor máximo de 0.003 en el tiempo 0.001 s. (Figura III.30c) Por lo que no existe una deformación considerable.

III.6.5.-Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x.}$)

Dentro de la falla del material al cortante, se debe de observar el máximo punto de este para considerar la importancia de su acción.

Tabla III.10.- Valores para el esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
0.00000	0	0
0.00005	0	9.5798
0.00010	0	12.187
0.00015	0	9.7929
0.00020	0	9.9868
0.00025	0	7.5870
0.00030	0	8.9475
0.00035	0	8.5706
0.00040	0	9.1502
0.00045	0	11.171
0.00050	0	13.172
0.00055	0	14.741
0.00060	0	16.089
0.00065	0	17.732
0.00070	0	18.971
0.00075	0	21.810
0.00080	0	23.758
0.00085	0	24.948
0.00090	0	25.059
0.00095	0	25.517
0.00100	0	26.890

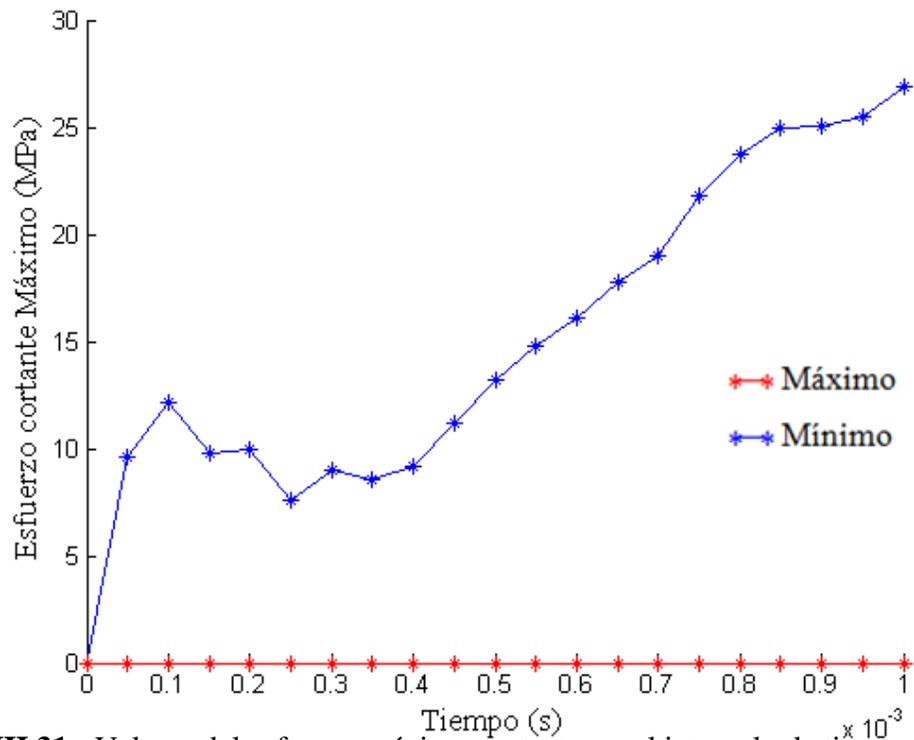


Figura III.31.- Valores del esfuerzo máximo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

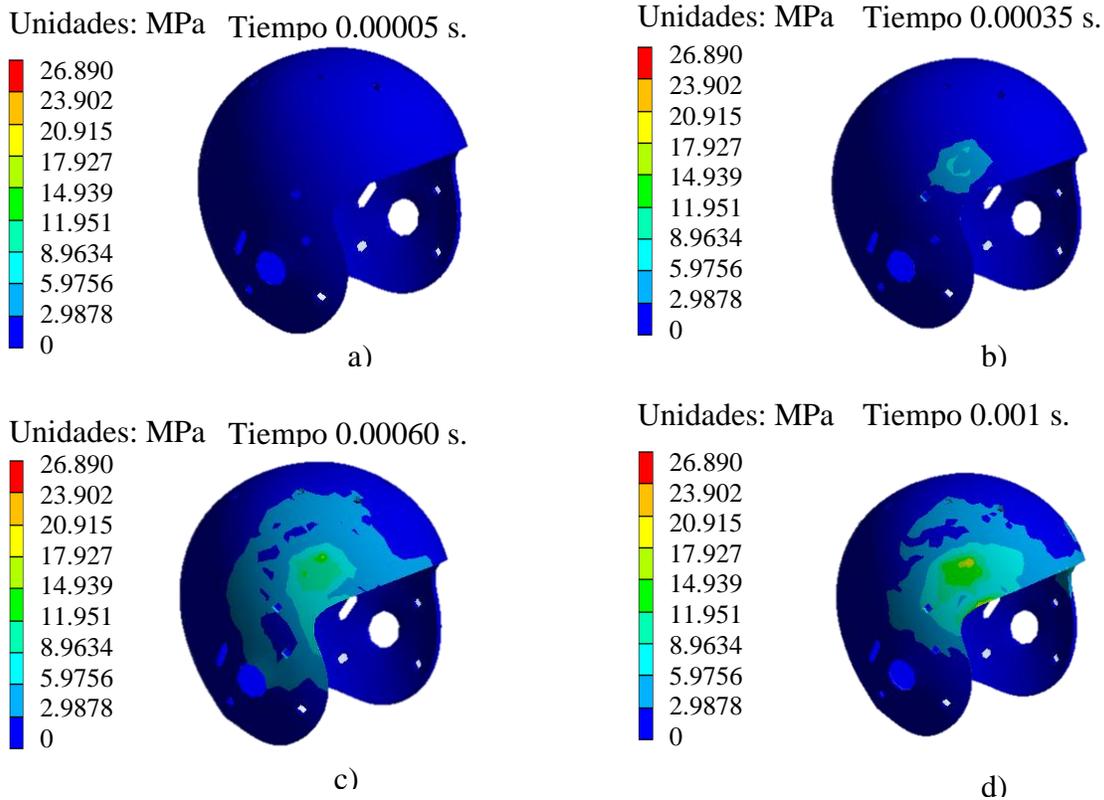


Figura III.32.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo cortante en mega Pascales (MPa), teniendo un valor máximo de; a) 9.57 MPa, b) 8.57 MPa, c) 16.08 MPa y d) 26.89 MPa.

En el tiempo 0.00005 s (Figura III.32a) comienza el contacto y los esfuerzos se inician de una forma alternada (Figura III.31), hasta comenzar de una forma parabólica en el tiempo 0.00035 s, continuando con esta tendencia y alcanzar el máximo en el tiempo 0.001 s teniendo 26.89 MPa.

III.7.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto lateral

Se utiliza el mismo modelo del estudio anterior, ya que es el mismo objeto el que se desea someter al estudio, igualmente se somete a una carga dinámica con un impacto lateral, siguiendo la misma metodología anterior (Figura III.33)



Figura III.33.- Impacto lateral

III.7.1- Desplazamiento total D

Indica el primer momento en el que impactan los cascos, desde el momento en que inician el contacto, hasta el punto en que el desplazamiento llega a observarse físicamente.

Tabla III.11.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m)	Máximo (m)
0.00000	0	0.000000
0.00005	0	0.000468
0.00010	0	0.000971
0.00015	0	0.001497
0.00020	0	0.001972
0.00025	0	0.002492
0.00030	0	0.003097
0.00035	0	0.003683
0.00040	0	0.004295
0.00045	0	0.004942
0.00050	0	0.005299
0.00055	0	0.005557
0.00060	0	0.005901
0.00065	0	0.006341
0.00070	0	0.006922
0.00075	0	0.007340
0.00080	0	0.007686
0.00085	0	0.008116
0.00090	0	0.008637
0.00095	0	0.009257
0.00100	0	0.009677

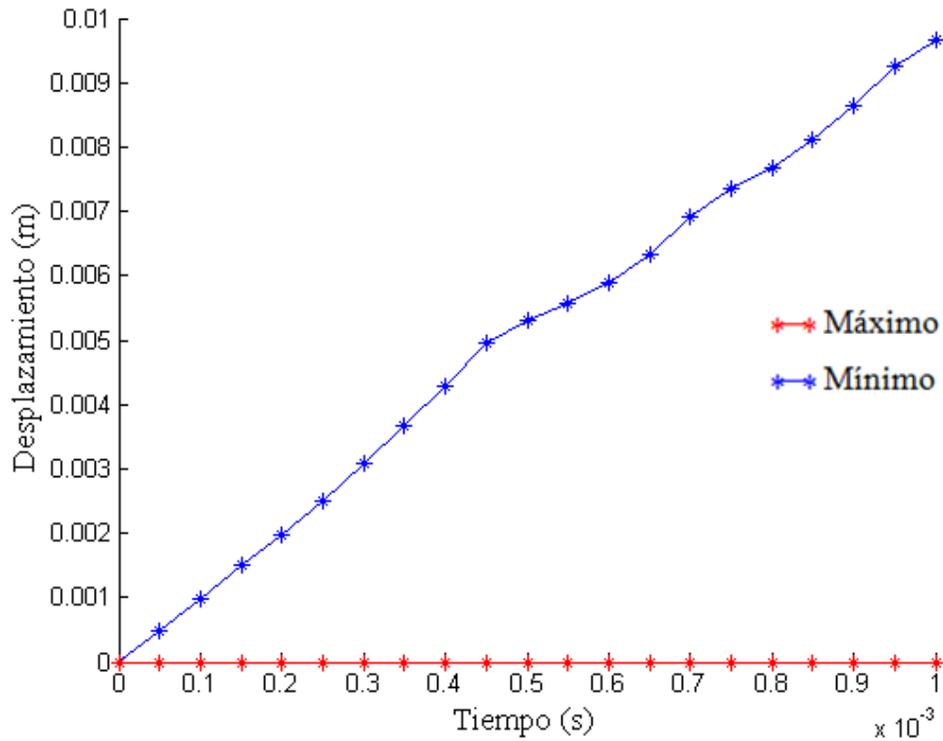


Figura III.34.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

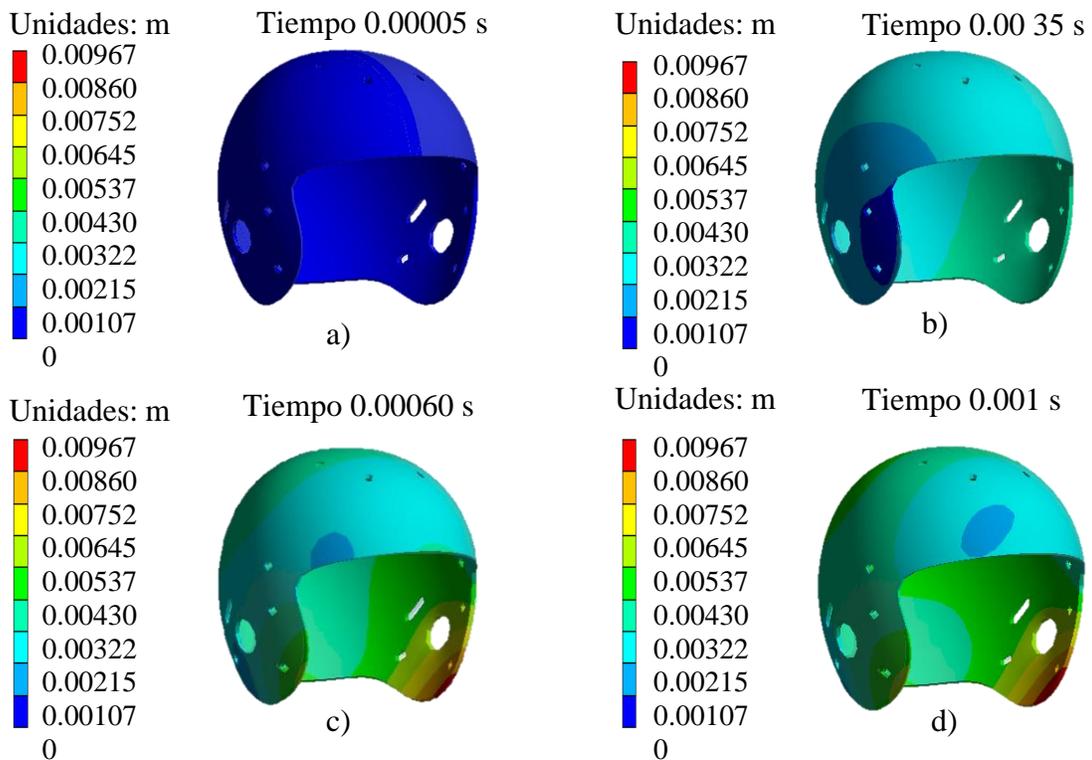


Figura III.35.- Valores y ejemplificación gráfica del desplazamiento en metros (m), teniendo valores máximos en los puntos a) 0.0004 m, b) 0.0036 m c) 0.0059 m y d) 0.0096 m.

En la Tabla III.11 y en la Figura III.34, se aprecia que el desplazamiento casi es completamente lineal aunque por muy poco, en la Figura III.35a, se observa el casco sin ningún desplazamiento en un tiempo de 0.00005 s, en la Figura III.35b, en un tiempo de 0.00035 s, hay un primer contacto en la zona lateral, a partir de este punto se puede observar un comportamiento lineal en la Figura III.34. En la Figura III.35c, se aprecia el desplazamiento en la totalidad del casco; en la Figura III.35d, teniendo el punto crítico la zona contraria a donde fue impactado.

III.7.2.- Esfuerzo von Mises (σ)

Es importante realizar un estudio del esfuerzo de von Mises, ya que al ser una de las teorías más conservadora, puede indicar el momento en el que resulta la falla de material.

Tabla III.12.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0.000000	0
0.00005	0.000000	3.7032
0.00010	0.000000	9.6459
0.00015	0.000000	11.358
0.00020	0.000000	18.328
0.00025	0.000000	24.154
0.00030	0.000000	27.305
0.00035	0.000000	27.632
0.00040	0.000000	31.784
0.00045	0.000000	32.461
0.00050	0.000004	37.230
0.00055	0.000007	38.495
0.00060	0.000017	40.519
0.00065	0.000019	42.329
0.00070	0.000023	43.415
0.00075	0.000027	43.835
0.00080	0.000037	44.810
0.00085	0.000025	45.304
0.00090	0.000016	45.633
0.00095	0.000044	46.263
0.00100	0.000037	46.776

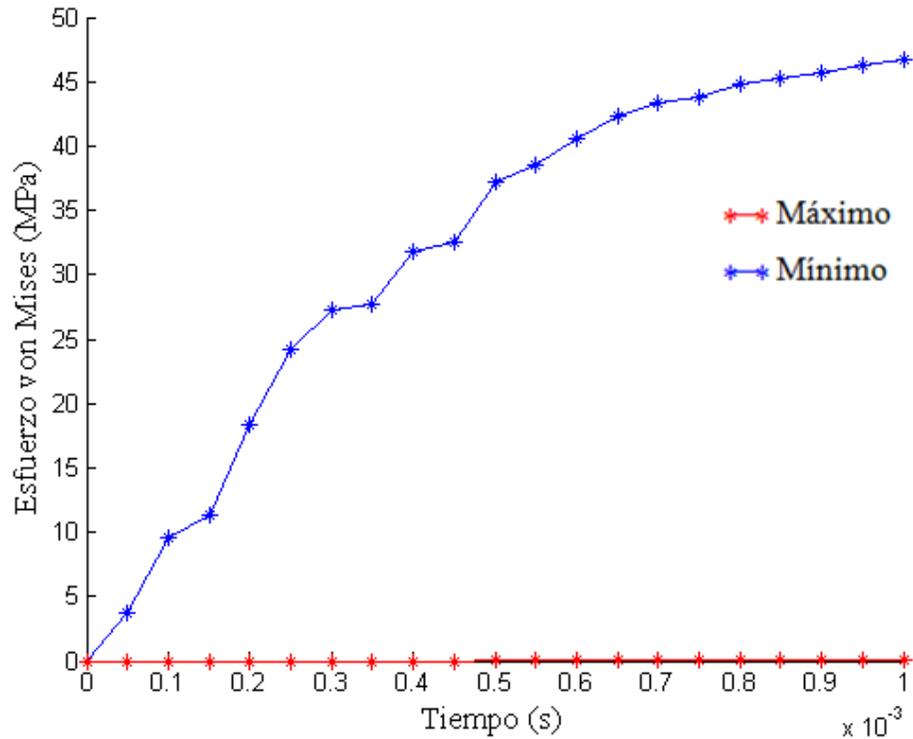


Figura III.36.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

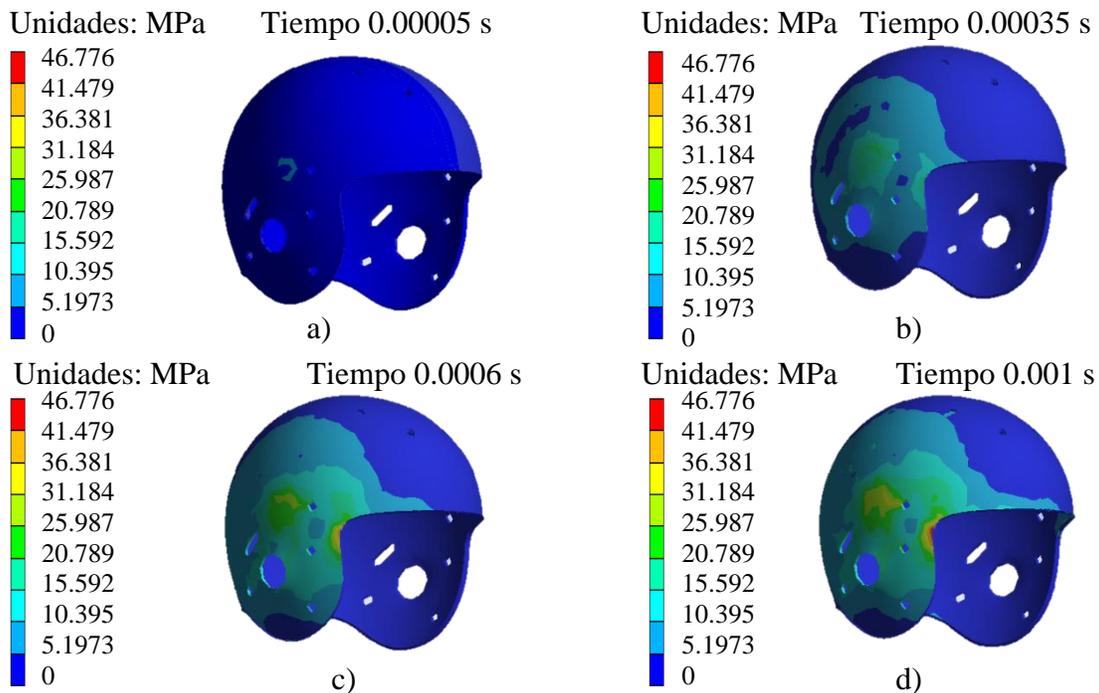


Figura III.37.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo von Mises en mega Pascales (MPa), teniendo un valor mínimo y máximo de; a) 0 y 3.70 MPa, b) 0 MPa y 27.63 MPa, c) - 0.000017 MPa y 40.51 MPa y d) 0.000037 MPa y 46.77 MPa.

Los valores presentados en la Figura III.37a, indican valores de esfuerzos a tensión en el inicio del contacto del casco. En la Figura III.37b, se observa la zona afectada en la superficie lateral del casco, teniendo un valor de 27.63 MPa a tensión. Se tiene el punto más alto en el tiempo 0.001, cuyo valor es 46.77 MPa a tensión.

III.7.3.- Esfuerzo cortante (τ)

Con el fin de observar de qué tipo de esfuerzo es al que cede el material, se analizan los esfuerzos cortantes, que indican el comportamiento tanto a tensión como a compresión del material sujeto a impacto, se muestran los valores del esfuerzo cortante en el plano YZ por ser los más críticos.

Tabla III.13.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	-1.5933	1.5428
0.00010	-3.1524	3.4345
0.00015	-3.9001	3.5033
0.00020	-4.7082	3.9394
0.00025	-6.0123	4.0808
0.00030	-7.1843	4.6679
0.00035	-6.9287	5.0425
0.00040	-7.8650	5.9549
0.00045	-8.0695	6.4263
0.00050	-9.4012	6.6011
0.00055	-9.5181	7.0197
0.00060	-9.6103	7.1752
0.00065	-9.4844	7.6194
0.00070	-9.2678	7.8437
0.00075	-9.6275	8.1317
0.00080	-9.3969	8.4290
0.00085	-9.6492	8.6297
0.00090	-9.7282	8.8933
0.00095	-9.4376	8.9964
0.00100	-9.2441	9.0164

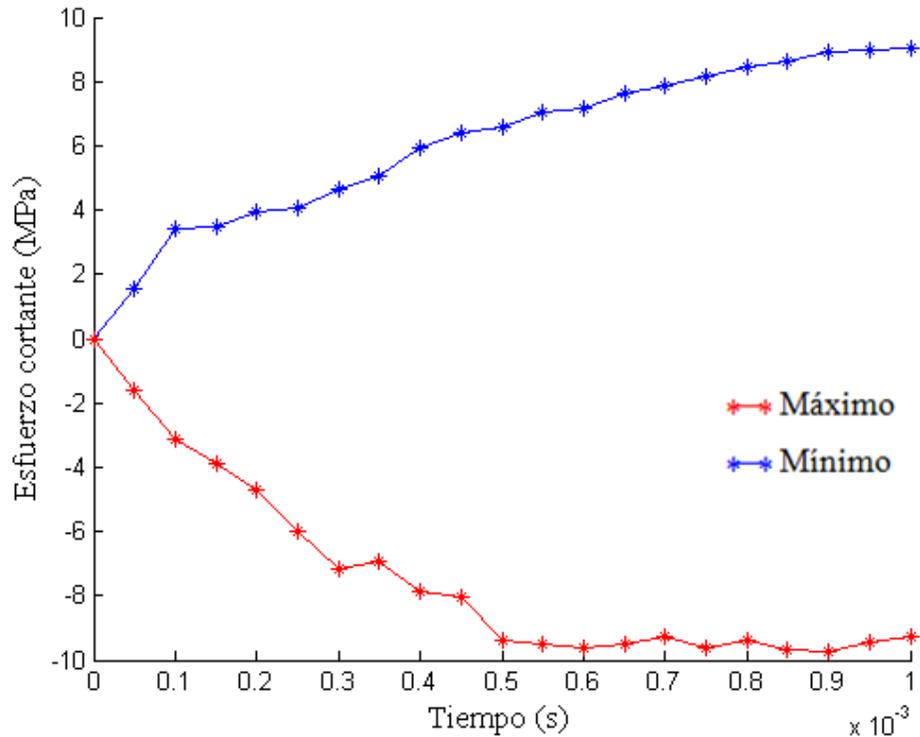


Figura III.38.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

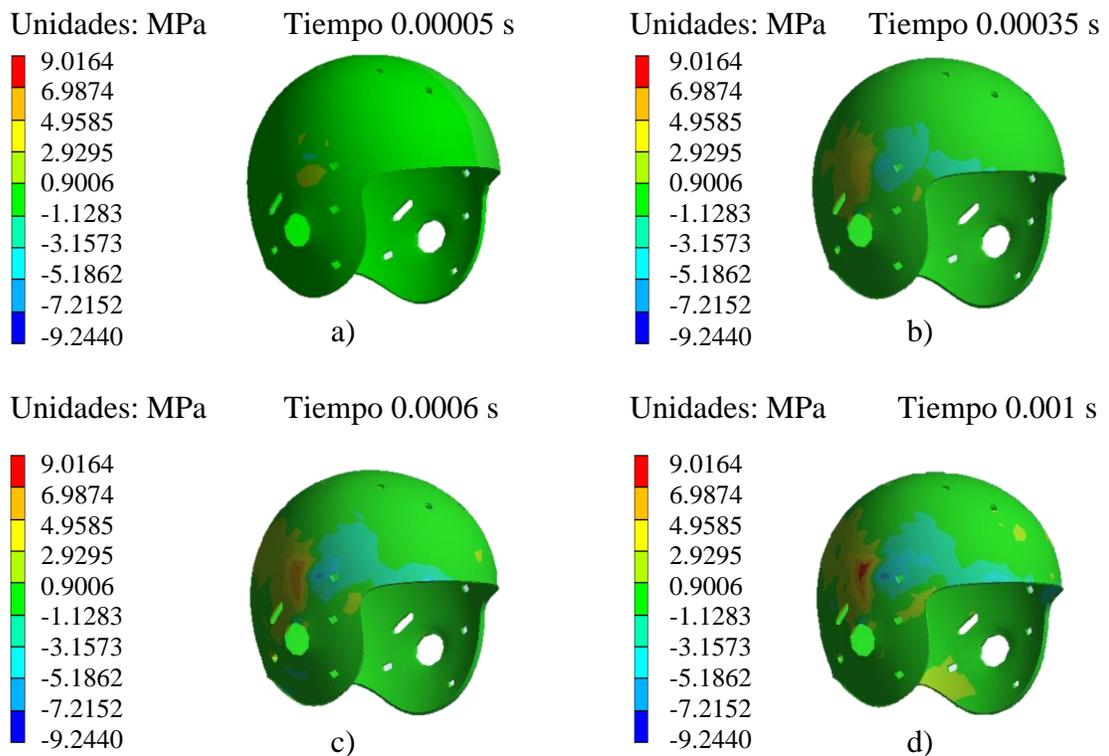


Figura III.39.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante en mega Pascales (MPa), teniendo un valor máximo de; a) 1.542 MPa, b) 5.042 MPa, c) 7.175 MPa y d) 9.016 MPa.

Los valores suceden de una manera constante (Figura III.38) tanto en tensión como en compresión, se puede determinar que la estructura del casco no falla por el trabajo de los esfuerzos cortantes (Figura III.39).

III.7.4. Deformación plástica (D_p)

Ya que se está considerando la zona elástica, así como la plástica del material, recordando que en las cargas de impacto se tiene un comportamiento frágil del material debido a lo súbito de la carga, se usa el análisis del equivalente plástico para observar el fenómeno de la deformación del material.

Tabla III.14.- Valores de la deformación unitaria, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m/m)	Máximo (m/m)
0.00000	0	0.00000
0.00005	0	0.00000
0.00010	0	0.00000
0.00015	0	0.00000
0.00020	0	0.00000
0.00025	0	0.00000
0.00030	0	0.00000
0.00035	0	0.00000
0.00040	0	0.00000
0.00045	0	0.00012
0.00050	0	0.00041
0.00055	0	0.00077
0.00060	0	0.00161
0.00065	0	0.00255
0.00070	0	0.00357
0.00075	0	0.00450
0.00080	0	0.00529
0.00085	0	0.00583
0.00090	0	0.00609
0.00095	0	0.00651
0.00100	0	0.00660

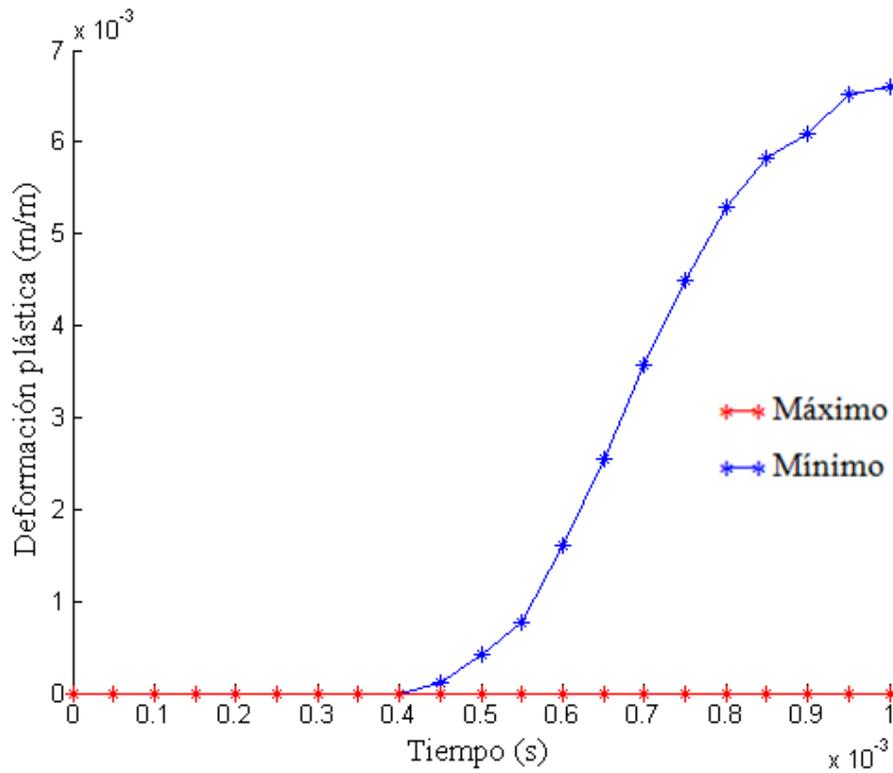


Figura III.40.- Valores de la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

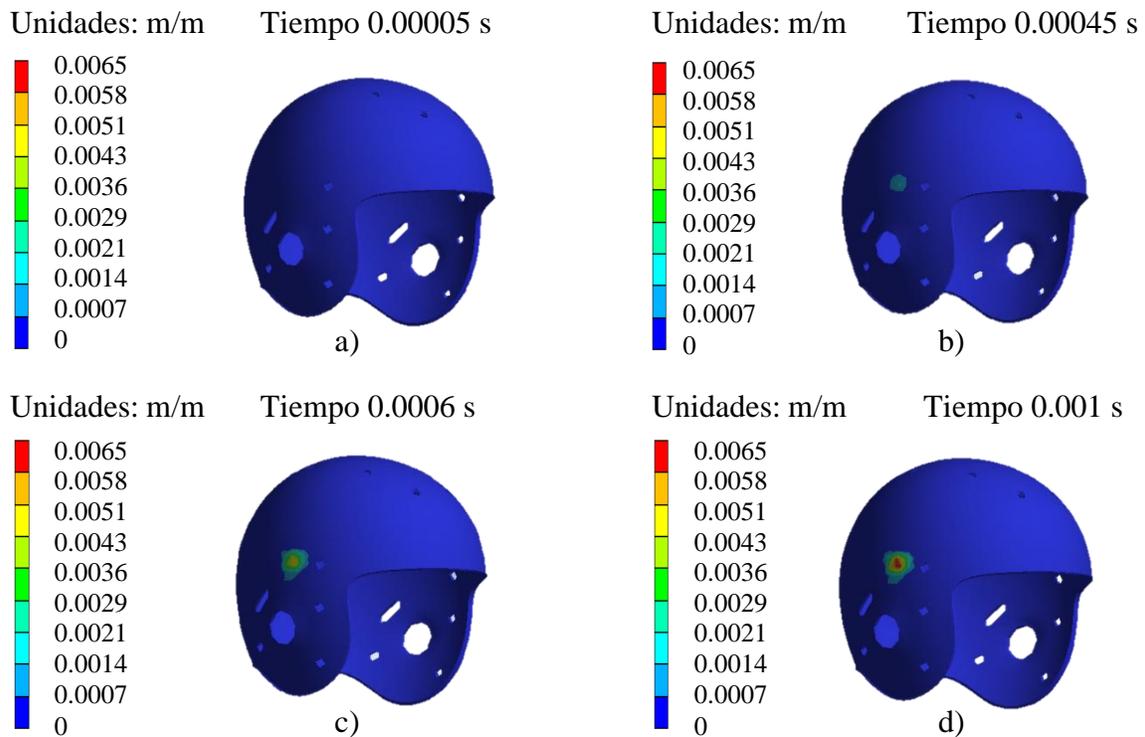


Figura III.41.- Valores y ejemplificación gráfica de la deformación plástica

Como se ha observado en los análisis de desplazamiento y esfuerzos, dentro del primer intervalo, el contacto de impacto sucede en el punto de 0.00045 s con un valor de 0.00012, ascendiendo de forma parabólica hasta el tiempo 0.001 s y un valor de 0.006. Por lo que no existe una deformación importante en la zona.

III.7.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x.}$)

Dentro de la falla del material al cortante, se debe de observar el máximo punto de este para considerar la importancia de su acción.

Tabla III.15.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0.0000000	0
0.00005	0.0000000	2.0916
0.00010	0.0000000	4.9699
0.00015	0.0000000	6.1119
0.00020	0.0000000	9.4988
0.00025	0.0000000	12.542
0.00030	0.0000000	14.204
0.00035	0.0000000	14.382
0.00040	0.0000000	16.528
0.00045	0.0000000	16.903
0.00050	0.0000025	19.394
0.00055	0.0000043	20.074
0.00060	0.0000096	20.952
0.00065	0.0000111	22.011
0.00070	0.0000128	22.763
0.00075	0.0000156	23.031
0.00080	0.0000204	23.445
0.00085	0.0000139	23.885
0.00090	0.0000093	24.302
0.00095	0.0000250	24.598
0.00100	0.0000197	24.921

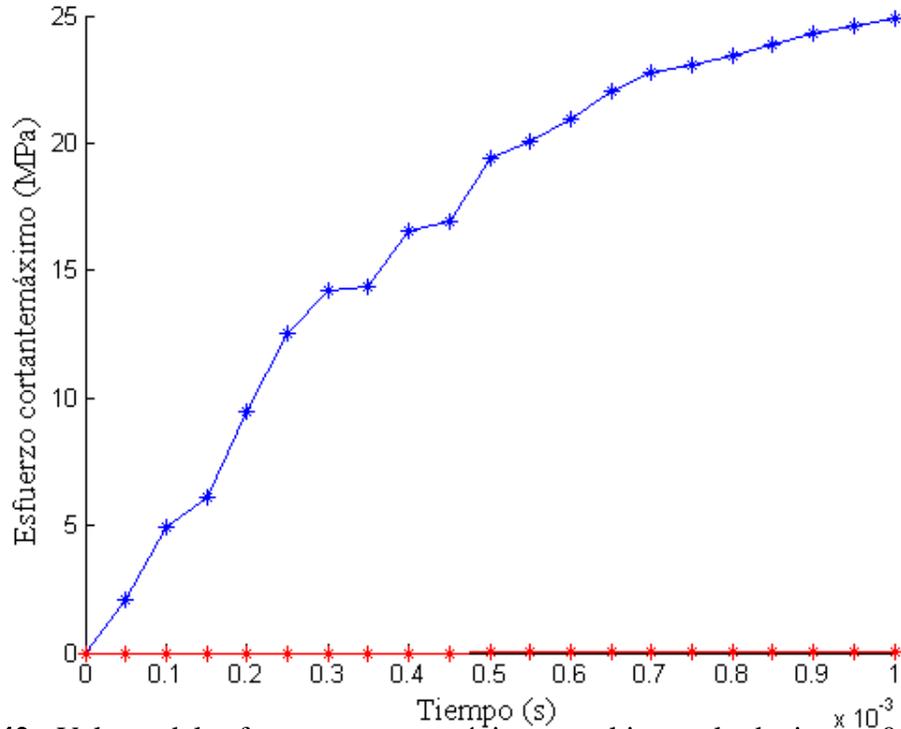


Figura III.42.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.

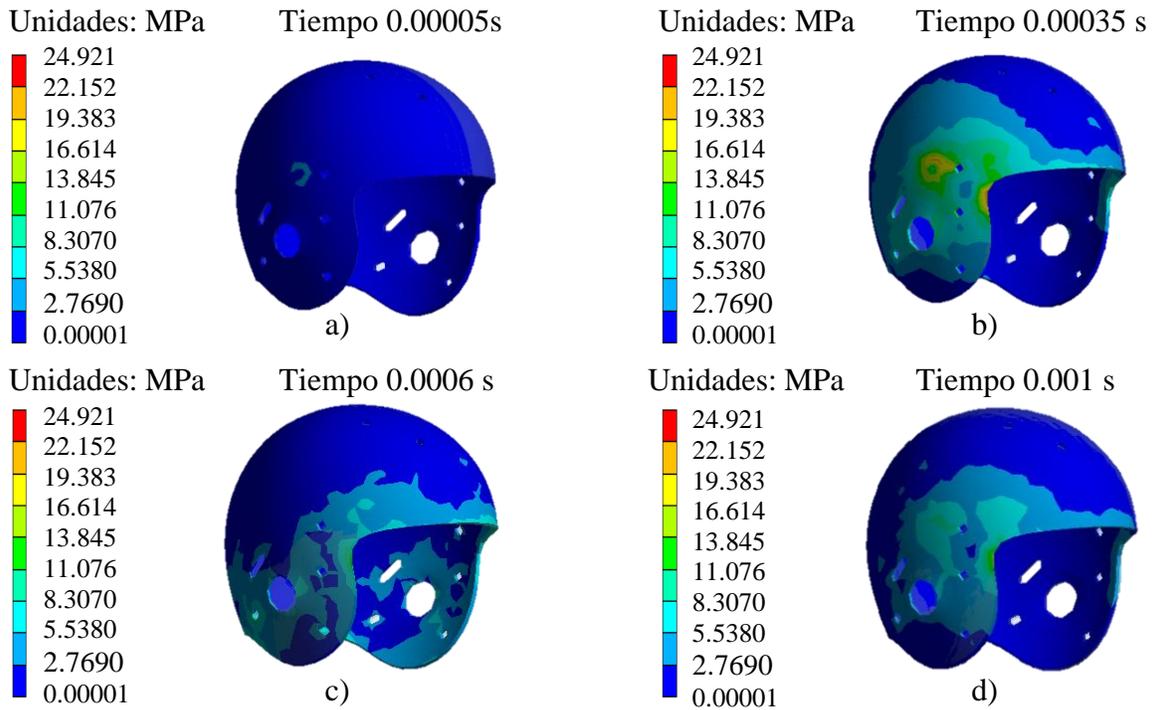


Figura III.43.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo cortante en mega Pascales (MPa), teniendo un valor máximo de; a) 2.091 MPa, b) 14.382 MPa, c) 20.952 MPa y d) 24.921 MPa.

En el tiempo 0.00005 s comienza el contacto y los esfuerzos se inician de una forma semi parabólica, hasta llegar a un punto máximo en el tiempo 0.001 s alcanzar el valor de 24.921 MPa.

III.8.- Sumario

Comenzando con la fase de análisis del trabajo de tesis, se indica al inicio capítulo una metodología que se siguió para el modelado del casco y los pasos a seguir para el análisis por el Método del Elemento Finito. El estudio realizado es explícito dinámico, y se realizó en el programa *ANSYS WORKBENCH*, incluyendo las propiedades del policarbonato para generar las particularidades del estudio. El estudio realizado inicia con el contacto de los dos cuerpos (casco) y llegando a un punto sin tener una cedencia total del material, observando su comportamiento en condiciones controladas de impacto, obteniendo los resultados de desplazamiento total, esfuerzo equivalente, esfuerzo cortante, deformación plástica equivalente, esfuerzo cortante máximo, obteniendo y explicando los resultados.

III.9.- Referencias

- 1.- Enzo Levi, *Elementos de Mecánica del Medio Continuo*, Edit. Limusa, pp.287, 1991.
- 2.- Gere. J., Timoshenko S., *Mecánica de materiales*, Grupo Editorial Iberoamérica, pp. 3-6, 1986.
- 3.- Cecil, J., Jay, H. y Dennis, S., *Dibujo y Diseño en Ingeniería*, 6ta. Edición, Ed. Mc Graw-Hill, pp. 19-30, 2004.
- 4.- Rao, S. S., *The Finite Element Method in Engineering*, Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, pp. 3-10, 2005.
- 5.- Pérez-Sáez, A., *Método de los Elementos Finitos; Introducción a ANSYS*, Ed. Universidad de Sevilla, pp. 3, 1999.
- 6.- Fornóns-García, J. M., *El Método de los Elementos Finitos*, Ed. Marcombo, pp. 2, 1982.
- 7.- Alavala, C. R., *Finite Element Methods; Basic Concepts and Applications*, Ed. PHI Learning Pvt. Ltd, pp. 20-21, 2009.
- 8.- Carnicero, A., *Introducción al Método de los Elementos Finitos*, Ed. Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, pp. 3-5, 2001.

-
-
- 9.- Desai, Y. M, Edho T. I. y Shah, A. H., *Finite Element Method with Applications in Engineerong*, Ed. Pearson, pp 27-33, 2011.
 - 108.- Madenci, E. y Guven, I., *The finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®*, Ed. Springer, pp 10-20, 2007.
 - 11.- Srinivas, P. y Kraumar, R., *Finite Element Analysis Using ANSYS 11.0*, Ed. PHI Learning Pvt. Ltd., pp -36, 2010.
 - 12.- Huei-Huang, L., *Finite Elements Simulations with ANSYS Workbench 12; Theory - Applications – Case Studies*, Ed. Schroff Development Corporation, pp. 33, 2010.
 - 13.- Jadischke, R., Viano, D., Dau, N., King, A. y McCarthy, J., On the accuracy of the head impact telemetry (HIT) system used in football helmets, *Journal of Biomechanics*, Vol. 43, pp 2310-2315, 2013.



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DEL CASCO PROPUESTO

IV.1.- Generalidades

En este trabajo se busca la optimización del diseño tradicional del casco de futbol americano apoyándose en el Método de Elemento Finito. Lo cual se fundamenta proponiendo una estructura segmentada. A diferencia del caso de estudio del capítulo anterior que es una sola pieza, ya que las aberturas entre las secciones actuarían como zonas de deformación, dando flexibilidad a la parte exterior del casco. Mientras se absorbe el impacto, disminuyendo así el trauma en la cabeza. El diseño también sería aligerar el peso del casco mediante la remoción de material para reducir la fuerza del impacto en las colisiones de casco a casco.

IV.2.- Modelado del casco propuesto

En el capítulo anterior se realizó el modelado en el programa computacional *SolidWorks*® 2015, de un casco *Schutt Advantage*®, talla *XL* y modelo 2010. En este capítulo y para continuar con la finalidad de éste trabajo se realiza una modificación en dicho modelo. Utilizando el programa *SolidWorks*® 2015, se llama el archivo que contiene el modelo del el casco (Figura IV.1) que se realizó para el capítulo anterior. Esto con el fin de realizar los cambios necesarios para llevar a cabo la finalidad de éste trabajo.

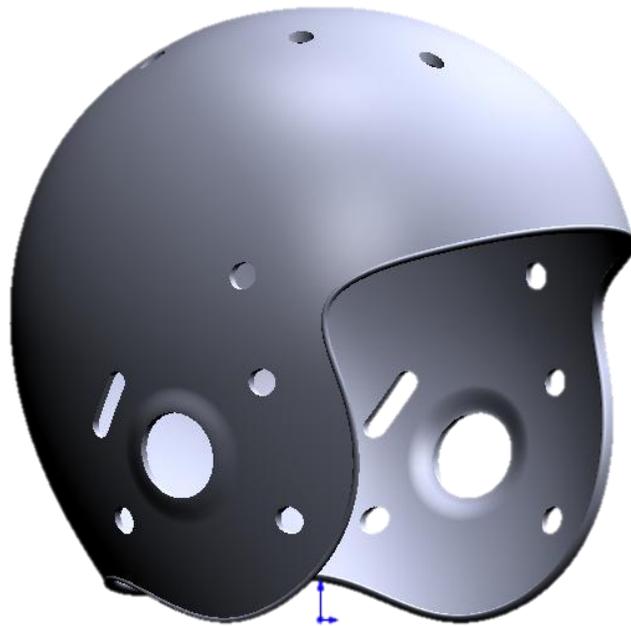


Figura IV.1.- Casco completo *Schutt Advantage*®

Una vez dentro del programa se procede a seccionar el casco, esto con la finalidad de tener la misma geometría, sólo que en partes. Para ello, se traza un plano a una distancia de 6 cm desde el centro del casco (Figura IV.2) y se hace un corte extruido para sólo obtener la parte lateral del casco (Figura IV.3)

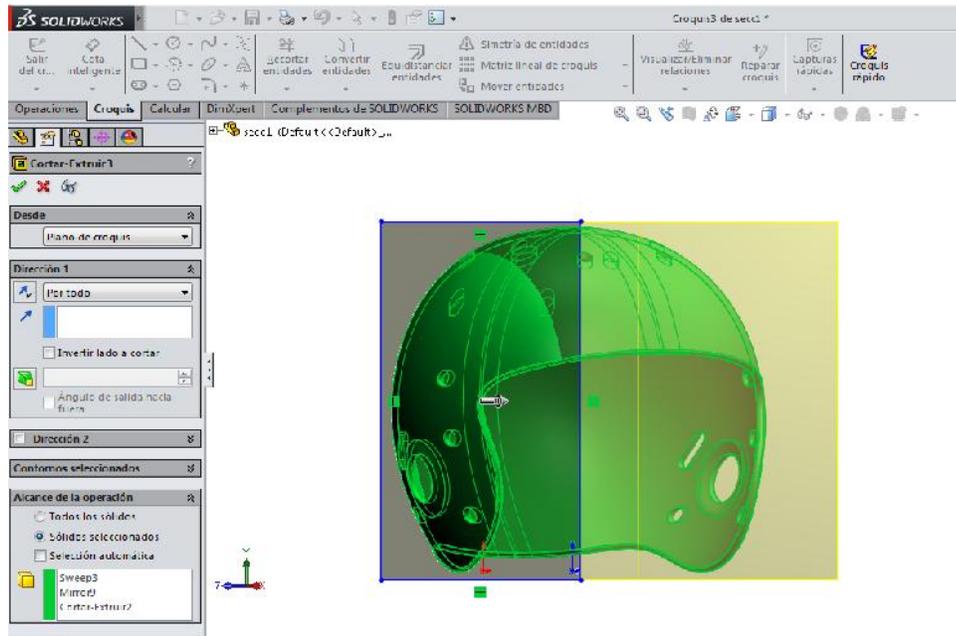


Figura IV.2.- Plano y selección para cortar

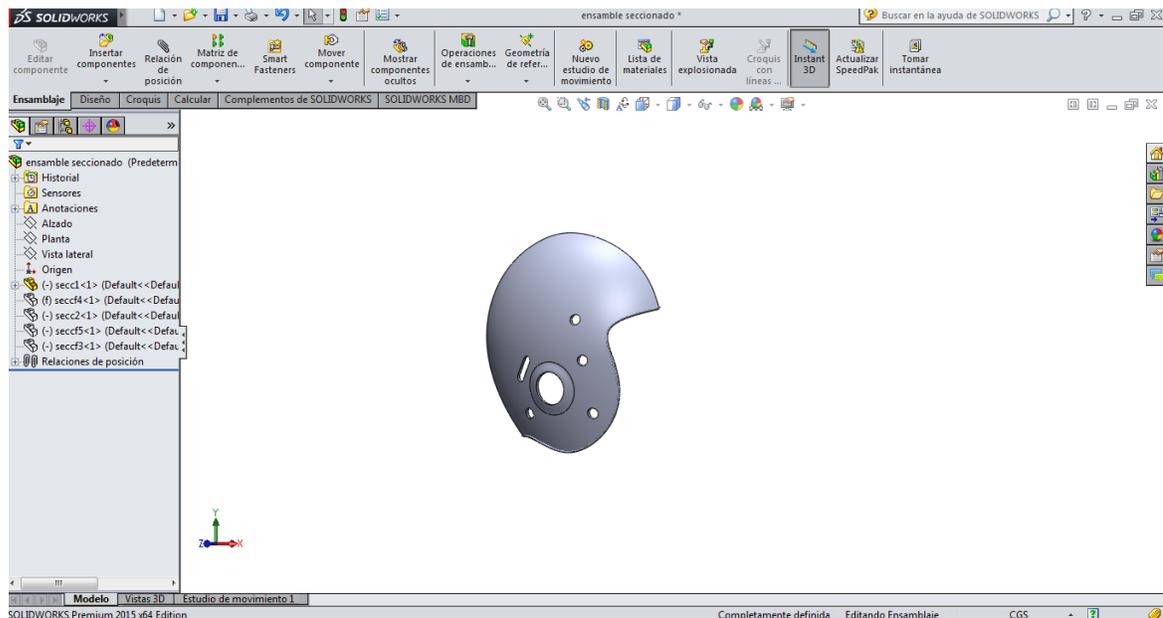


Figura IV.3.- Sección lateral del casco a utilizar

De la misma forma se procede a seccionar las restantes partes que se utilizarán (Figura IV.4a y Figura IV.b)

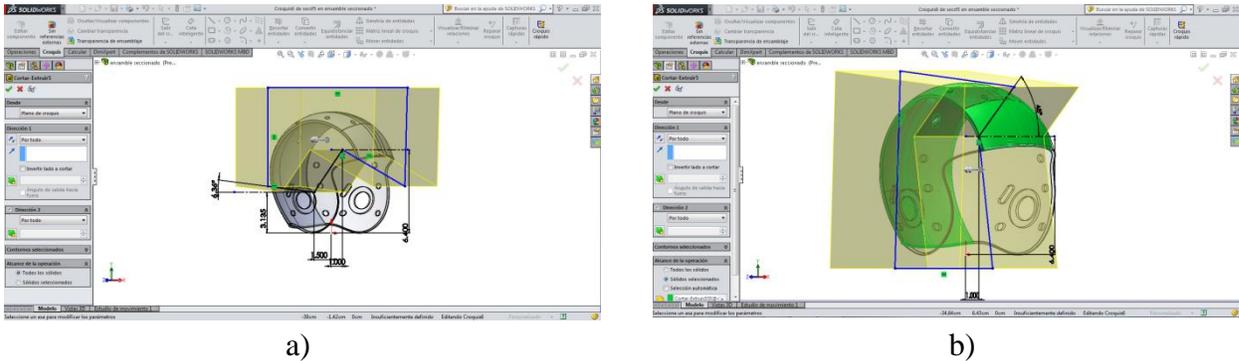


Figura IV.4.- Partes seccionadas. a) Parte trasera del casco. b) Parte frontal del casco.

Una vez que se tiene las partes seccionadas del casco se procede a hacer el ensamble propuesto:

1. En el programa *SolidWorks*® 2015, se abre un nuevo ensamble (Figura IV.5).

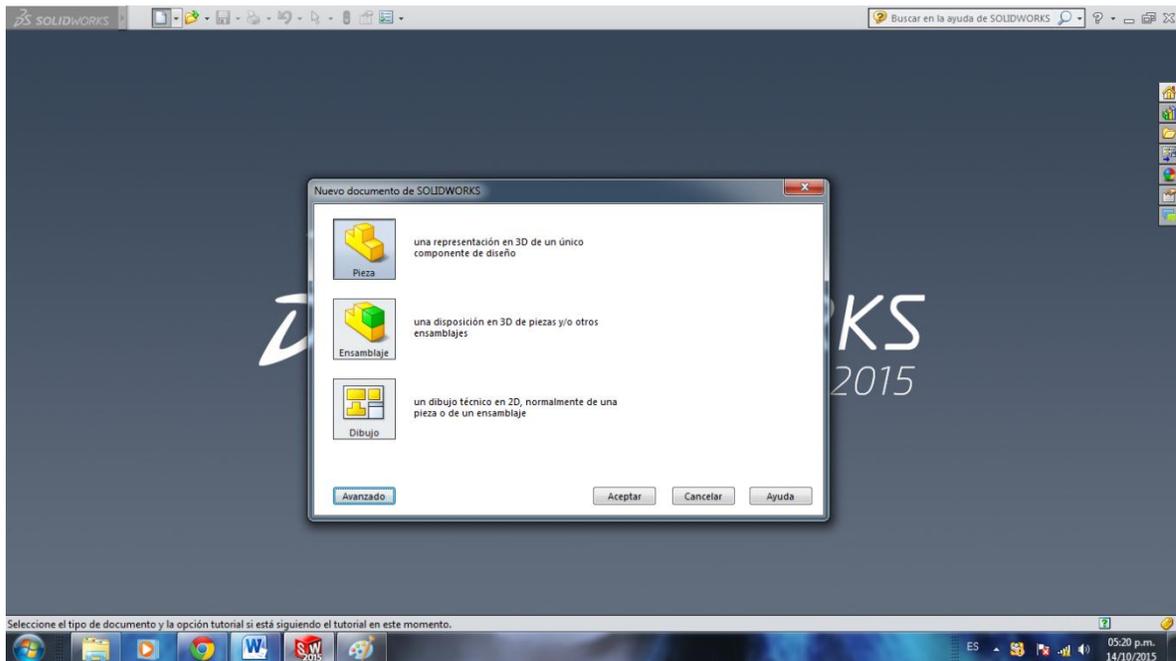


Figura IV.5.- Nuevo ensamble propuesto

2. llamando la parte superior del casco como pieza central fija y colocando los demás componentes del casco (Figura IV.6).

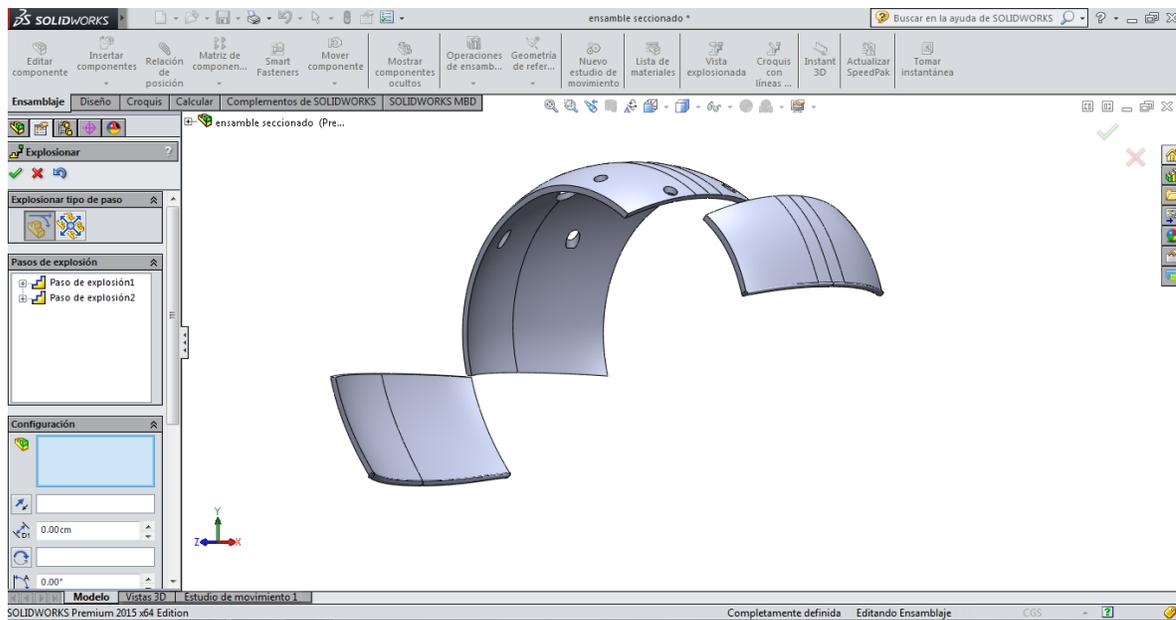


Figura IV.6.- Ensamble de las piezas centrales del casco

3. Se llaman el resto de los componentes y se colocan con una separación de 1 mm (Figura IV.7).

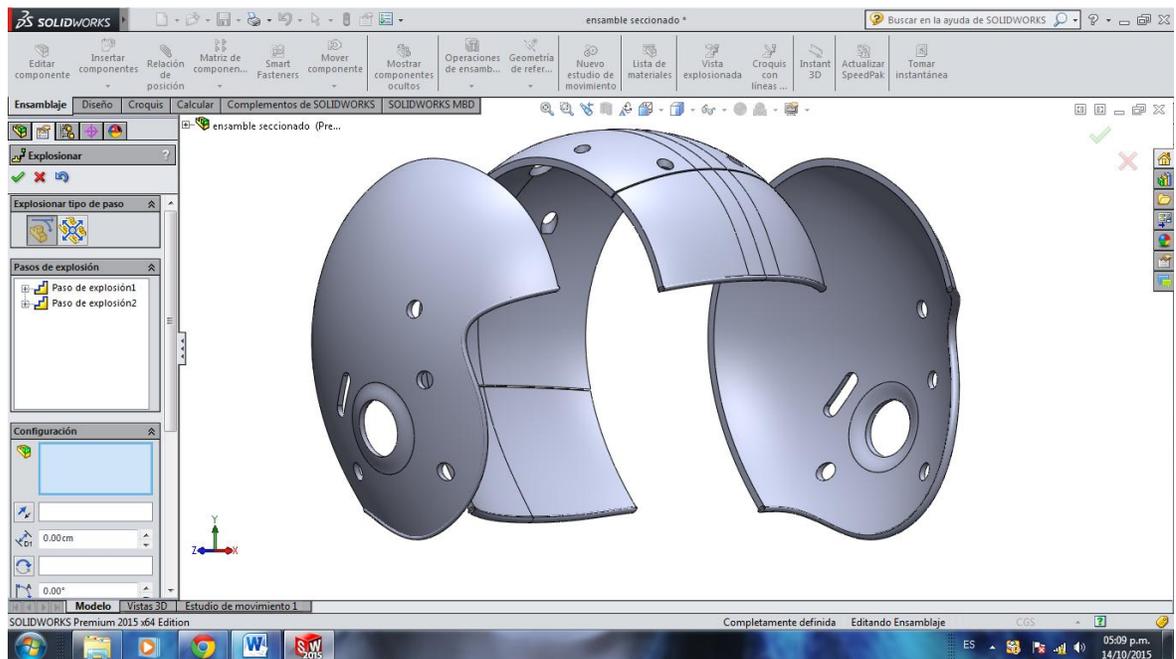


Figura IV.7.- Ensamble de las partes laterales

4. Por último, ya terminado el ensamble (Figura IV.8) se guarda con la extensión *parasolid (*.x_t)*.

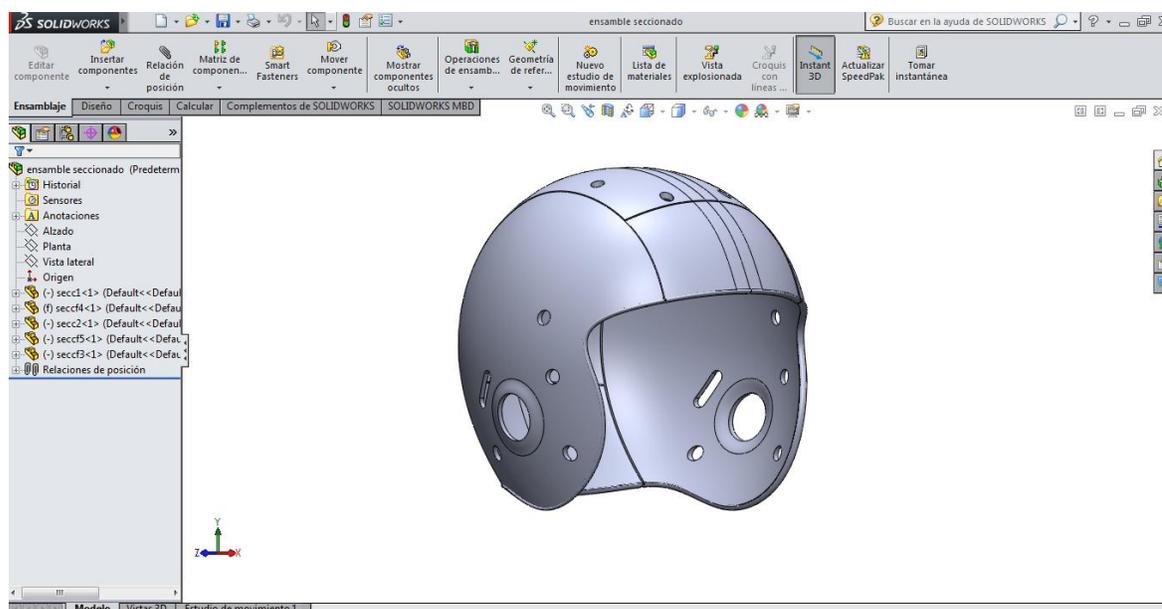


Figura IV.8.- Ensamble de casco terminado

IV.3.- Particularidades del estudio

Al igual que en el capítulo anterior y con el fin de poder realizar un comparativo entre ambos análisis, se toman las condiciones del casco completo. Asimismo el estudio es dinámico, por tratarse de un impacto, para lo cual se explica la metodología usada.

1. Dentro del programa *ANSYS WORKBENCH 15.0*[®], se seleccionan las unidades del proyecto, en el menú *unidades* seleccionar el sistema métrico (kg, m, s, °C, A, N, V).
2. Seleccionar *Explicit Dynamic* (Dinámico Explícito).
3. En el menú, seleccionar *Engineering Data* (datos de Ingeniería) e introducir las propiedades del policarbonato seleccionando *new material* (material nuevo) dando el nombre de casco, en las *Physical Properties* (propiedades físicas), seleccionar densidad y dar el valor 1200 kg/m^3 . Seleccionar *Isotropic Elasticity* (Isotrópico Elástico) y anotar el módulo de *Young* $2.28 \times 10^9 \text{ Pa}$ y una relación de *Poisson* de 0.37. Seleccionar dentro del menú *Plasticity*, la opción *Bilinear Isotropic Hardening* (endurecimiento isotrópico bilinear) un esfuerzo de cedencia de $6.5 \times 10^7 \text{ Pa}$ y un módulo tangente de 0.

4. Dados de alta las propiedades del material del casco, en el módulo *Design Modeler* (diseño y modelado) se importa la geometría del casco seleccionando su ubicación, se verifica que se haya importado correctamente.
5. Se selecciona el módulo *Model* (modelo), al abrir el modulo se carga la geometría por default, se le asigna el material *Casco* previamente establecido y se procede a realizar un mallado automático.
6. Para introducir las condiciones dinámicas del estudio, dentro del submenú *Initial Conditions* (condiciones iniciales) se introduce la velocidad del casco 9.3 m/s en el eje X y en los ajustes del análisis se introduce un tiempo final de 0.001 s. (Figura IV.9).
7. Con el fin de restringir los movimientos del modelo, se selecciona en la barra de herramientas *Supports* (soportes), en el submenú se selecciona *Fixed Support* (soporte fijo) y se selecciona la parte interior del casco para simular la sujeción de la cabeza. (Figura IV.11).

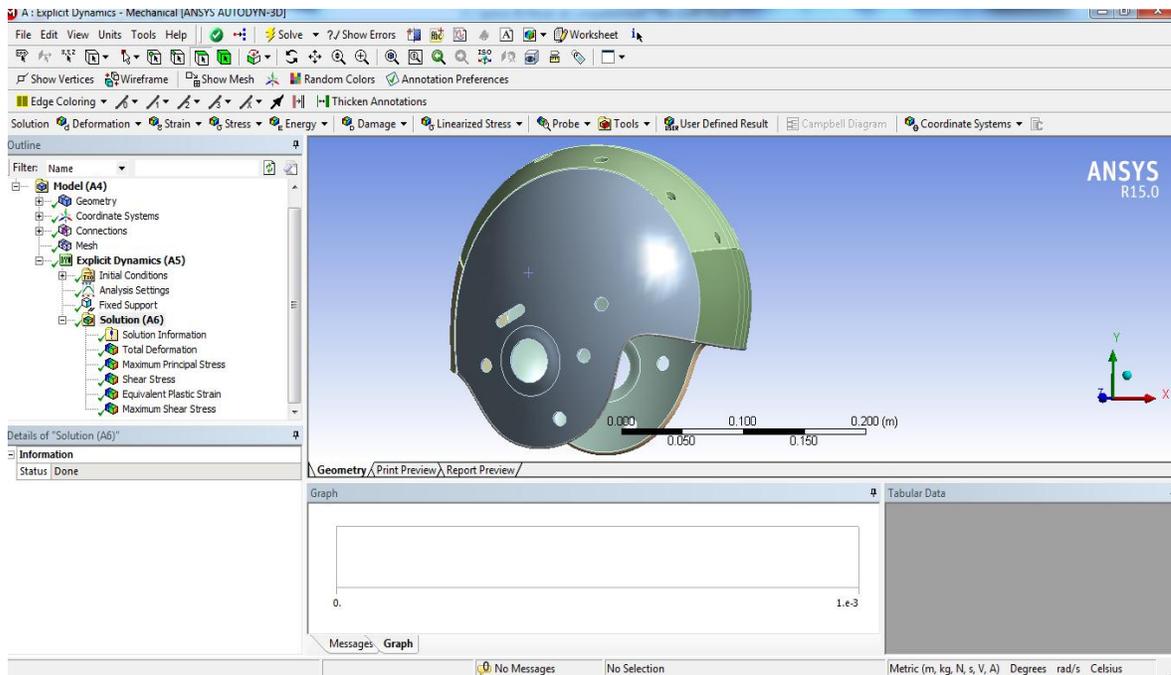


Figura IV.9.- Asignación de variables

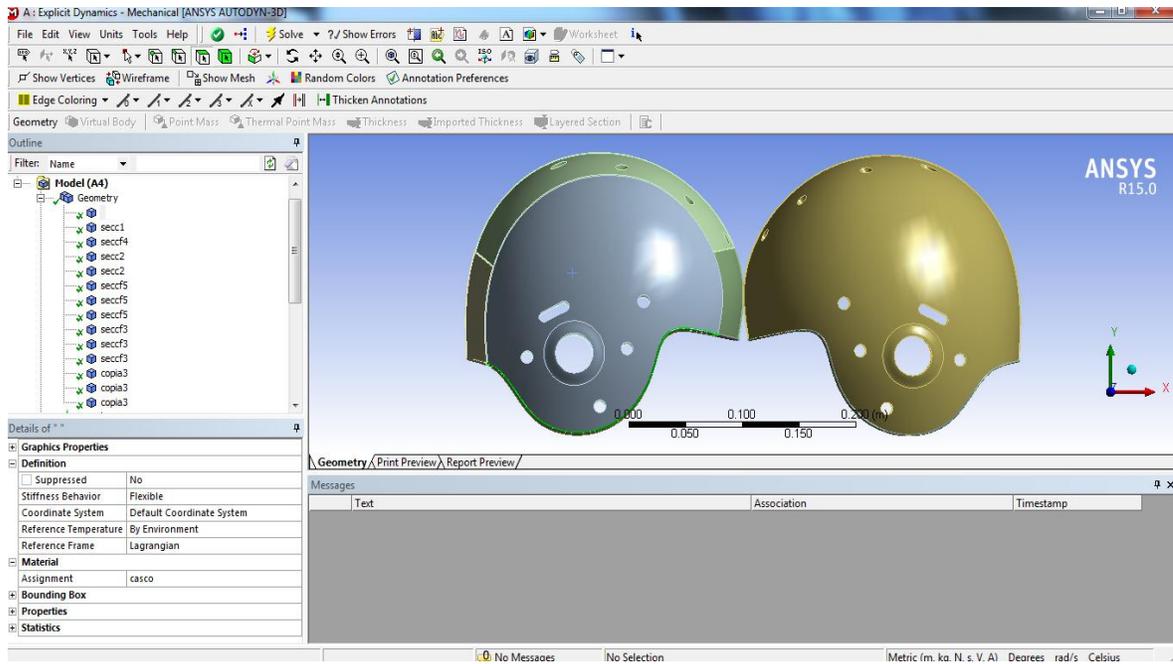


Figura IV.10.-Condiciones para el impacto frontal

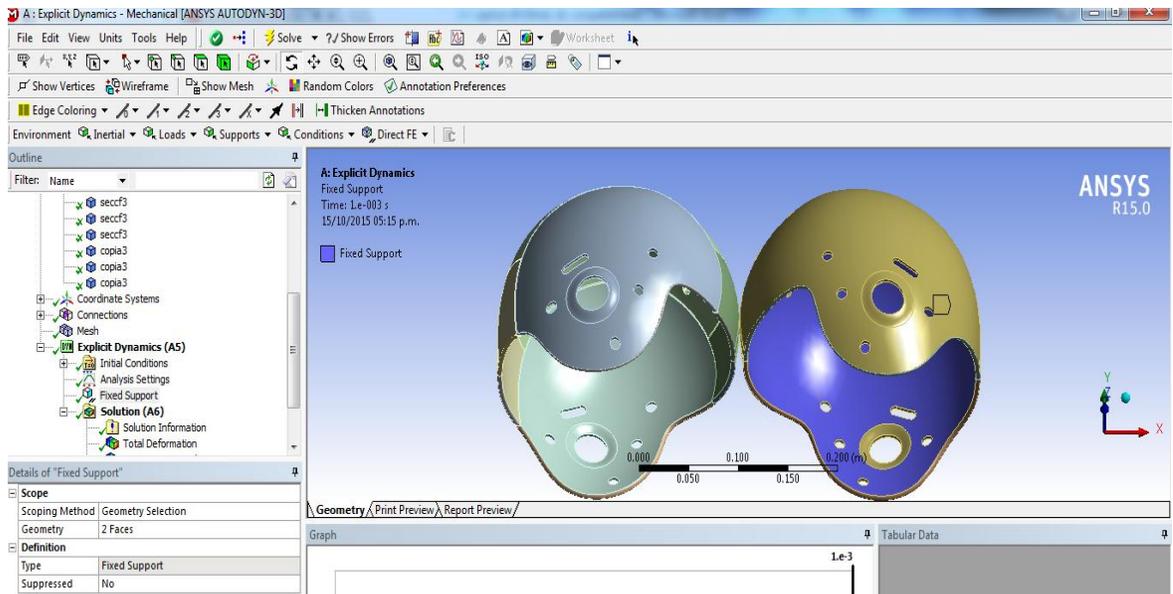


Figura IV.11.- Asignación de los soportes del estudio

IV.3.1.- Obtención de resultados

Para la obtención de resultados se utiliza el módulo de mecánica, observando tres casos de estudio los cuales son; impacto frontal, impacto frontal oblicuo y lateral. Por ser estos los mismos realizados al modelo del capítulo anterior, seleccionando los mismos parámetros a evaluar:

1. Desplazamiento total.
2. Esfuerzo von Mises.
3. Esfuerzo cortante.
4. Deformación plástica.
5. Esfuerzo cortante máximo.

IV.4.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal

A continuación se desarrollan los análisis numéricos.

IV.4.1.- Desplazamiento total *D*

Indica el primer momento en el que impactan los cascos, desde el momento en que inician el contacto, hasta el punto en que el desplazamiento llega a observarse físicamente.

Tabla IV.1.- Valores del desplazamiento total, en el intervalo de 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m)	Máximo (m)
0.00000	0	0.00000
0.00005	0	0.00049
0.00010	0	0.00109
0.00015	0	0.00163
0.00020	0	0.00242
0.00025	0	0.00327
0.00030	0	0.00365
0.00035	0	0.00410
0.00040	0	0.00449
0.00045	0	0.00490
0.00050	0	0.00552
0.00055	0	0.00615
0.00060	0	0.00677
0.00065	0	0.00739
0.00070	0	0.00801
0.00075	0	0.00864
0.00080	0	0.00924
0.00085	0	0.00986
0.00090	0	0.01046
0.00095	0	0.01107
0.00100	0	0.01166

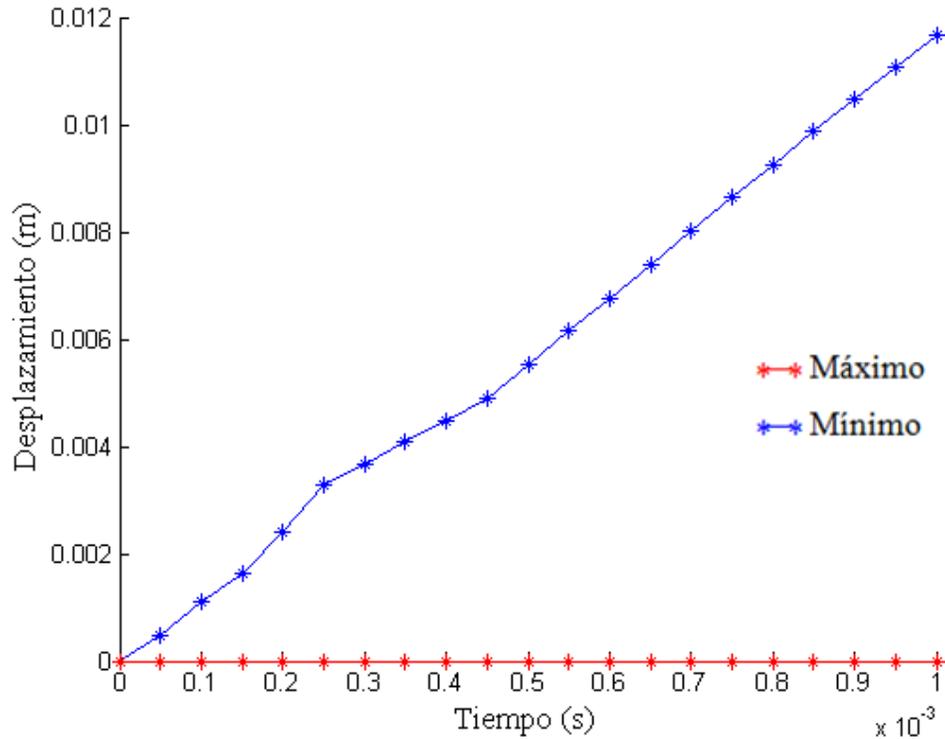


Figura IV.12.- Valores para el desplazamiento total en el intervalo de 0 a 0.001 s

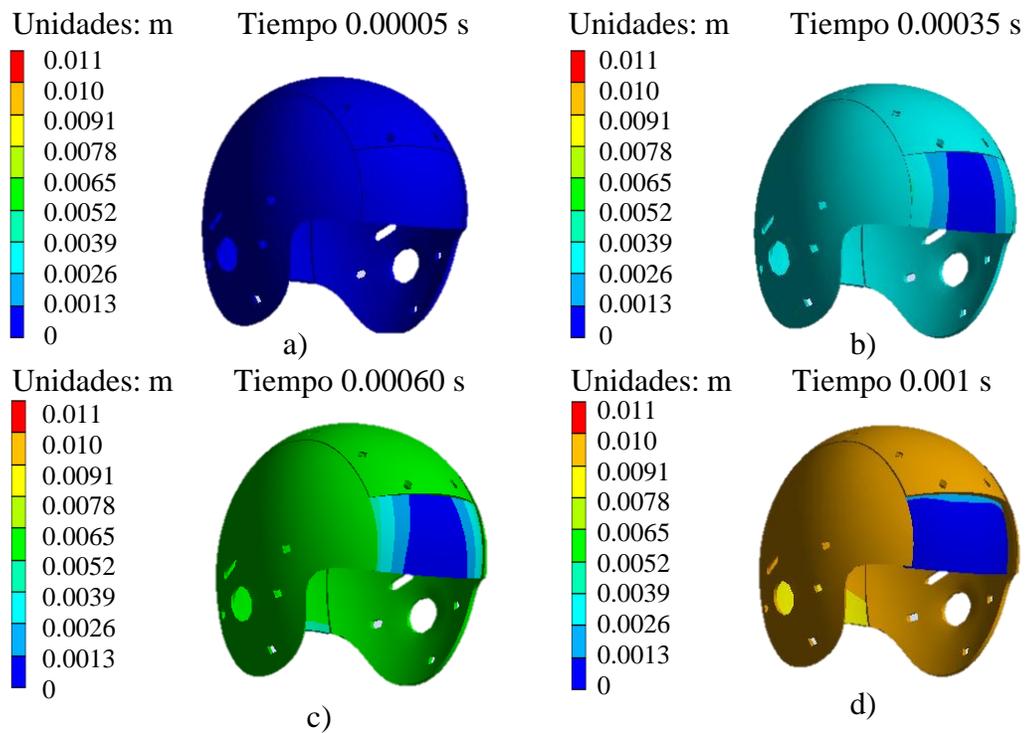


Figura IV.13.- Valores y ejemplificación gráfica del desplazamiento total en metros (m), Desplazamiento máximo. a) 0.00049 m. b) 0.00410 m. c) 0.0067 m. d) 0.0116 m.

Se observa la Tabla IV.1 y en la Figura IV.12, se aprecia que el desplazamiento no es completamente lineal. Se puede decir que el casco por su estructura, resiste el impacto, por lo cual se desplaza de forma inconstante. En la Figura IV.13a se puede observar el casco sin ningún desplazamiento en un tiempo de 0.00005 s. En la Figura IV.13b, en un tiempo de 0.00035 s, se observa un primer contacto en la zona frontal, a partir de este punto se puede observar un comportamiento lineal en la Figura IV.12. En la Figura IV.13c, se aprecia el desplazamiento en el resto del casco. Mientras, la parte frontal se mantiene sin un movimiento significativo. En la Figura IV.13d, se observa el desplazamiento que sufre el casco en la mayoría de su superficie. Mientras que la parte frontal se mantiene con un movimiento máximo de 0.0116 m.

IV.4.2.- Esfuerzo von Mises (σ)

Es importante realizar un estudio del esfuerzo equivalente, ya que puede indicar el momento en el que resulta la falla de material.

Tabla IV.2.- Valores para el esfuerzo von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	0	10.760
0.00010	0	15.831
0.00015	0	19.641
0.00020	0	22.427
0.00025	0	22.886
0.00030	0	24.370
0.00035	0	24.770
0.00040	0	23.542
0.00045	0	19.697
0.00050	0	20.742
0.00055	0	24.690
0.00060	0	31.588
0.00065	0	31.962
0.00070	0	22.220
0.00075	0	20.312
0.00080	0	16.763
0.00085	0	15.175
0.00090	0	13.074
0.00095	0	9.4964
0.00100	0	9.5937

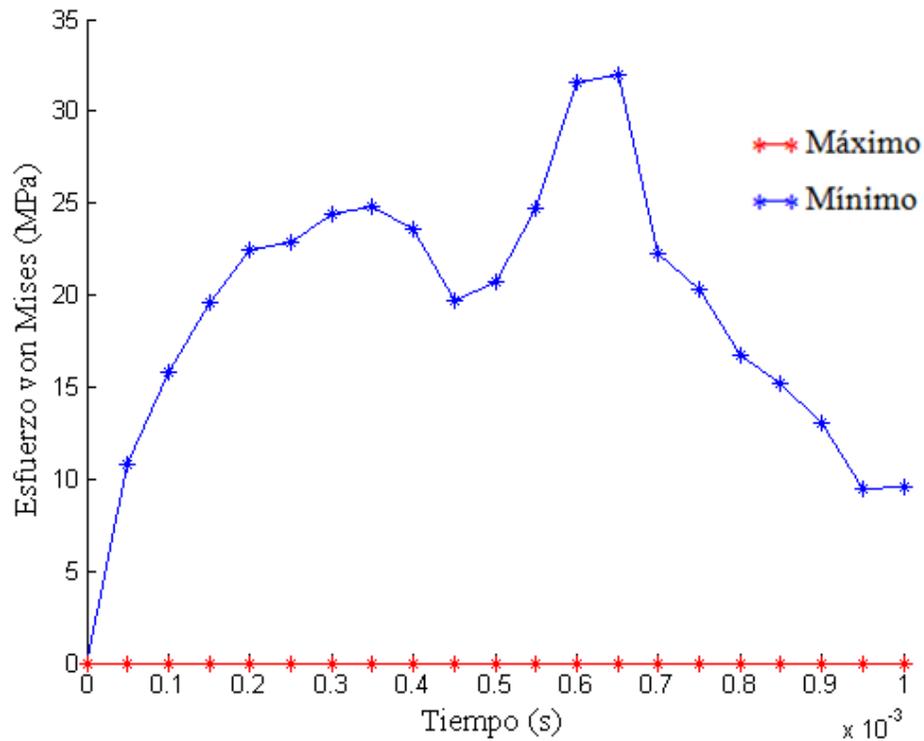


Figura IV.14.- Valores para el von Mises en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

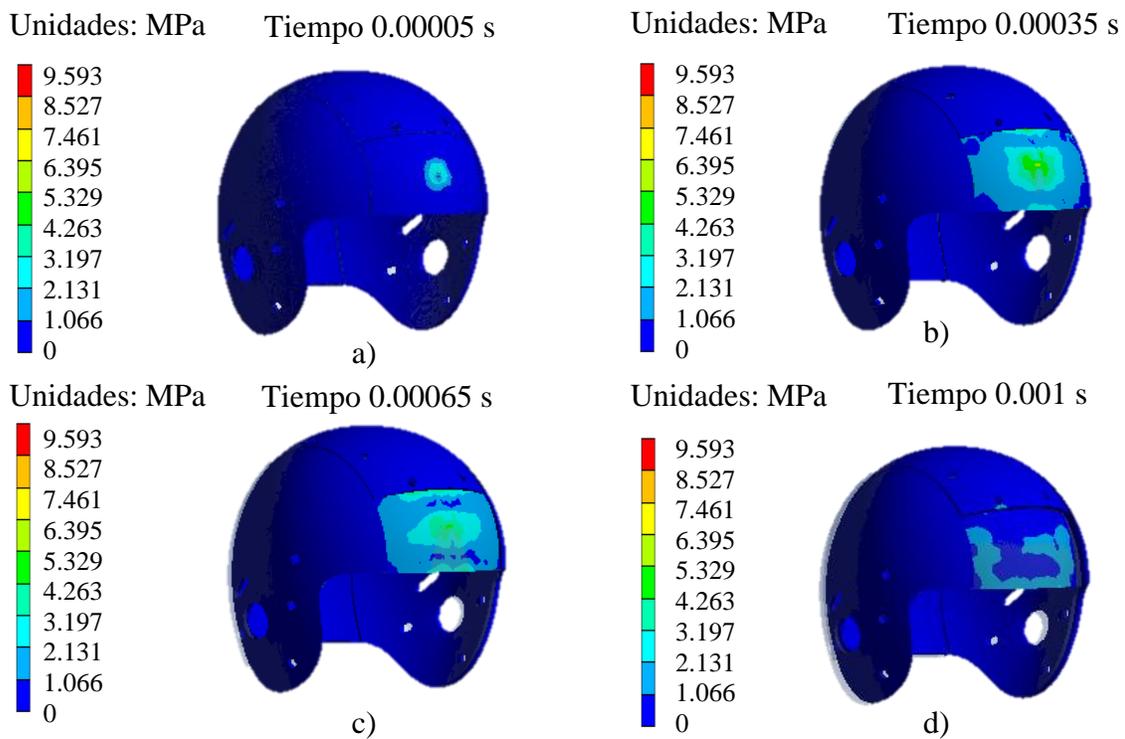


Figura IV.15.- Valores y ejemplificación gráfica del von Mises (MPa), Esfuerzo máximo. a) 10.76 MPa. b) 24.77 MPa. c) 31.588 MPa. d) 9.593 MPa.

Los valores presentados en la Figura IV.15a, indican valores de esfuerzos a tensión de 10.76 MPa, en el inicio del contacto del casco. En la Figura IV.15b, se observa el campo de distribución de los esfuerzos en la superficie frontal del casco, teniendo un valor 24.77 Mpa. Asimismo en la Figura IV.15c en el tiempo 0.00065 s, se obtiene valor de esfuerzo de 31.58 MPa siendo éste el punto más alto registrado, para reducir en el tiempo 0.001 a 9.59 MPa.

IV.4.3.- Esfuerzo cortante (τ)

Con el fin de observar de qué tipo de esfuerzo es al que cede el material, se analizan los esfuerzos cortantes, que indican el comportamiento tanto a tensión como a compresión del material sujeto a impacto, se muestran los valores en el plano XZ por ser los más críticos.

Tabla IV.3.- Valores para el esfuerzo cortante en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	-4.5984	4.7391
0.00010	-5.3777	5.7622
0.00015	-5.0623	5.5579
0.00020	-6.2983	6.7276
0.00025	-6.8875	7.5189
0.00030	-11.934	11.744
0.00035	-12.706	11.304
0.00040	-11.860	9.3464
0.00045	-6.9100	8.0763
0.00050	-4.0352	4.3366
0.00055	-4.7190	3.7006
0.00060	-6.8184	3.8363
0.00065	-5.1687	3.4495
0.00070	-3.8645	3.1522
0.00075	-3.6433	3.4834
0.00080	-4.1708	4.5512
0.00085	-5.5643	6.0879
0.00090	-3.4674	3.8439
0.00095	-1.9806	2.3910
0.00100	-2.0152	2.5685

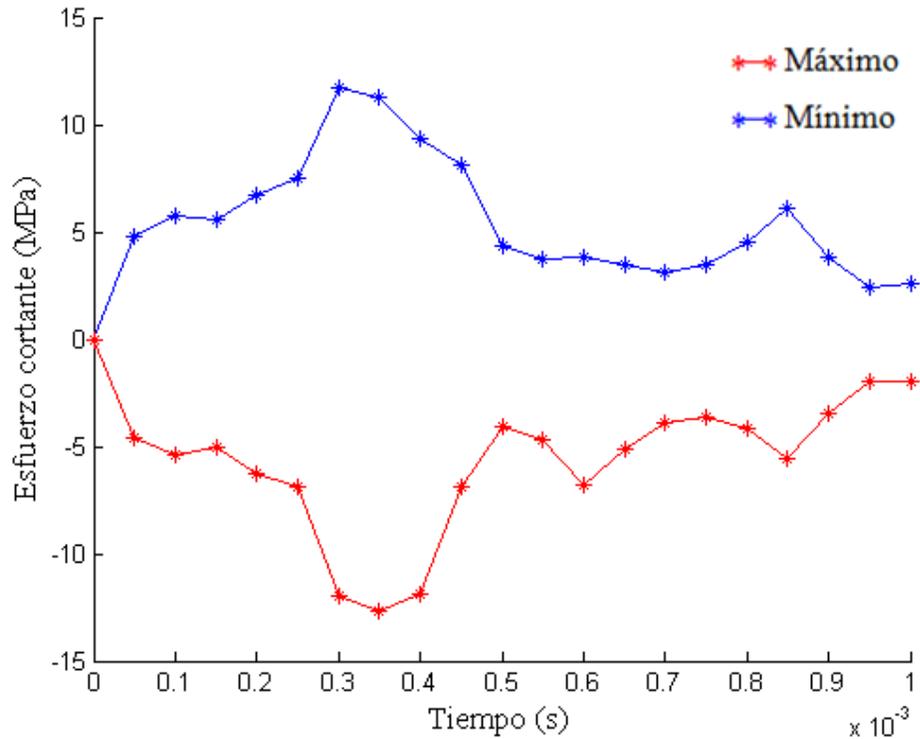


Figura IV.16.- Valores para el esfuerzo cortante en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

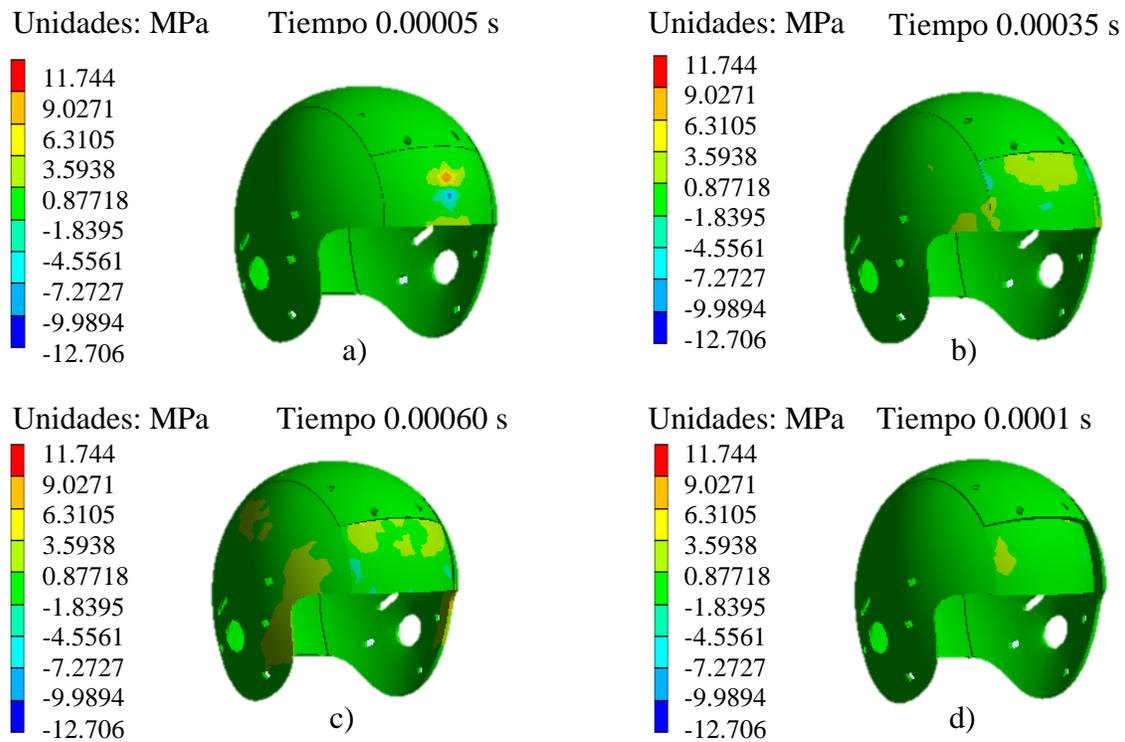


Figura IV.17.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante (MPa), Esfuerzo máximo. a) 4.739 MPa. b) 11.304 MPa. c) 3.836 MPa. d) 2.568 MPa.

Los valores suceden de una manera constante tanto en tensión como en compresión, se puede determinar que la estructura del casco no falla por el trabajo de los esfuerzos cortantes.

IV.4.4.- Deformación plástica (D_p)

Ya que se está considerando la zona elástica, así como la plástica del material, recordando que en las cargas de impacto se tiene un comportamiento frágil del material debido a lo súbito de la carga, se usa el análisis del equivalente plástico para observar el fenómeno de deformación del material.

Tabla IV.4.- Valores para la deformación plástica en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m/m)	Máximo (m/m)
0.00000	0	0
0.00005	0	0
0.00010	0	0
0.00015	0	0
0.00020	0	0
0.00025	0	0
0.00030	0	0
0.00035	0	0
0.00040	0	0
0.00045	0	0
0.00050	0	0
0.00055	0	0
0.00060	0	0
0.00065	0	0
0.00070	0	0
0.00075	0	0
0.00080	0	0
0.00085	0	0
0.00090	0	0
0.00095	0	0
0.00100	0	0

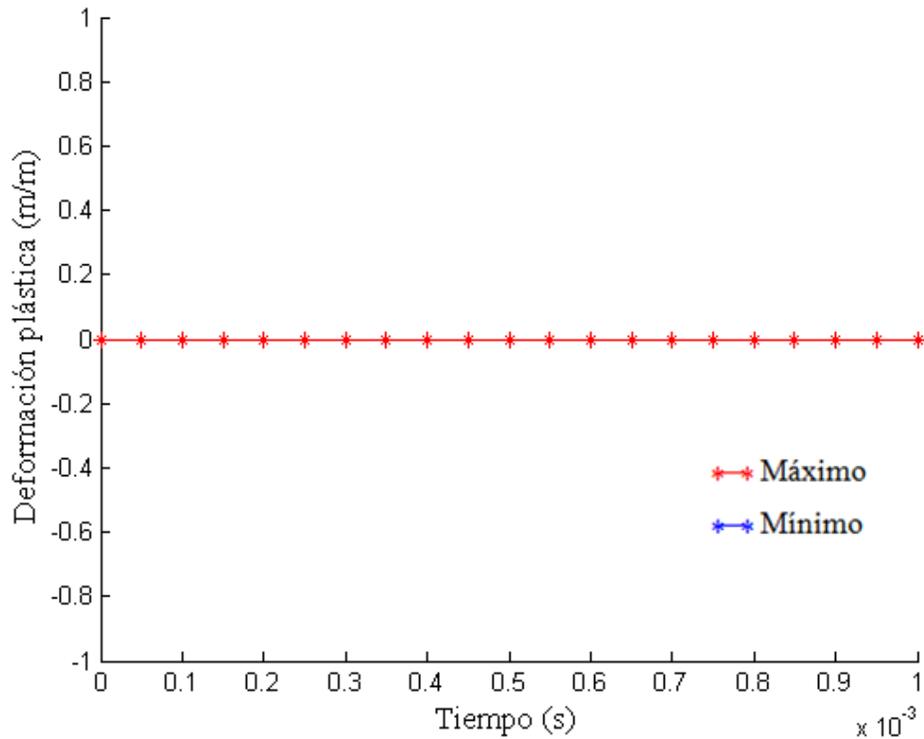


Figura IV.18.- Valores para la deformación plástica en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

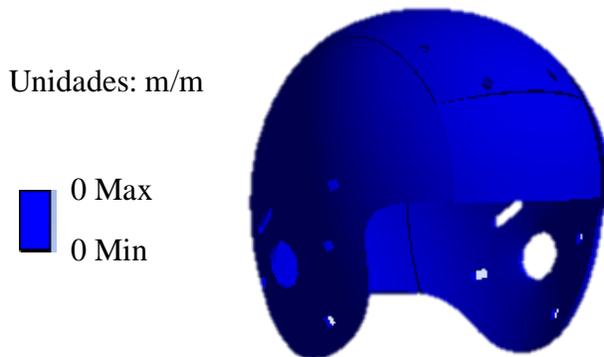


Figura IV.19.- Valores y ejemplificación gráfica de la deformación plástica en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Como se ha observado en los análisis de desplazamiento y esfuerzos, dentro del primer intervalo, el contacto de impacto sucede en el punto de 0.00005 s, se originan valores de 0 hasta el tiempo 0.001 s. por lo que no existe una deformación plástica.

IV.4.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x.}$)

Dentro de la falla del material al cortante, se debe de observar el máximo punto de este para considerar la importancia de su acción.

Tabla IV.5.- Valores para el esfuerzo cortante máximo en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	0	5.9255
0.00010	0	8.8294
0.00015	0	10.975
0.00020	0	12.625
0.00025	0	13.074
0.00030	0	13.898
0.00035	0	14.209
0.00040	0	13.529
0.00045	0	11.317
0.00050	0	10.956
0.00055	0	12.905
0.00060	0	16.432
0.00065	0	16.767
0.00070	0	11.457
0.00075	0	10.868
0.00080	0	9.5579
0.00085	0	8.5200
0.00090	0	7.1501
0.00095	0	5.0573
0.00100	0	5.3430

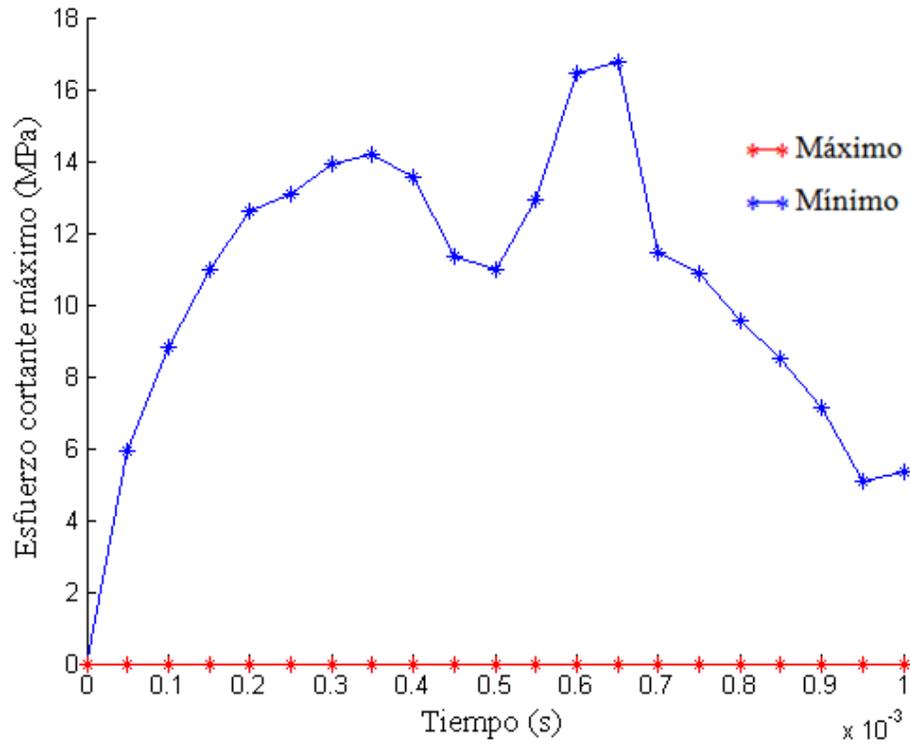


Figura IV.20.- Valores para el esfuerzo cortante máximo en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

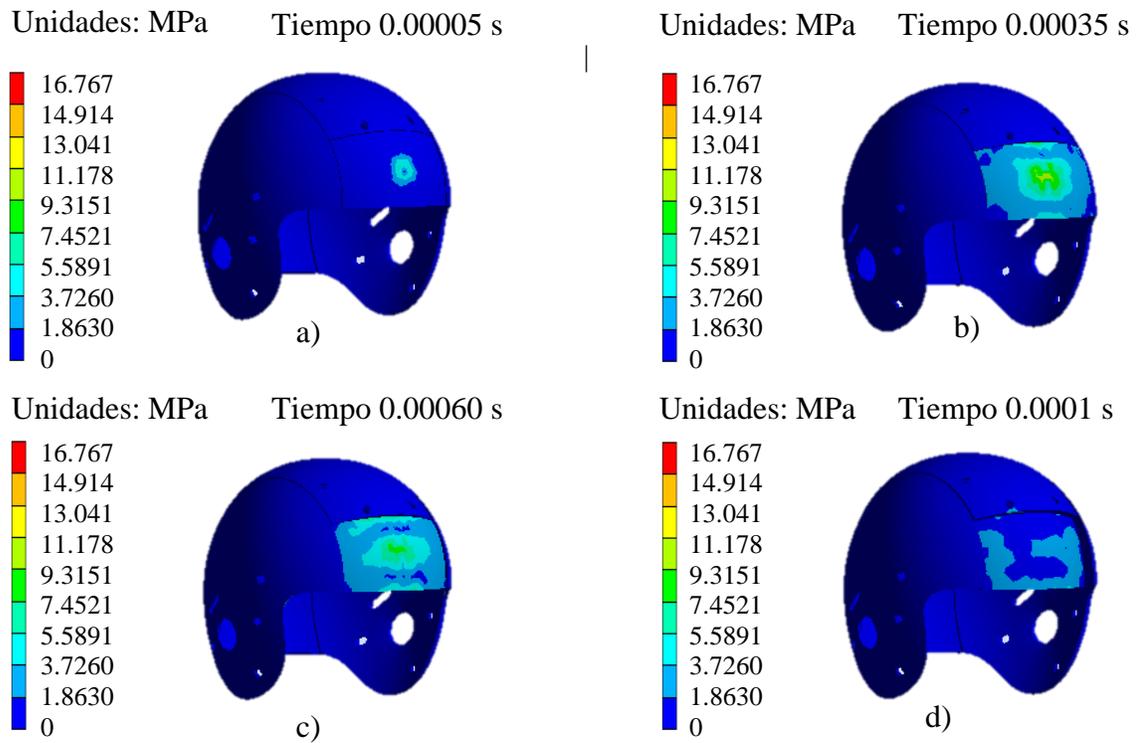


Figura IV.21.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo (MPa), Esfuerzo máximo. a) 5.9255 MPa. b) 14.209 MPa. c) 16.432 MPa. d) 5.343 MPa.

En el tiempo 0.00005 s comienza el contacto y los esfuerzos se inician de manera parabólica, hasta llegar a un punto máximo en el tiempo 0.00035 s, para caer en el tiempo 0.0005 s y alcanzar el máximo en el tiempo 0.00065 s teniendo 16.7 MPa y descender a 5.3 MPa en el tiempo 0.001 s.

IV.5.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal oblicuo

Se utiliza el mismo modelo del estudio anterior, ya que es el mismo objeto el que se desea someter al estudio, igualmente se somete a una carga dinámica siguiendo la misma metodología anterior, en un ángulo aproximado de 45°.

IV.5.1.- Desplazamiento total *D*

Indica el primer momento en el que impactan los cascos en forma frontal oblicua, desde el momento en que inician el contacto, hasta el punto en que el desplazamiento llega a observarse físicamente.

Tabla IV.6.- Valores del desplazamiento total, en el intervalo de 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m)	Máximo (m)
0.00000	0	0.00000
0.00005	0	0.00047
0.00010	0	0.00108
0.00015	0	0.00218
0.00020	0	0.00235
0.00025	0	0.00248
0.00030	0	0.00303
0.00035	0	0.00360
0.00040	0	0.00421
0.00045	0	0.00477
0.00050	0	0.00540
0.00055	0	0.00597
0.00060	0	0.00650
0.00065	0	0.00727
0.00070	0	0.00804
0.00075	0	0.00870
0.00080	0	0.00940
0.00085	0	0.01003
0.00090	0	0.01066
0.00095	0	0.01125
0.00100	0	0.01199

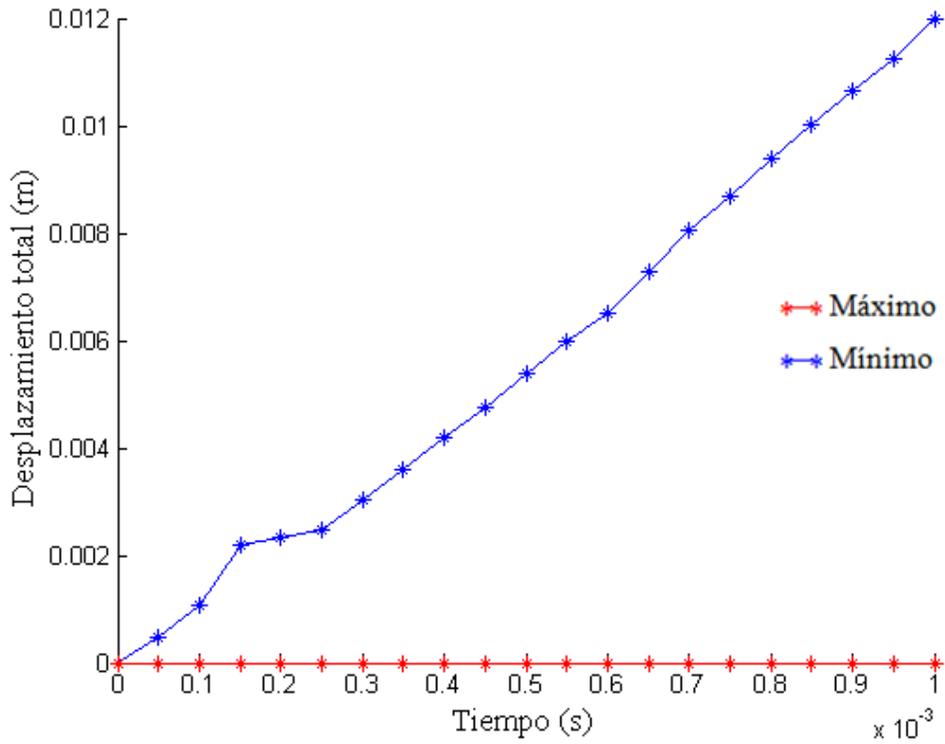


Figura IV.22.- Valores del desplazamiento tota, en el intervalo de 0 a 0.001 s

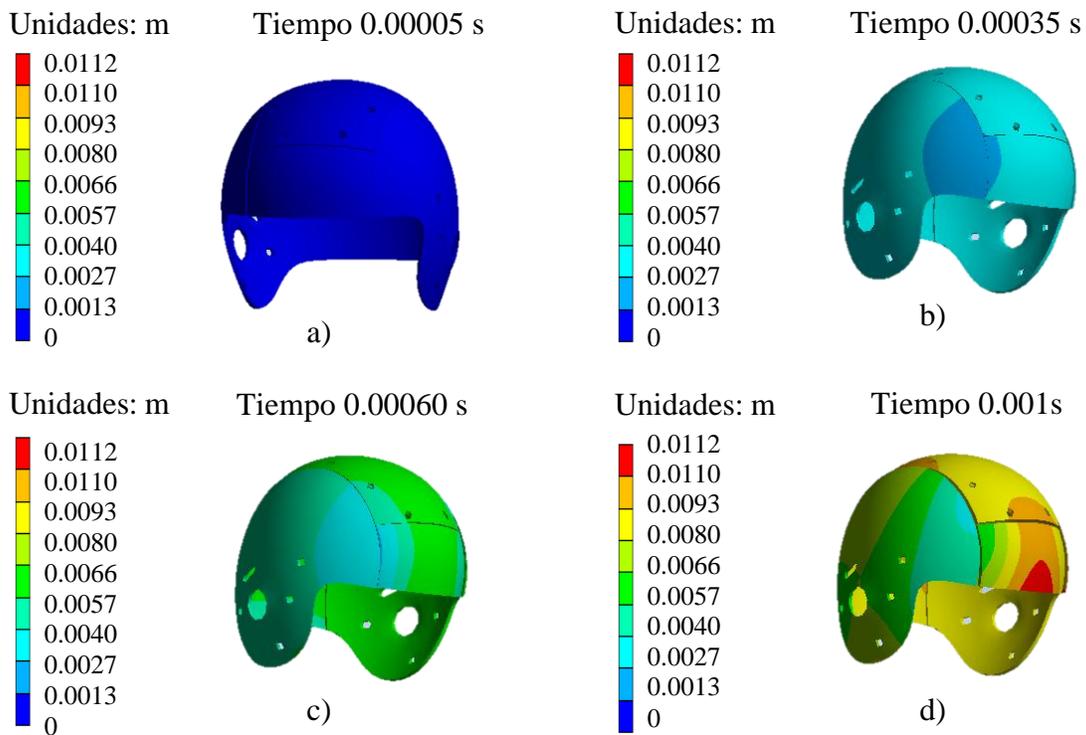


Figura IV.23.- Valores y ejemplificación gráfica del desplazamiento total en metros (m), Desplazamiento máximo. a) 0.00047 m. b) 0.0036 m. c) 0.0065. d) 0.011 m.

En la Tabla IV.6 y en la Figura IV.22, se aprecia que el desplazamiento no es completamente lineal, se puede decir que el casco por su estructura, resiste el impacto, por lo cual se desplaza de forma inconstante, en la Figura IV.23a, se puede observar el casco sin ningún desplazamiento en un tiempo de 0.00005 s, en la Figura IV.23b, en un tiempo de 0.00035 s, se observa un primer contacto en la zona frontal oblicua y un movimiento en toda la superficie lateral y frontal, a partir de este punto se puede observar un comportamiento lineal en la Figura IV.22. En la Figura IV.23c, se aprecia el desplazamiento en el resto del casco, en la Figura IV.23d, se observa el desplazamiento que sufre el casco en la mayoría de su superficie, mientras que la parte frontal se mantiene se observa un momento crítico.

IV.5.2.- Esfuerzo von Mises (σ)

Es importante realizar un estudio del esfuerzo principal máximo, ya que puede indicar el momento en el que resulta la falla de material.

Tabla IV.7.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	0	12.366
0.00010	0	6.8291
0.00015	0	7.5061
0.00020	0	12.561
0.00025	0	13.513
0.00030	0	18.426
0.00035	0	19.417
0.00040	0	22.697
0.00045	0	26.279
0.00050	0	26.750
0.00055	0	31.004
0.00060	0	30.011
0.00065	0	30.584
0.00070	0	32.498
0.00075	0	31.347
0.00080	0	31.519
0.00085	0	34.352
0.00090	0	31.174
0.00095	0	35.638
0.00100	0	37.014

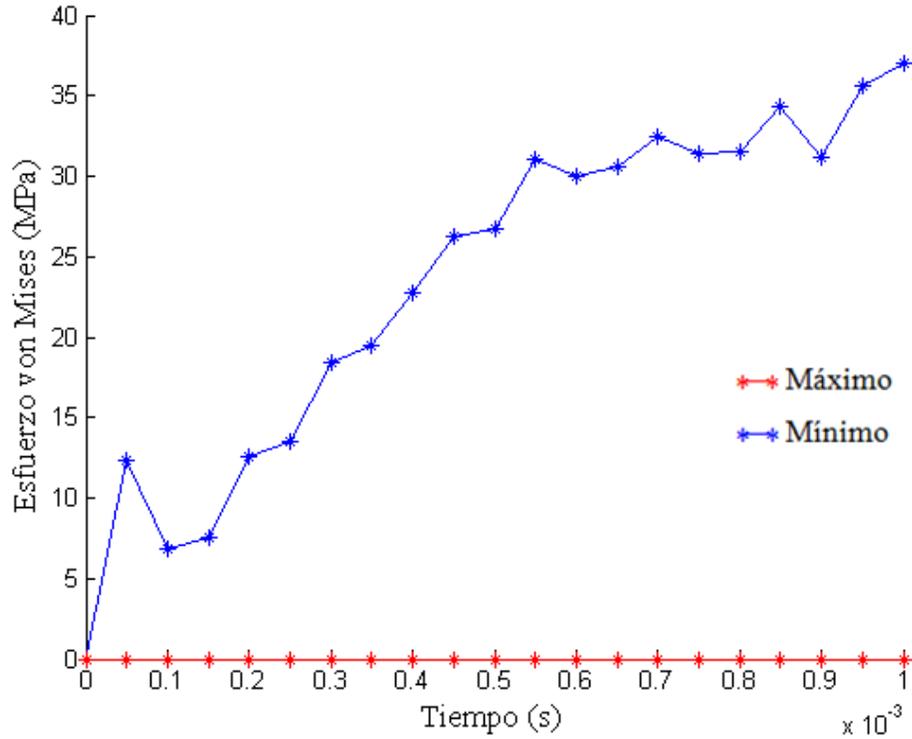


Figura IV.24.- Valores del esfuerzo von Mises, en el intervalo de 0 a 0.001 s

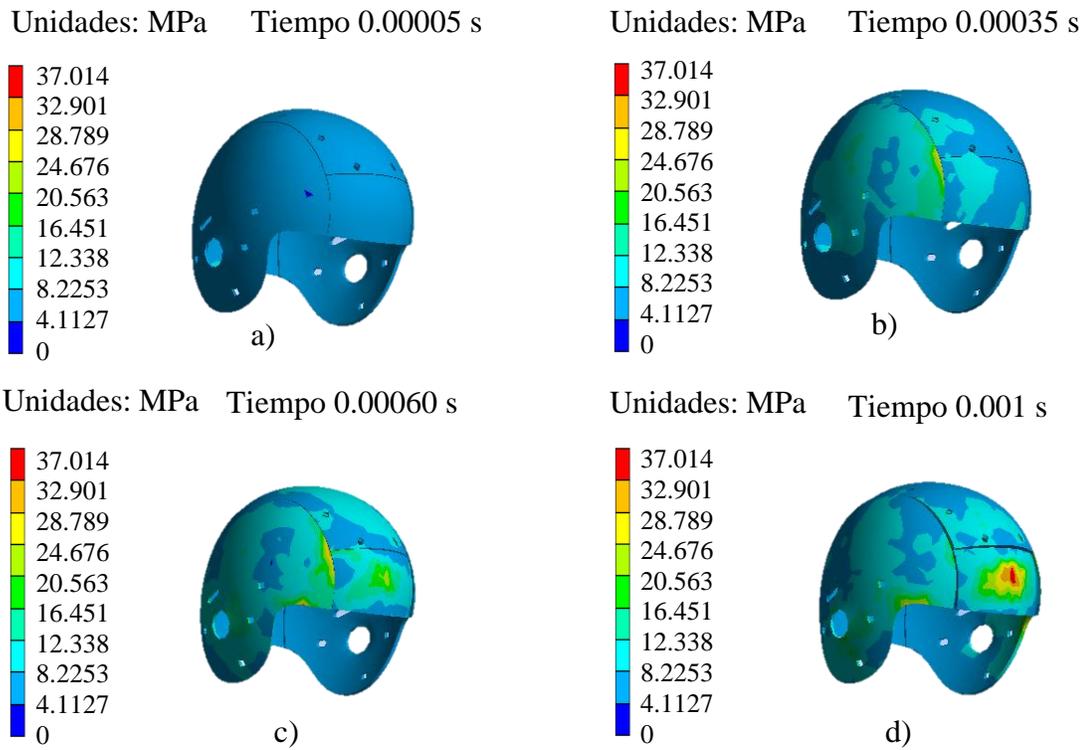


Figura IV.25.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo de von Mises (MPa), Valor máximo. a) 12.36 MPa., b) 19.41 MPa., c) 30.01 MPa., d) 37.01 MPa.

Los valores presentados en la Figura IV.25a, indican valores de esfuerzos a tensión. En la Figura IV.25b, se observa el campo de distribución de los esfuerzos en la superficie lateral, frontal y superior del casco, teniendo valores de 19.41MPa. Así mismo en la Figura IV.25c en el tiempo 0.00060 s se da un máximo de 12.88 MPa, se tiene el punto más alto en el tiempo 0.001 de 37.01 MPa. La gráfica se desarrolla de una forma parabólica, aunque los valores se dan de una forma alternada

IV.5.3.- Esfuerzo cortante (τ)

Con el fin de observar de qué tipo de esfuerzo es al que cede el material, se analizan los esfuerzos cortantes, que indican el comportamiento tanto a tensión como a compresión del material sujeto a impacto, se muestran los valores en el plano YZ por ser los más críticos.

Tabla IV.8.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	-1.0869	0.65159
0.00010	-1.9167	2.4383
0.00015	-2.2359	2.2993
0.00020	-2.4417	3.1186
0.00025	-2.6978	4.0389
0.00030	-2.7943	3.4183
0.00035	-2.9794	3.5850
0.00040	-2.9527	4.8308
0.00045	-3.3508	5.4392
0.00050	-5.2839	6.0006
0.00055	-7.3750	5.9167
0.00060	-6.7456	7.6788
0.00065	-5.4858	7.6796
0.00070	-3.7434	7.4333
0.00075	-3.6952	6.9010
0.00080	-3.1476	6.7833
0.00085	-2.9386	6.8990
0.00090	-3.6860	6.3892
0.00095	-3.7541	5.7944
0.00100	-3.6925	5.1914

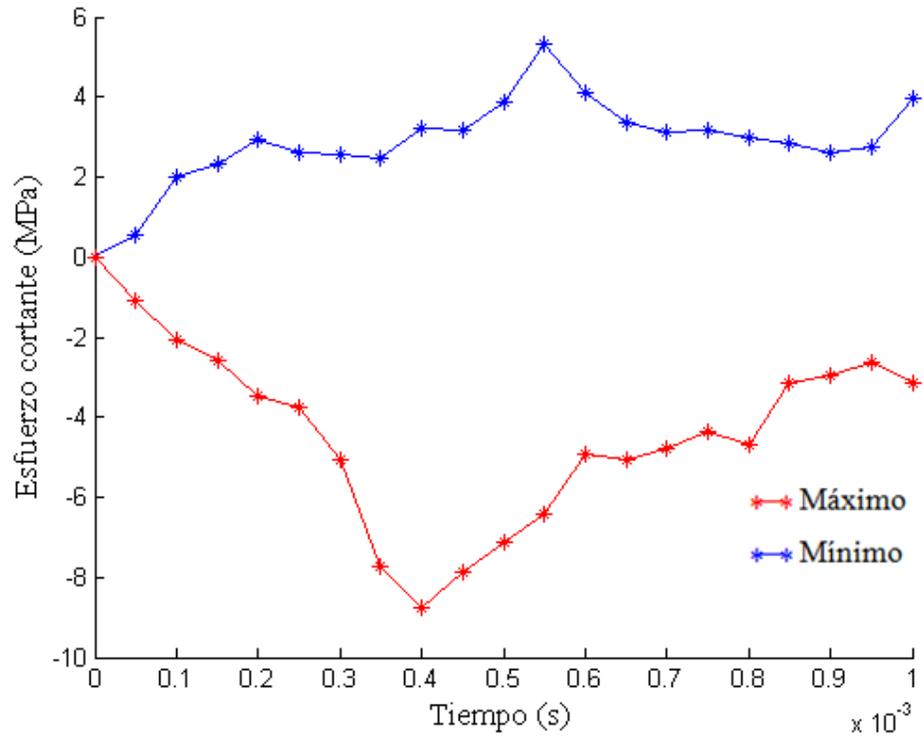


Figura IV.26.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de 0 a 0.001 s

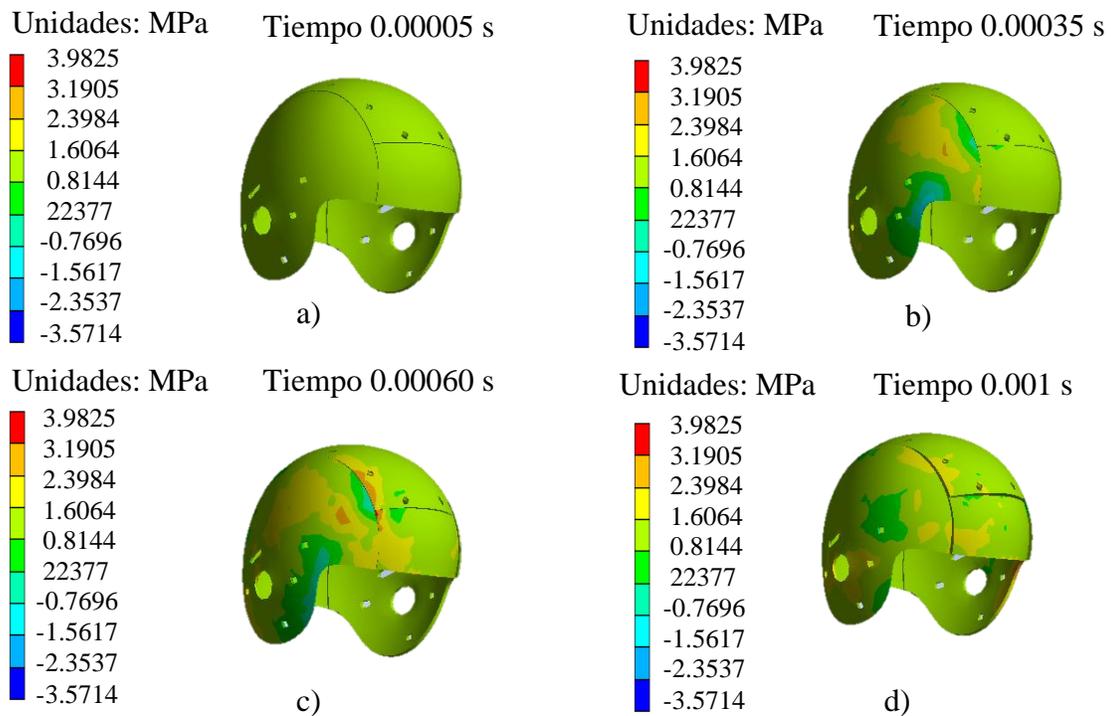


Figura IV.27.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante (MPa), Valores máximos. a) 0.657 MPa. b) 3.585 MPa. c) 7.678 MPa. d) 5.191 MPa.

Los valores suceden de una manera constante tanto en tensión como en compresión, se puede determinar que la estructura del casco no falla por el trabajo de los esfuerzos cortantes.

IV.5.4.- Deformación plástica (D_p)

Ya que se está considerando la zona elástica, así como la plástica del material, recordando que en las cargas de impacto se tiene un comportamiento frágil del material debido a lo súbito de la carga, se usa el análisis del equivalente plástico para observar el fenómeno de deformación del material.

Tabla IV.9.- Valores de la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m/m)	Máximo (m/m)
0.00000	0	0.000000000
0.00005	0	0.000000000
0.00010	0	0.000000000
0.00015	0	0.000000000
0.00020	0	0.000000000
0.00025	0	0.000000000
0.00030	0	0.000000000
0.00035	0	0.000000000
0.00040	0	0.000000000
0.00045	0	0.000000000
0.00050	0	0.000000000
0.00055	0	0.000000000
0.00060	0	0.000000000
0.00065	0	0.000000000
0.00070	0	0.000000000
0.00075	0	0.000325280
0.00080	0	0.000420440
0.00085	0	0.001974700
0.00090	0	0.002687600
0.00095	0	0.002687600
0.00100	0	0.002687600

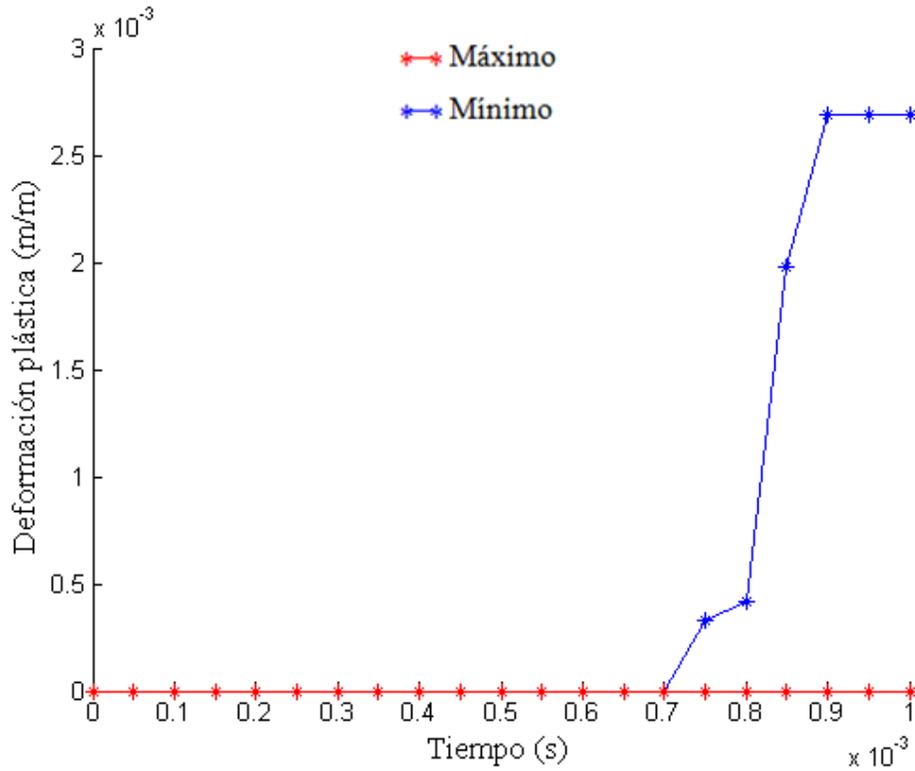


Figura IV.28.- Valores de la deformación, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

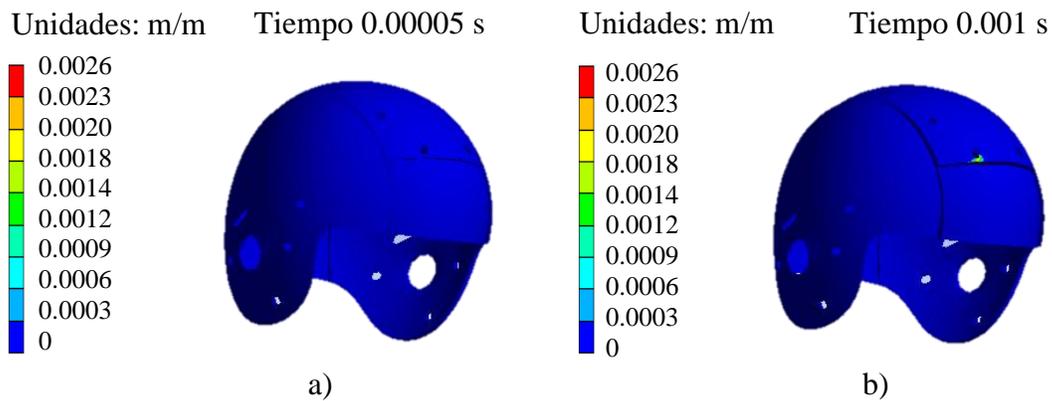


Figura IV.29.- Valores y ejemplificación gráfica de la deformación plástica

Si bien se aprecian valores de una deformación plástica (Figura IV.29b), estos no son significativos.

IV.5.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x.}$)

Dentro de la falla del material al cortante, se debe de observar el máximo punto de este para considerar la importancia de su acción.

Tabla IV.10.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	0	6.2594
0.00010	0	3.9078
0.00015	0	4.3191
0.00020	0	7.1136
0.00025	0	6.9748
0.00030	0	9.5568
0.00035	0	10.442
0.00040	0	11.795
0.00045	0	13.674
0.00050	0	13.830
0.00055	0	17.325
0.00060	0	15.717
0.00065	0	15.972
0.00070	0	17.040
0.00075	0	16.410
0.00080	0	16.543
0.00085	0	18.049
0.00090	0	16.382
0.00095	0	18.213
0.00100	0	18.852

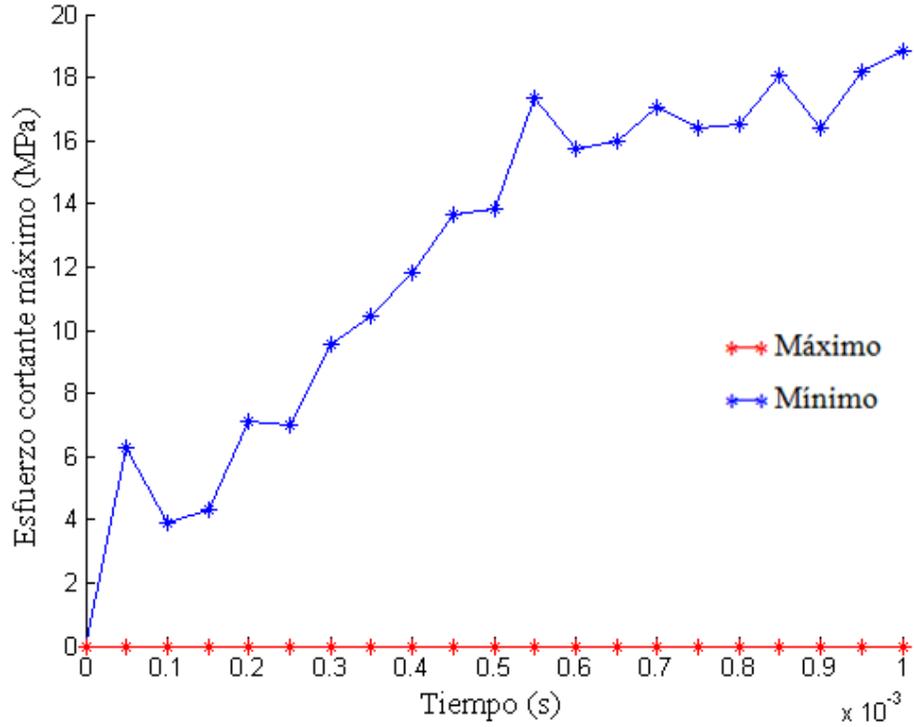


Figura IV.30.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

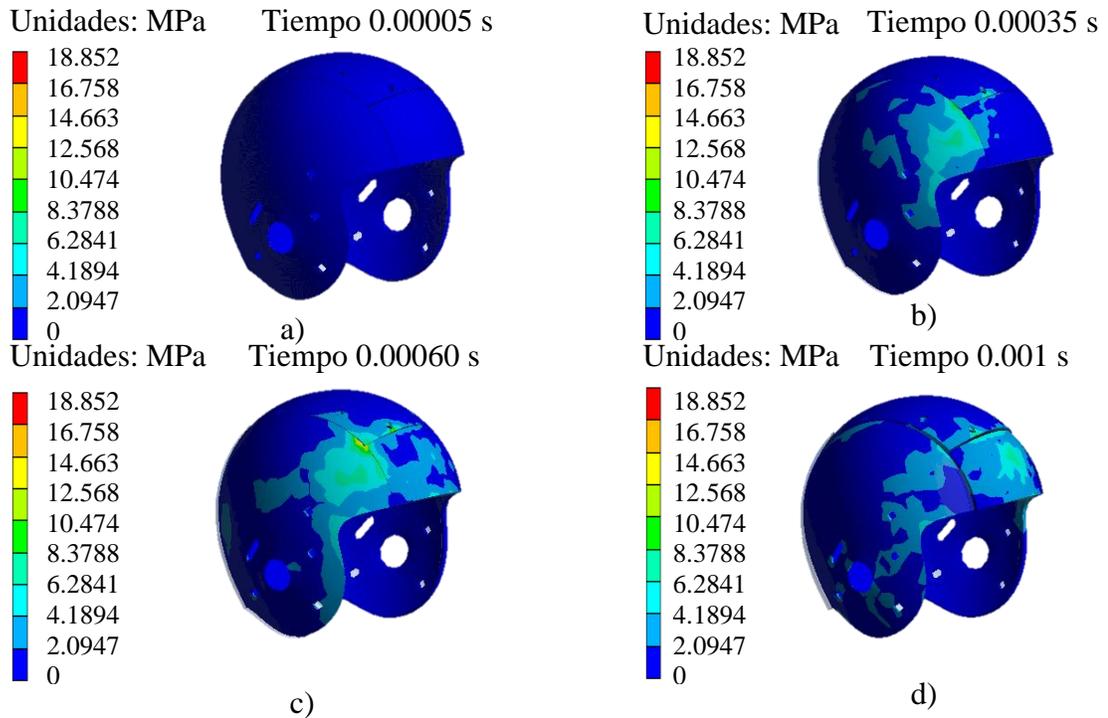


Figura IV.31.- Valores y ejemplificación del esfuerzo cortante máximo a) 6.259 MPa, b) 10.442 MPa, c) 15.717 y d) 18.852 MPa.

IV.6.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto lateral.

Se utiliza el mismo modelo del estudio anterior, ya que es el mismo objeto el que se desea someter al estudio, igualmente se somete a una carga dinámica con un impacto lateral, siguiendo la misma metodología anterior.

IV.6.1.- Desplazamiento total *D*

Indica el primer momento en el que impactan los cascos, desde el momento en que inician el contacto, hasta el punto en que el desplazamiento llega a observarse físicamente.

Tabla IV.11.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.

Tiempo (s)	Mínimo (m)	Máximo (m)
0.00000	0.0000000	0.0000000
0.00005	0.0000000	0.0005988
0.00010	0.0000000	0.0014494
0.00015	0.0000000	0.0021007
0.00020	0.0000000	0.0026446
0.00025	0.0000000	0.0031620
0.00030	0.0000000	0.0036481
0.00035	0.0000001	0.0041157
0.00040	0.0000001	0.0046164
0.00045	0.0000025	0.0051064
0.00050	0.0000019	0.0055599
0.00055	0.0000017	0.0060159
0.00060	0.0000011	0.0064979
0.00065	0.0000037	0.0069584
0.00070	0.0000043	0.0074122
0.00075	0.0000078	0.0078745
0.00080	0.0000113	0.0083430
0.00085	0.0000243	0.0088005
0.00090	0.0000493	0.0092669
0.00095	0.0000838	0.0097258
0.00100	0.0001263	0.0101870

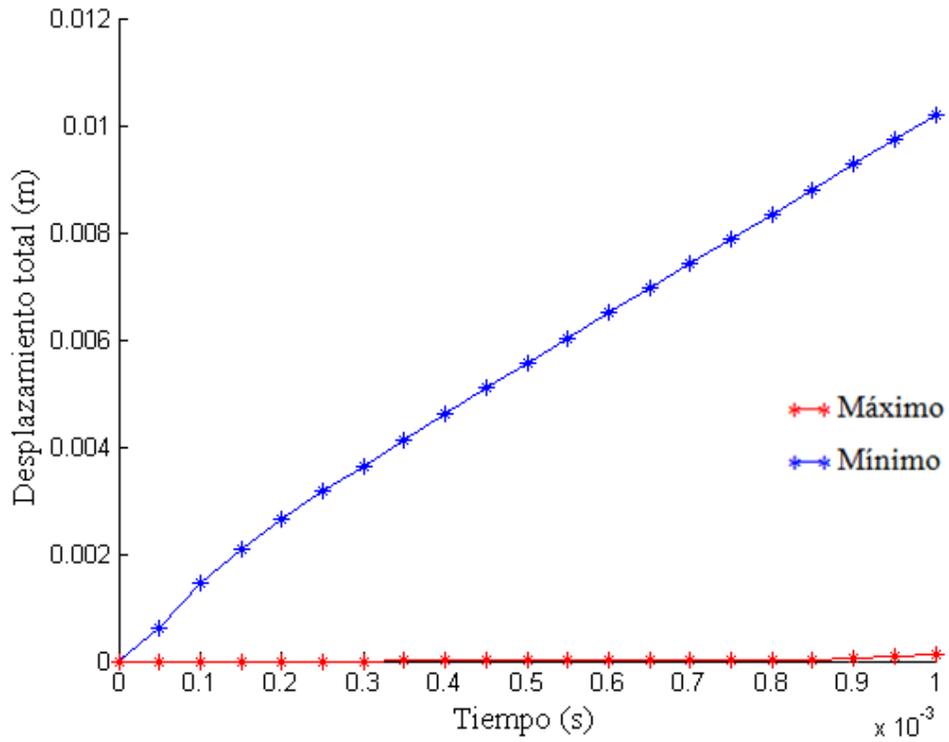


Figura IV.32.- Valores del desplazamiento, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

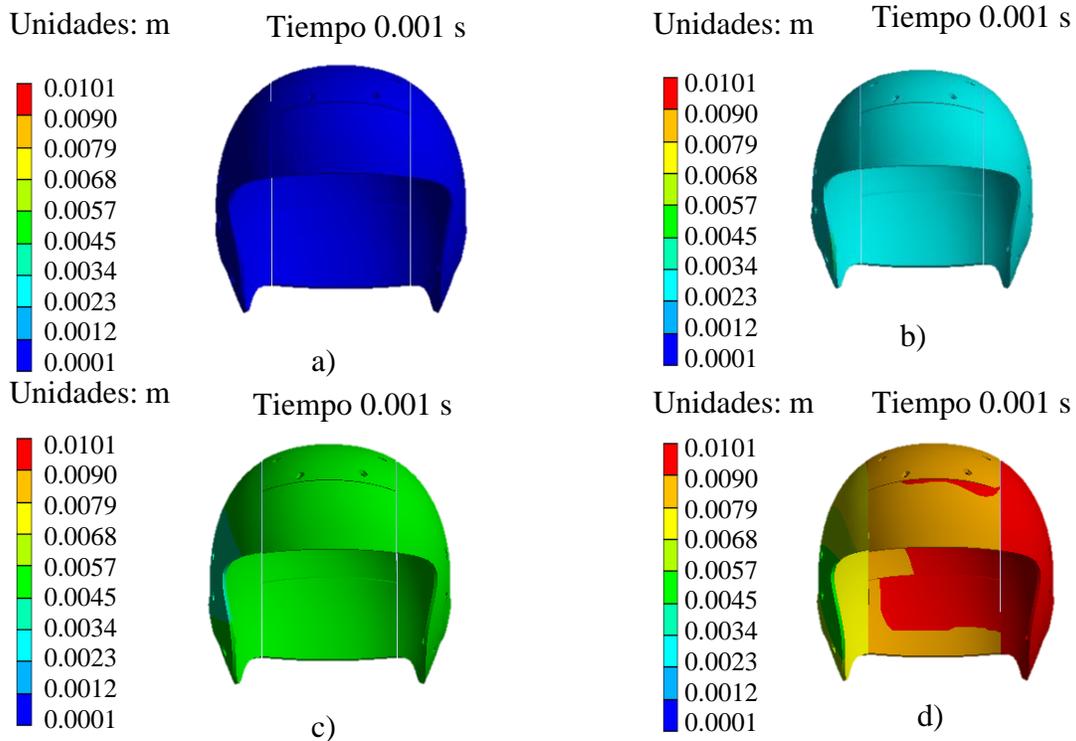


Figura IV.33.- Valores y ejemplificación gráfica del desplazamiento en metros (m), Desplazamiento máximo. a) 0.00059 m. b) 0.0041 m. c) 0.0064 m. d) 0.010 m.

En la Tabla IV.11 y en la Figura IV.32, se aprecia que el desplazamiento casi es completamente lineal aunque por muy poco, en la Figura IV.33a, se puede observar el casco sin ningún desplazamiento en un tiempo de 0.00005 s, en la Figura IV.33b, en un tiempo de 0.00035 s, se observa un primer contacto en la zona lateral y un movimiento en toda la superficie, a partir de este punto se puede observar un comportamiento lineal en la Figura IV.32. En la Figura IV.33c, se aprecia el desplazamiento en la totalidad del casco, en la Figura IV.33d, se observa el desplazamiento que sufre el casco, teniendo el punto crítico la zona contraria a donde fue impactado.

IV.6.2.- Esfuerzo von Mises (σ)

Es importante realizar un estudio del esfuerzo principal máximo, ya que puede indicar el momento en el que resulta la falla de material.

Tabla IV.12.- Valores del esfuerzo de von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	0	9.0195
0.00010	0	8.6972
0.00015	0	9.5419
0.00020	0	10.712
0.00025	0	11.244
0.00030	0	12.007
0.00035	0	14.520
0.00040	0	15.626
0.00045	0	18.147
0.00050	0	20.120
0.00055	0	20.944
0.00060	0	20.943
0.00065	0	19.414
0.00070	0	19.614
0.00075	0	20.063
0.00080	0	19.716
0.00085	0	20.664
0.00090	0	21.879
0.00095	0	22.613
0.00100	0	24.097

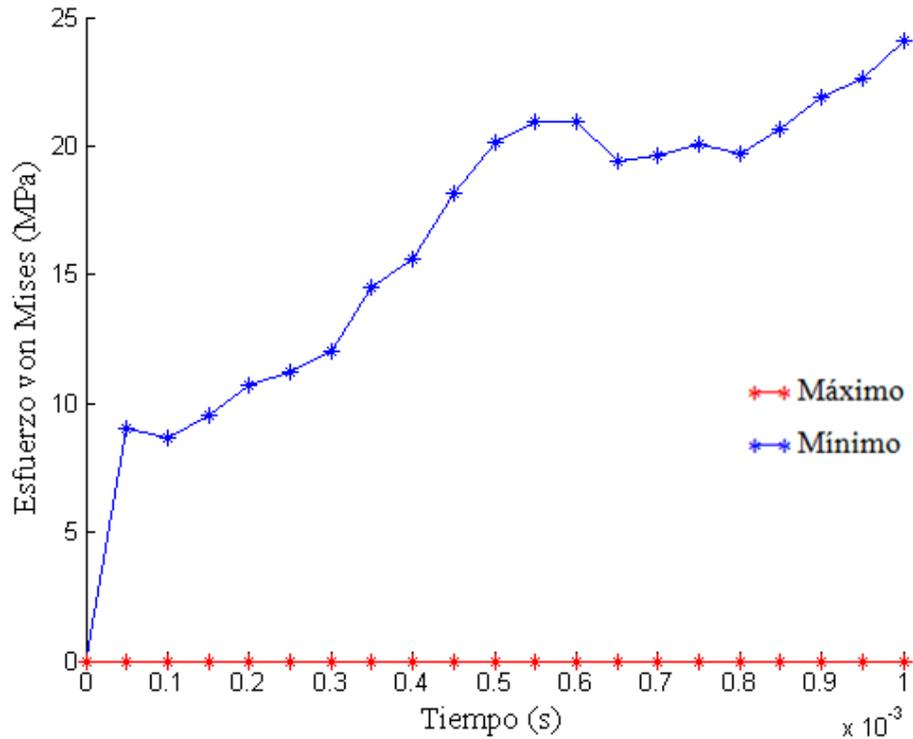


Figura IV.32.- Valores del esfuerzo de von Mises, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

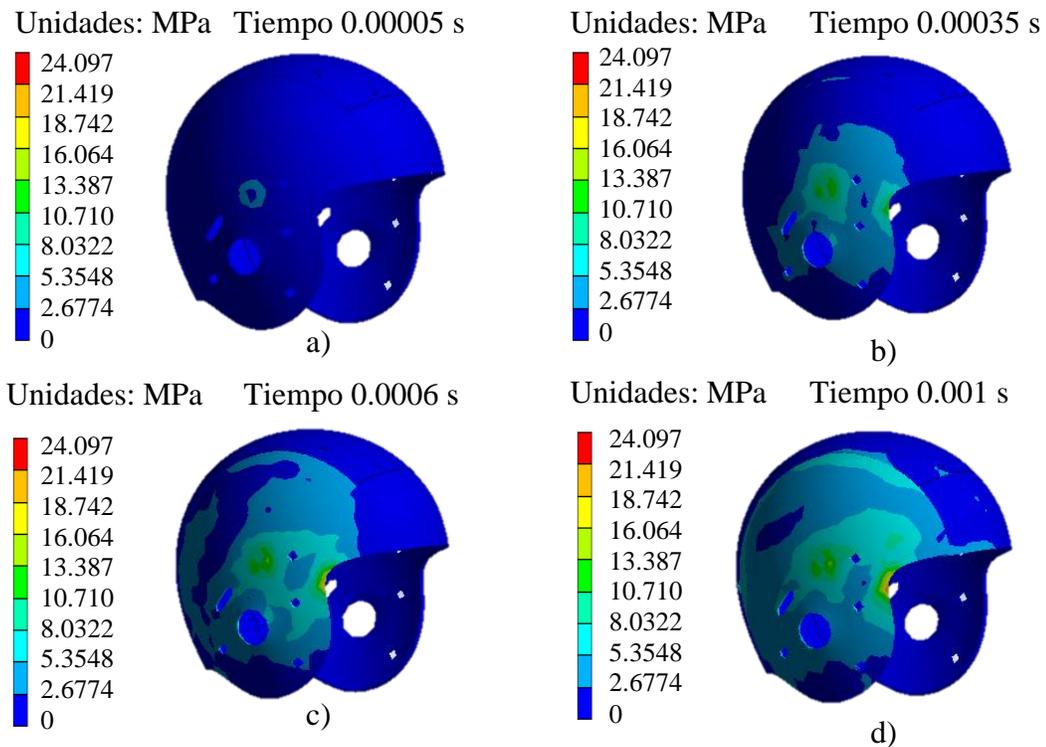


Figura IV.35.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo von Mises (MPa), Valor máximo. a) 9.019 MPa. b) 14.52 MPa. c) 20.943 MPa. d) 24.094 MPa.

Los valores presentados en la Figura IV.35a, indican valores de esfuerzos a tensión en el inicio del contacto del casco. En la Figura IV.35b, se observa el campo de distribución de los esfuerzos en la superficie lateral del casco, teniendo valores de 14.520 MPa. Así mismo en la Figura IV.35c en el tiempo 0.00060 s, se obtiene un valor de 22.940 MPa, se tiene el punto más alto en el tiempo 0.001 teniendo 24.97 MPa, se puede apreciar en la Figura IV.35d que solo la parte lateral es afectada por el impacto.

IV.6.3.- Esfuerzo cortante (τ)

Con el fin de observar de qué tipo de esfuerzo es al que cede el material, se analizan los esfuerzos cortantes, que indican el comportamiento tanto a tensión como a compresión del material sujeto a impacto, se muestran los valores en el plano XY por ser los más críticos.

Tabla IV.13.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	-0.71719	0.79109
0.00010	-1.9176	1.9536
0.00015	-2.2677	2.0223
0.00020	-2.5051	2.8974
0.00025	-2.7348	2.9512
0.00030	-3.4437	4.0071
0.00035	-3.1531	5.8356
0.00040	-3.1248	4.8484
0.00045	-2.8805	5.3281
0.00050	-3.1785	5.953
0.00055	-3.7902	7.2333
0.00060	-3.9322	7.2993
0.00065	-3.6521	6.2891
0.00070	-3.3292	5.9193
0.00075	-2.9691	5.7398
0.00080	-3.1843	5.8978
0.00085	-3.3749	5.3992
0.00090	-3.8626	6.3545
0.00095	-3.9745	7.7527
0.00100	-3.6592	7.9377

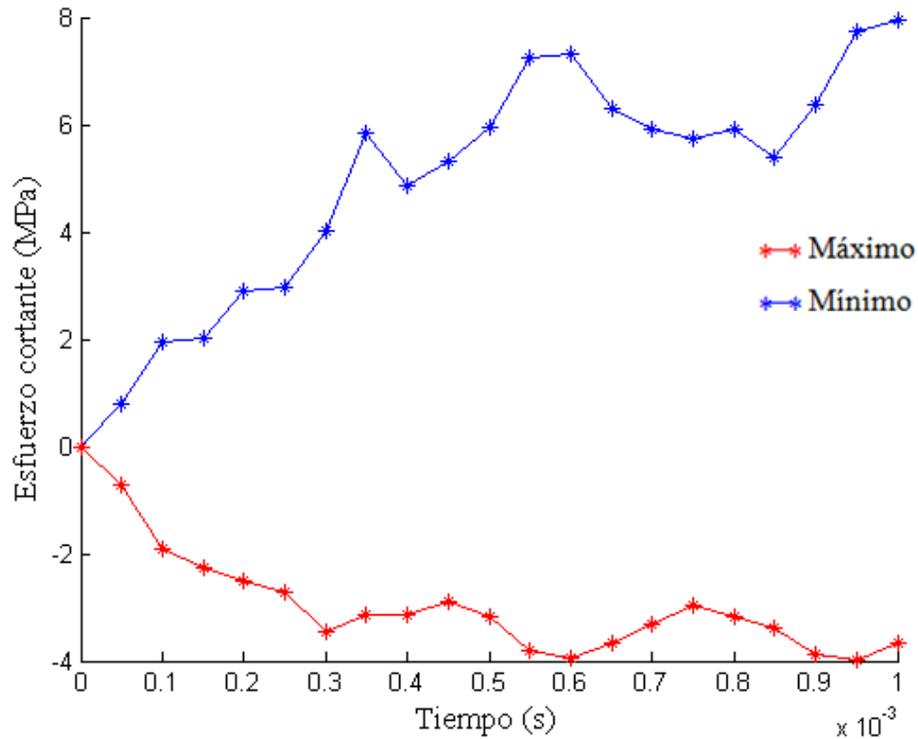


Figura IV.36.- Valores del esfuerzo cortante, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

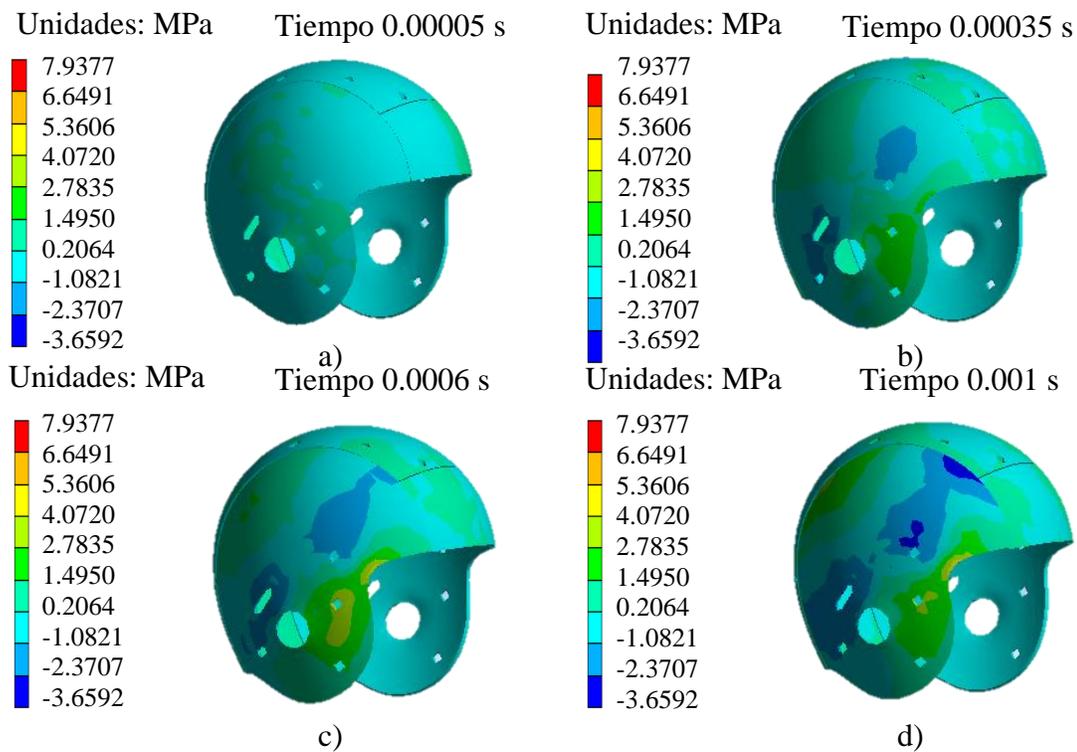


Figura IV.37.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante (MPa), Valor máximo. a) 0.791 MPa. b) 5.835 MPa. c) 7.299 MPa. d) 7.937 MPa.

Los valores suceden de una manera constante tanto en tensión como en compresión, se puede determinar que la estructura del casco no falla por el trabajo de los esfuerzos cortantes.

IV.6.4.- Deformación plástica (D_p)

Ya que se está considerando la zona elástica, así como la plástica del material, recordando que en las cargas de impacto se tiene un comportamiento frágil del material debido a lo súbito de la carga, se usa el análisis del equivalente plástico para observar el fenómeno de deformación del material.

Tabla IV.14.- Valores de la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (m/m)	Máximo (m/m)
0.00000	0	0
0.00005	0	0
0.00010	0	0
0.00015	0	0
0.00020	0	0
0.00025	0	0
0.00030	0	0
0.00035	0	0
0.00040	0	0
0.00045	0	0
0.00050	0	0
0.00055	0	0
0.00060	0	0
0.00065	0	0
0.00070	0	0
0.00075	0	0
0.00080	0	0
0.00085	0	0
0.00090	0	0
0.00095	0	0
0.00100	0	0

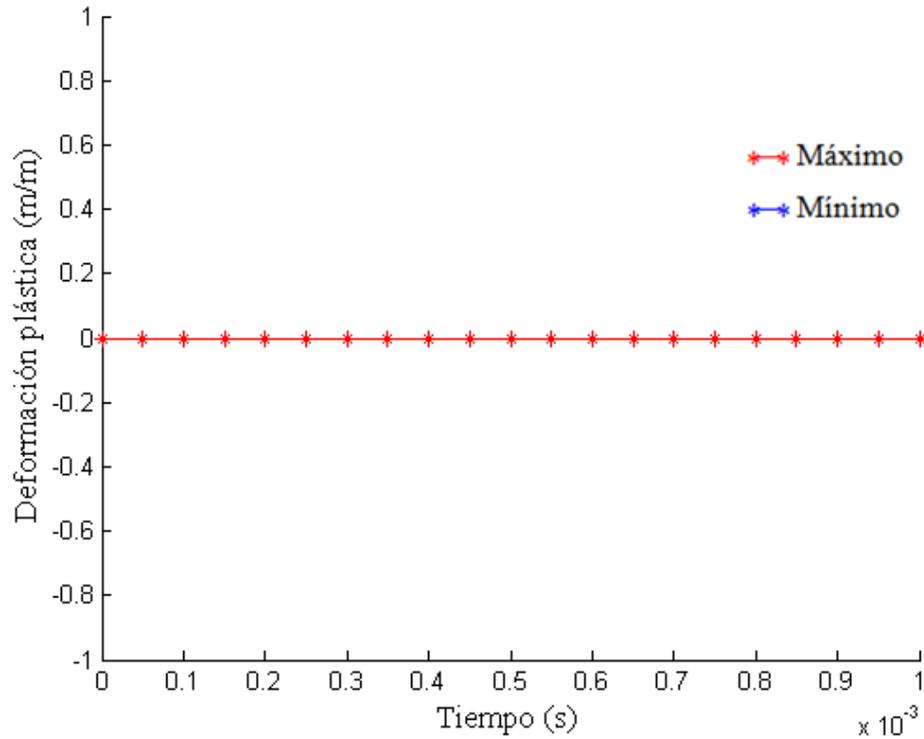


Figura IV.38.- Valores de la deformación plástica, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

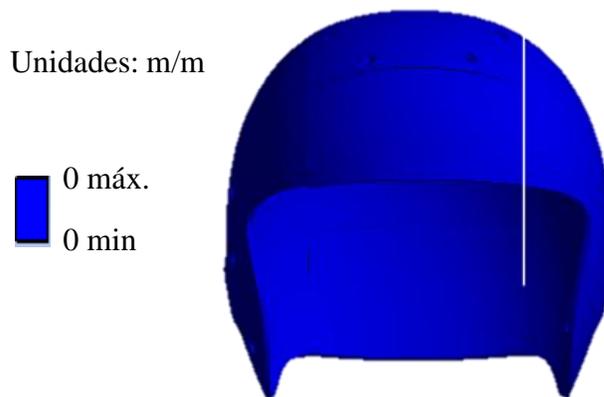


Figura IV.39.- Valores y ejemplificación gráfica de la deformación plástica en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s.

Como se ha observado en los análisis de desplazamiento y esfuerzos, dentro del primer intervalo, el contacto de impacto sucede en el punto de 0.00005 s, se originan valores de 0 hasta el tiempo 0.001 s. por lo que no existe una deformación plástica

IV.6.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x.}$)

Dentro de la falla del material al cortante, se debe de observar el máximo punto de este para considerar la importancia de su acción.

Tabla IV.15.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

Tiempo (s)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
0.00000	0	0
0.00005	0	4.5243
0.00010	0	4.8050
0.00015	0	5.2884
0.00020	0	5.9110
0.00025	0	6.1046
0.00030	0	6.3359
0.00035	0	7.7392
0.00040	0	8.2851
0.00045	0	9.5033
0.00050	0	10.582
0.00055	0	11.284
0.00060	0	11.444
0.00065	0	10.519
0.00070	0	10.501
0.00075	0	10.783
0.00080	0	10.839
0.00085	0	11.548
0.00090	0	12.228
0.00095	0	12.686
0.00100	0	13.545

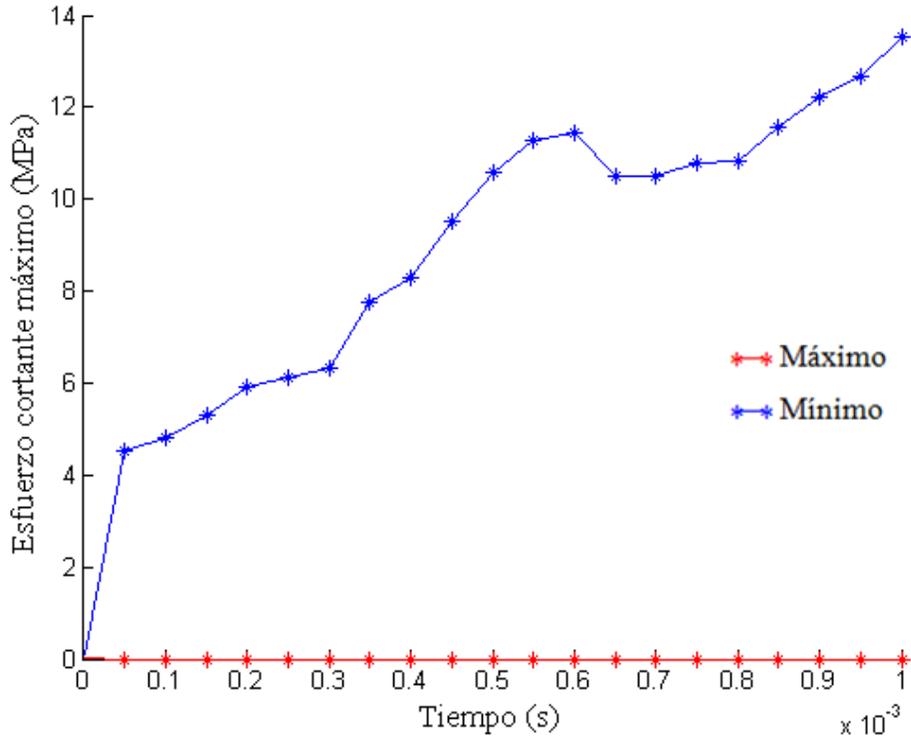


Figura IV.40.- Valores del esfuerzo cortante máximo, en el intervalo de tiempo 0 a 0.001 s

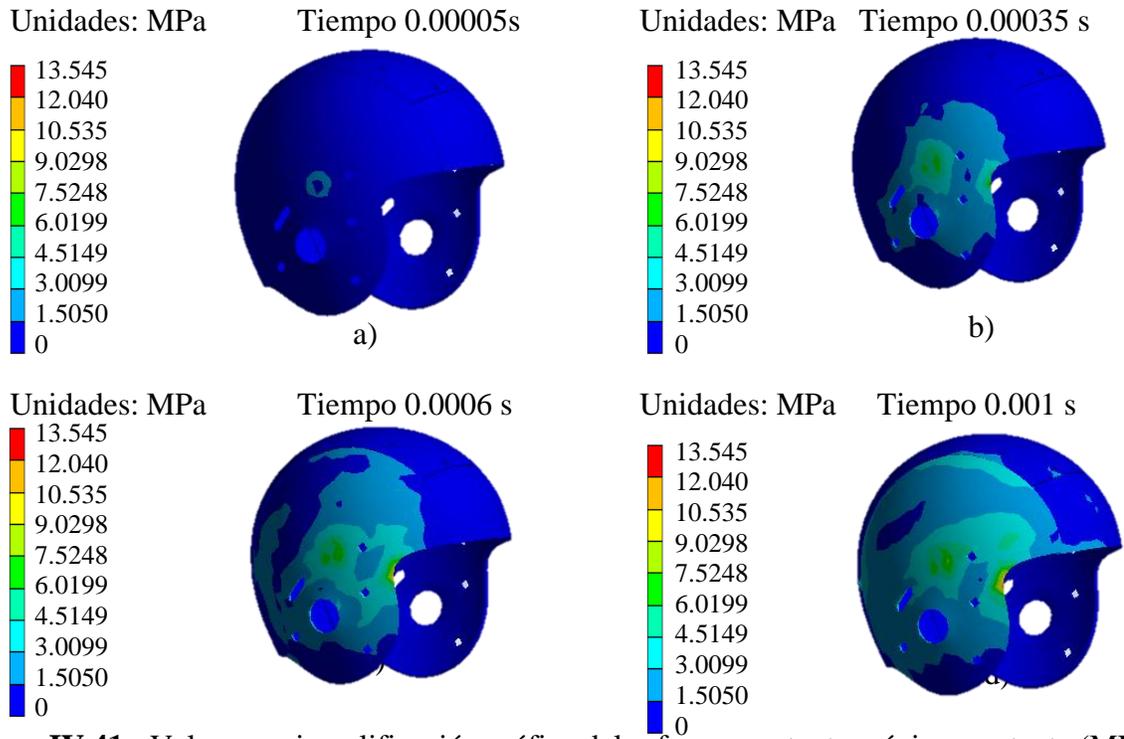


Figura IV.41.- Valores y ejemplificación gráfica del esfuerzo cortante máximo cortante (MPa), Valor máximo. a) 4.524 MPa. b) 7.739 MPa. c) 11.44 MPa. d) 13.545 MPa.

En el tiempo 0.00005 s comienza el contacto y los esfuerzos se inician de no de una forma parabólica total, hasta llegar a un punto máximo en el tiempo 0.00060 s, para caer en el tiempo 0.00065 s y alcanzar el máximo en el tiempo 0.001 s teniendo 13.545 MPa.

IV.7.- Sumario

Se continua con la fase de análisis del trabajo de tesis, se indica al inicio capítulo una metodología que se siguió para la segmentación del casco y su posterior ensamble. Así como, los pasos a seguir para el análisis por el Método del Elemento Finito. El estudio realizado es dinámico, y se realizó en el programa *ANSYS WORKBENCH*, incluyendo las propiedades del policarbonato para generar las particularidades del estudio. Se analizan tres casos de estudio, simulando el contacto de los dos cuerpos (cascos) de forma frontal, frontal oblicua y latera, llegando a un punto sin tener una cedencia total del material, observando su comportamiento en condiciones controladas de impacto, obteniendo los resultados de desplazamiento total, esfuerzo de von Mises (equivalente), esfuerzo cortante, deformación unitaria, esfuerzo cortante máximo, obteniendo y explicando los resultados.



CAPÍTULO V

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

V.1.- Generalidades

Se muestran los valores obtenidos de los análisis efectuados en igualdad de condiciones a los dos casos de estudio, un impacto frontal a una velocidad de 9.3 m/s, durante un tiempo de 0.001 s, los resultados fueron expuestos generales fueron expuestos en los capítulos III y IV, en éste capítulo se muestra el análisis de los resultados en forma comparativa entre los dos tipos de cascos. Figura V.1.

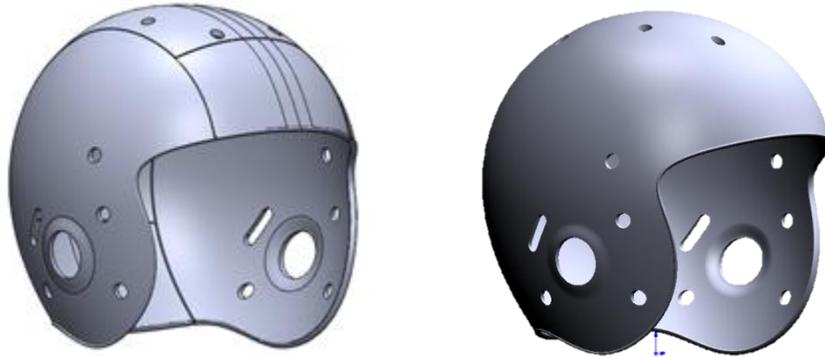


Figura V.1.- Cascos sometidos a impacto en las mismas condiciones

V.2.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal

Para la obtención de resultados en ambos modelos se utilizó el programa *ANSYS WORKBENCH 15.0*[®], en el módulo de mecánica, observando tres casos de estudio los cuales son; impacto frontal, impacto frontal oblicuo y lateral. Los parámetros evaluados fueron:

1. Desplazamiento total.
2. Esfuerzo von Mises.
3. Esfuerzo cortante.
4. Deformación plástica.
5. Esfuerzo cortante máximo.

V.2.1.- Desplazamiento total *D*

Indica el primer momento en el que impactan los cascos, desde el momento en que inician el contacto, hasta el punto en que el desplazamiento llega a observarse físicamente. Para ello se muestra en la Figura V.2 la gráfica comparativa de desplazamiento total.

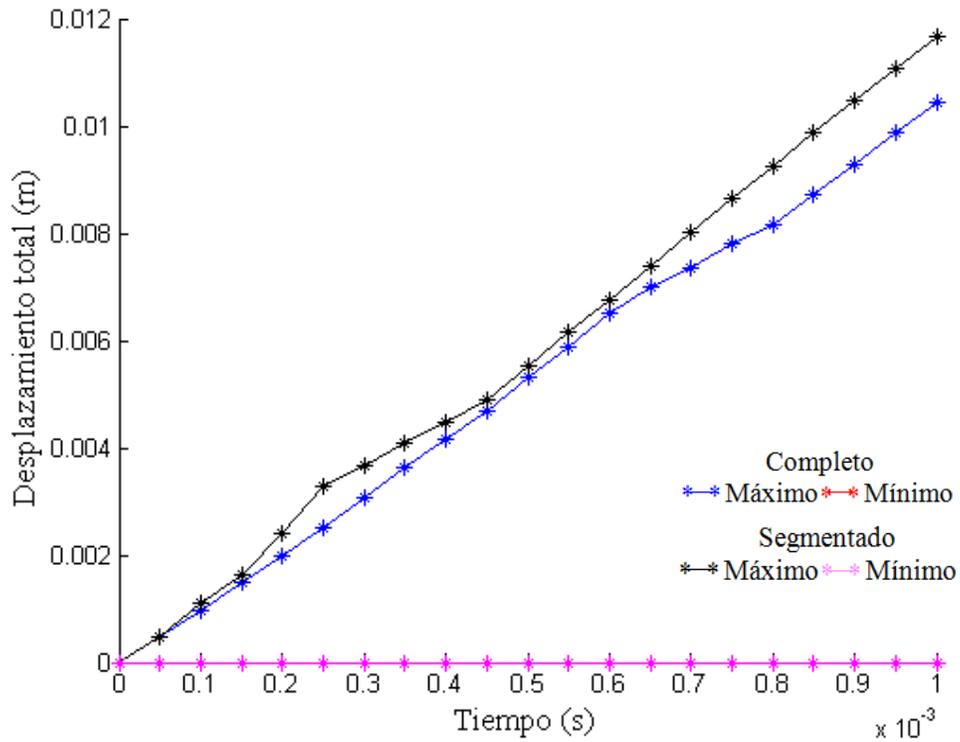


Figura V.2.- Valores para el desplazamiento total en el intervalo de 0 a 0.001 s, para ambos casos de estudio

Tabla V.1.- Valores máximos y mínimos del comparativo del desplazamiento total

Tipo	Tiempo (s)	Desplazamiento total (m)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.001	0	0.01044
Segmentado	0.001	0	0.01166

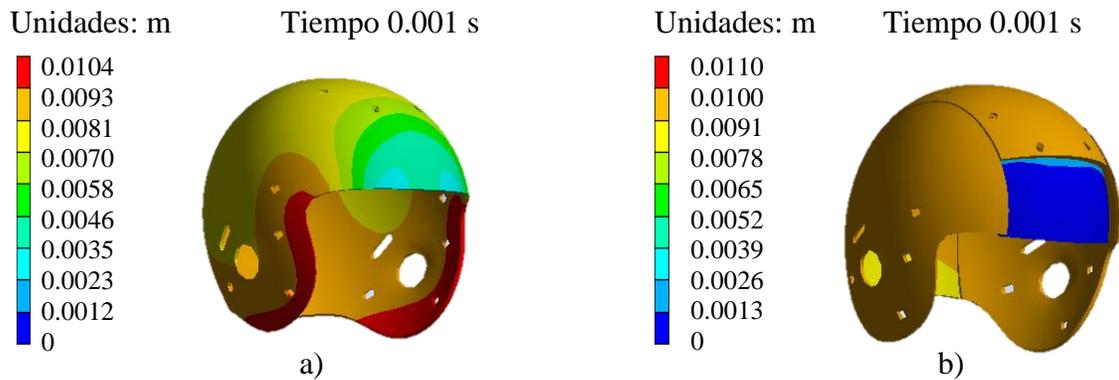


Figura V.3.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del desplazamiento total en metros (m), a) casco completo, b) casco segmentado

En la Figura V.2, Se observa como es el desplazamiento en ambos cascos, en las mismas condiciones de tiempo y velocidad de impacto. El casco completo presenta una tendencia de los valores de desplazamiento casi lineal. Se observa un mayor desplazamiento (10%) en el casco segmentado, siendo que los valores corren de una forma similar a los mostrados en el casco entero. En la tabla V.1, se muestran los valores mínimos y máximos del desplazamiento en los dos cascos, siendo en el tiempo 0.001 a, el valor máximo para ambos.

V.2.2- Esfuerzo von Mises (σ)

Dentro de la falla del material se debe de considerar el esfuerzo von Mises a tensión, observando el máximo punto de este para considerar de importancia su acción. En la Figura V.4 se observa la gráfica comparativa del esfuerzo equivalente del impacto frontal en ambos cascos.

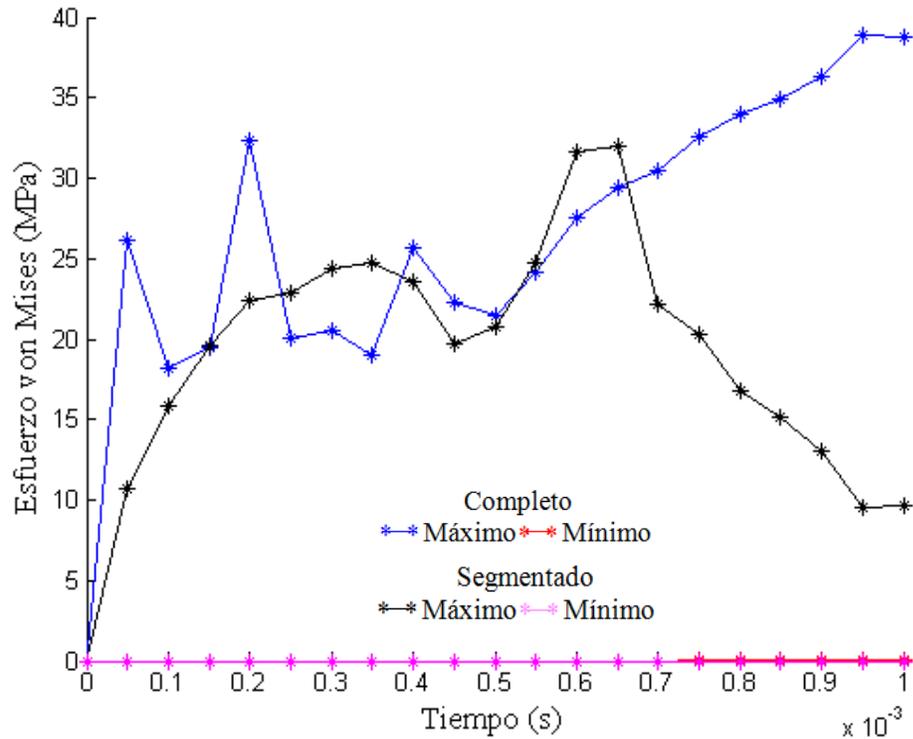
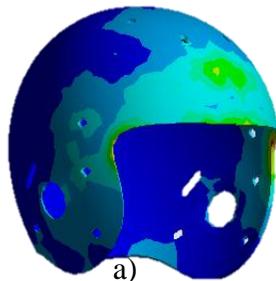
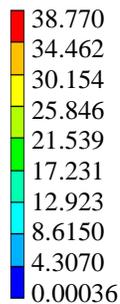


Figura V.4.- Valores del esfuerzo von Mises en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.2.- Valores máximos y mínimos del comparativo del von Mises

Tipo	Tiempo (s)	Esfuerzo von Mises (MPa)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00095	0.00007	38.895
Segmentado	0.00065	0	31.962

Unidades: MPa Tiempo 0.00095 s



Unidades: MPa Tiempo 0.00065 s

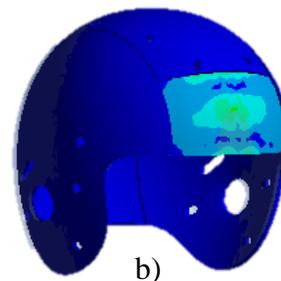
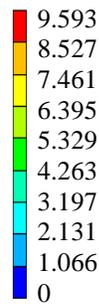


Figura V.5.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo von Mises en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado

En la Figura V.4, se puede apreciar el comportamiento del esfuerzo equivalente para ambos casos de estudio, en el casco completo, la gráfica se presenta de una forma alternada hasta el tiempo 0.00055 s, después del cual se comporta de una forma parabólica aunque no de forma continua, teniendo como valor máximo 38.895 MPa en el tiempo 0.00095, Por otro lado en el casco segmentado inicia de una manera parabólica teniendo un máximo en el tiempo 0.00035 s, para descender en el tiempo 0.00045 s y ascender hasta alcanzar su máximo en el tiempo 0.00065 s teniendo el valor de 31.692 MPa.

V.2.3.- Esfuerzo cortante (τ)

Con el fin de observar de qué tipo de esfuerzo es al que cede el material, se analizan los esfuerzos cortantes, que indican el comportamiento tanto a tensión como a compresión del material sujeto a impacto, presentándose los valores máximos en el plano XY para el completo y XZ en el segmentado por ser los más críticos.

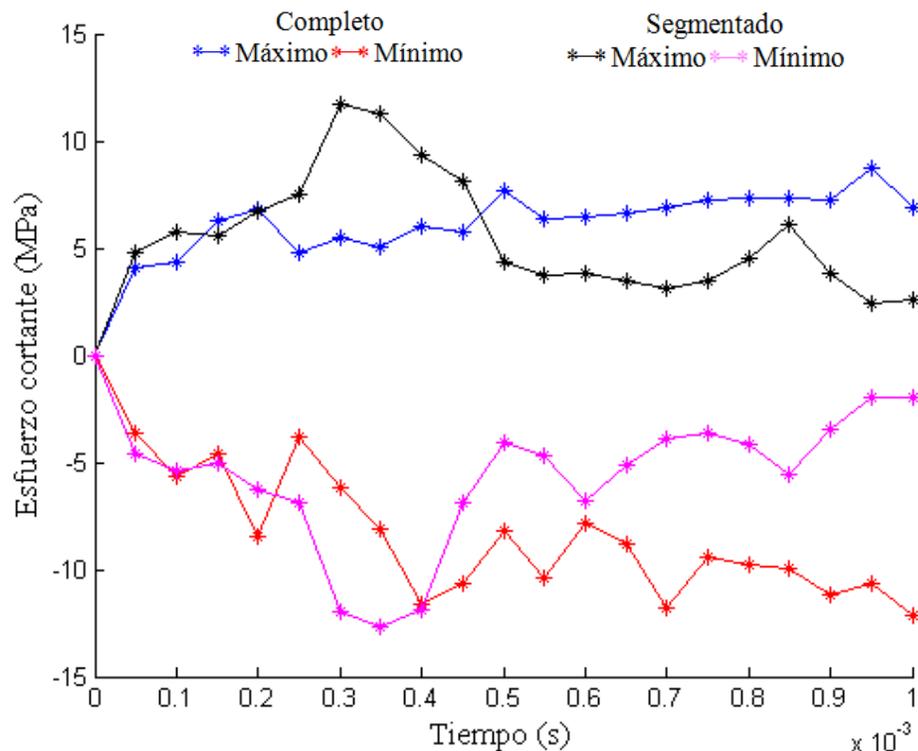


Figura V.6.- Valores del esfuerzo cortante en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.3.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante

Tipo	Tiempo (s)	Esfuerzo cortante (MPa)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00095	-10.642	8.7388
Segmentado	0.00030	-11.934	11.744

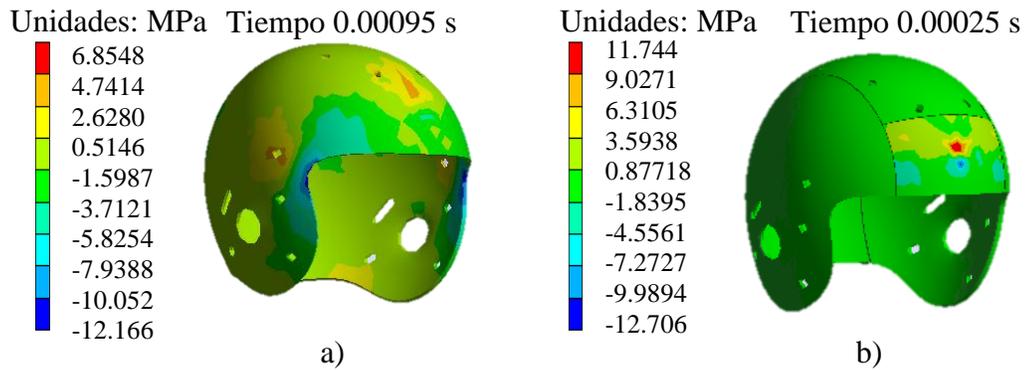


Figura V.7.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado

Los valores suceden de una manera constante tanto en tensión como en compresión, se puede determinar que la estructura del casco no falla por el trabajo de los esfuerzos cortantes. Teniendo en el casco completo en el tiempo 0.00095, los valores máximos y mínimos de -10.642 MPa y 8.7388 MPa. En el casco segmentado se presentan los valores en el tiempo 0.00030 s, el máximo de -11.934 MPa y el mínimo de 11.744 MPa.

V.2.4.- Deformación plástica (*D_p*)

Ya que se está considerando la zona elástica, así como la plástica del material, recordando que en las cargas de impacto se tiene un comportamiento frágil del material debido a lo súbito de la carga, se usa el análisis del equivalente plástico para observar el fenómeno de deformación del material.

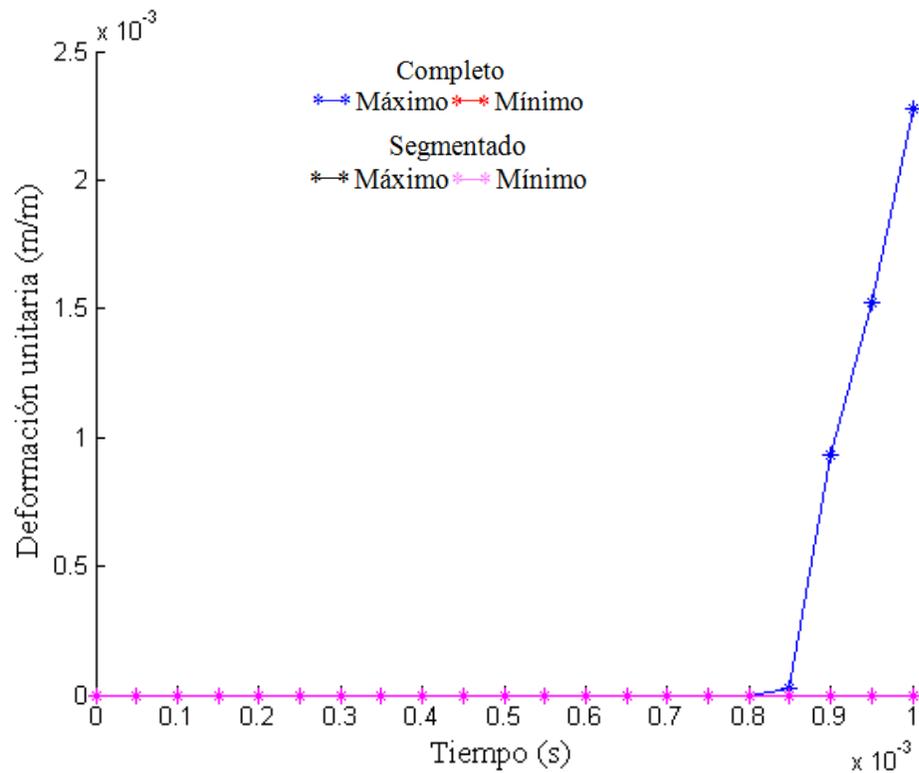


Figura V.8.- Valores de la deformación plástica en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.4.- Valores máximos y mínimos del comparativo de la deformación plástica

Tipo	Tiempo (s)	Deformación plástica (m/m)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	0	0.002280
Segmentado	0.00100	0	0

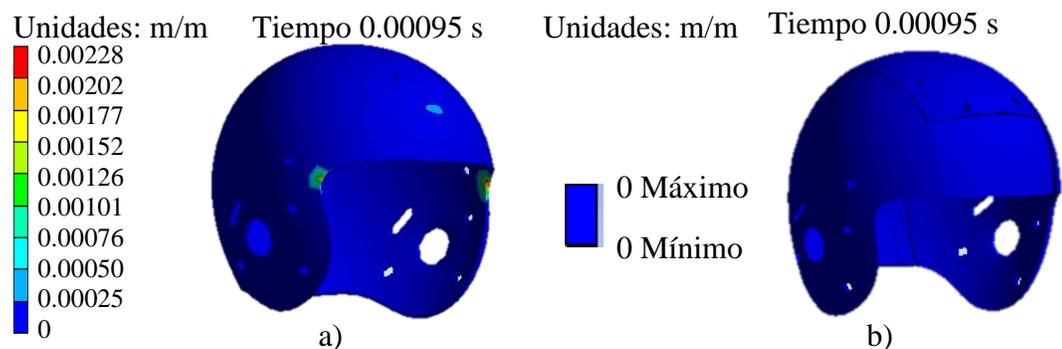


Figura V.9.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del deformación plástica en m/m, a) casco completo, b) casco segmentado

Como se muestra en la tabla V.4 y en las figuras V.8 y V.9, que no existe una deformación plástica considerable en el casco completo y nulo en el segmentado.

V.2.5.- Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x.}$)

Dentro de la falla del material al cortante, se debe de observar el máximo punto de este para considerar la importancia de su acción.

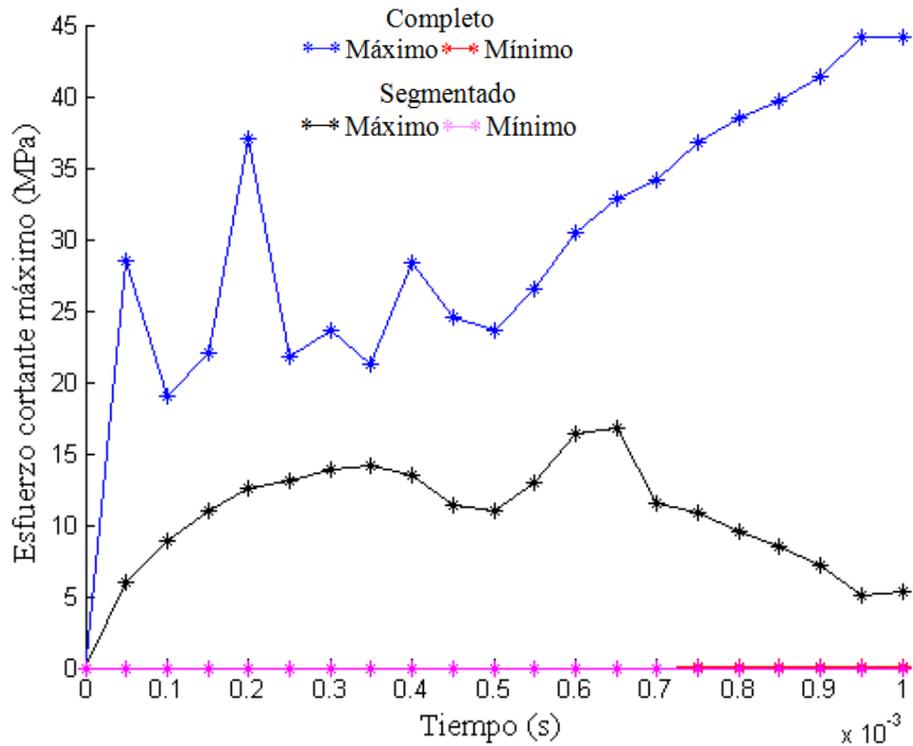


Figura V.10.- Valores del esfuerzo cortante máximo en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.5.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante máximo

Tipo	Tiempo (s)	Esfuerzo cortante máximo (MPa)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00095	0.0000781	44.170
Segmentado	0.00065	0	16.767

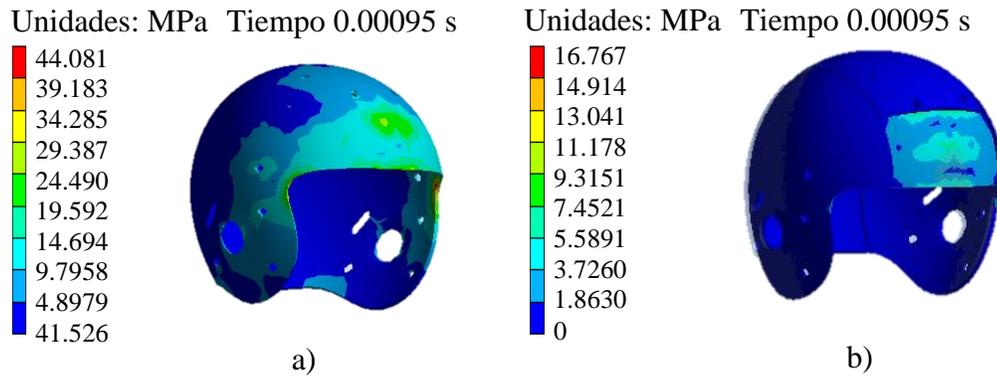


Figura V.11.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante máximo en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado

Los valores del esfuerzo cortante máximo se presentan en el casco completo de una forma variable en la figura V.10, en la cual se observa que a partir del tiempo 0.0005 toman una forma casi lineal teniendo el valor máximo en el tiempo 0.00095 s con un valor de 0.00007 MPa en el mínimo y de 44.170 MPa en el máximo. En el casco segmentado los valores del esfuerzo cortante máximo inician de una forma parabólica hasta el tiempo 0.00040 s, descendiendo hasta el tiempo 0.0005 s para continuar de una forma alternada teniendo el máximo en el tiempo 0.00065 s, el cual es de 16.676 MPa.

V.3.- Análisis de desplazamientos esfuerzos y deformaciones del impacto frontal oblicuo

Se utiliza el mismo modelo del estudio anterior, ya que es el mismo objeto el que se desea someter al estudio, igualmente se somete a una carga dinámica siguiendo la misma metodología anterior, con la variante de que la zona de impacto se mueve 45 grados hacia la parte izquierda del casco.

V.3.1.- Desplazamiento total D

Indica el primer momento en el que impactan los cascos, desde el momento en que inician el contacto, hasta el punto en que el desplazamiento llega a observarse físicamente. Para ello se muestra en la Figura V.12 la gráfica comparativa de desplazamiento total.

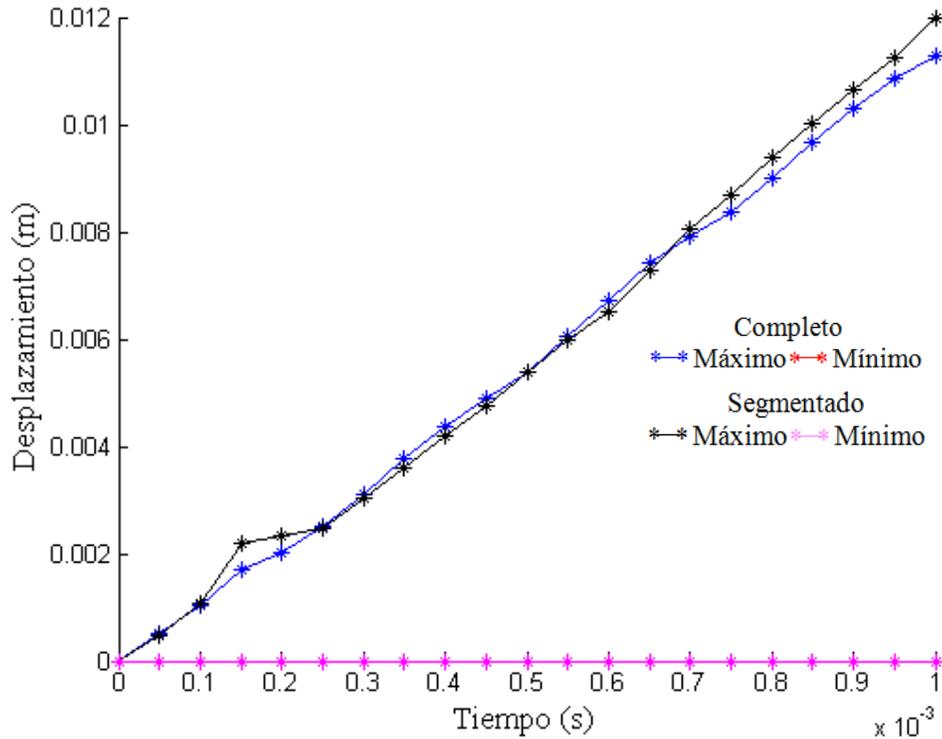


Figura V.12.- Valores para el desplazamiento total en el intervalo de 0 a 0.001 s, para ambos casos de estudio

Tabla V.6.- Valores máximos y mínimos del comparativo del desplazamiento total

Tipo	Tiempo (s)	Desplazamiento total (m)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	0	0.01126
Segmentado	0.00100	0	0.01199

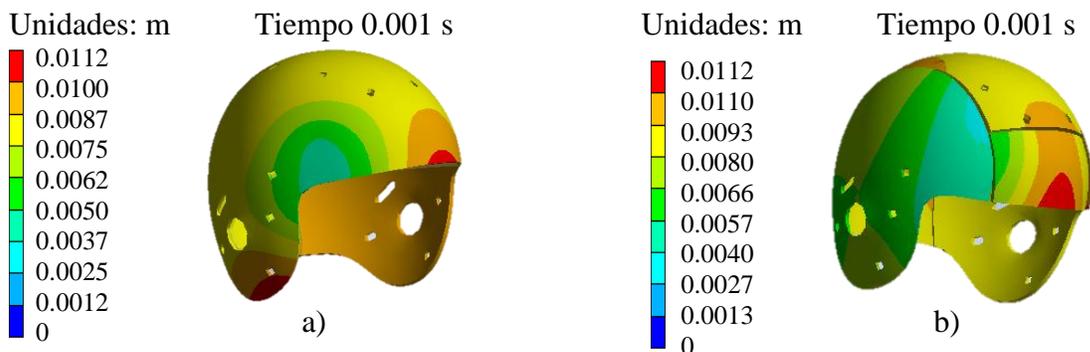


Figura V.13.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del desplazamiento en metros (m), a) casco completo, b) casco segmentado

En la Figura V.12, Se observa como es el desplazamiento en ambos cascos, en las mismas condiciones de tiempo y velocidad de impacto. El casco completo presenta una tendencia de los valores de desplazamiento casi lineal. Se observa un menor desplazamiento en el casco segmentado, siendo que los valores corren de una forma similar a los mostrados en el casco entero. En la tabla V.6, se muestran los valores mínimos y máximos del desplazamiento en los dos cascos, siendo en el tiempo 0.001 a, el valor máximo para ambos.

V.3.2.-Esfuerzo von Mises (σ)

Dentro de la falla del material se debe de considerar el esfuerzo equivalente a tensión, observando el máximo punto de este para considerar de importancia su acción. En la Figura V.7 se observa la gráfica comparativa del esfuerzo equivalente del impacto frontal oblicuo en ambos cascos

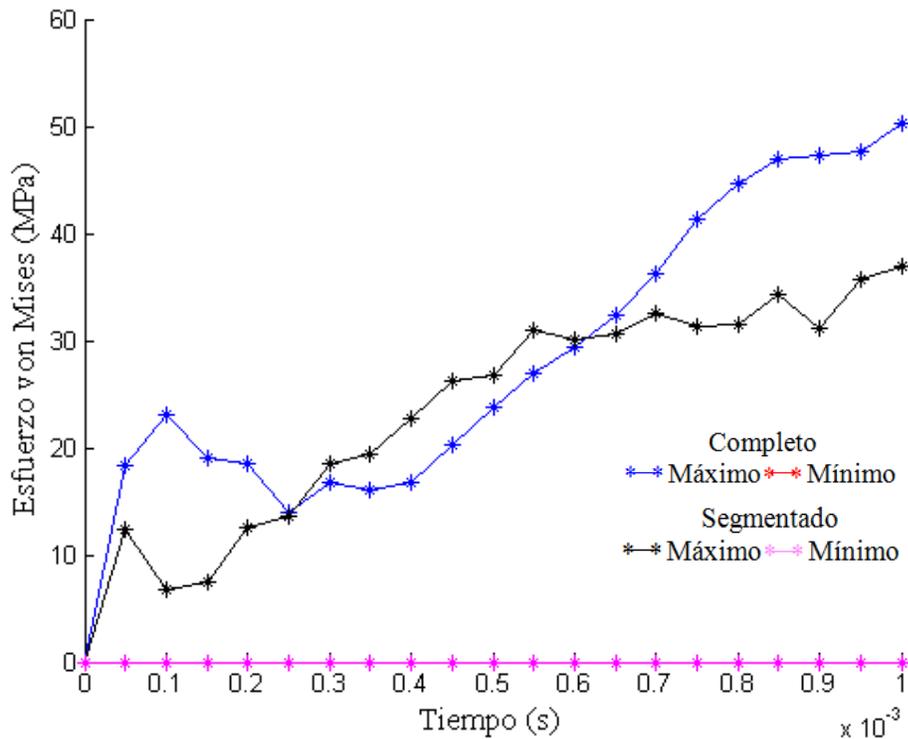


Figura V.14.- Valores del esfuerzo von Mises en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.7.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo von Mises

Tipo	Tiempo (s)	Esfuerzo von Mises (MPa)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	0	50.228
Segmentado	0.00100	0	37.014

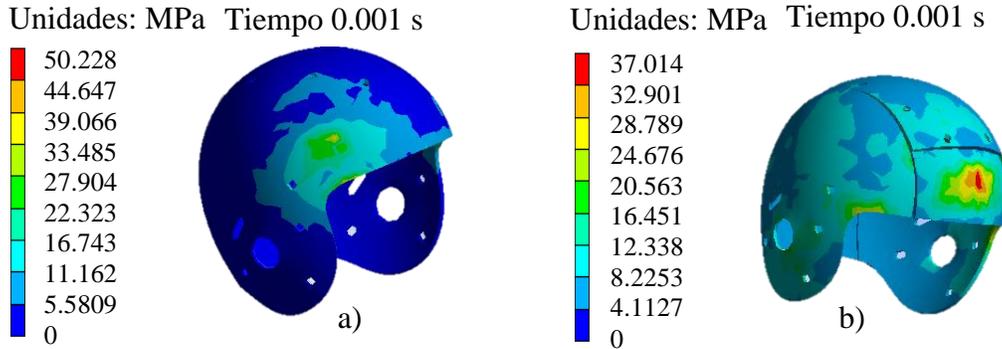


Figura V.15.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo von Mises en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado

En la Figura V.14, se puede apreciar el comportamiento del esfuerzo equivalente para ambos casos de estudio, en el casco completo, la gráfica se presenta de una forma alternada hasta el tiempo 0.00025 s, después del cual se comporta de una forma casi lineal, teniendo como valor máximo 50.22 MPa en el tiempo 0.001 s, en el casco segmentado inicia de una manera alternada teniendo un máximo en el tiempo 0.001 s, teniendo el valor de 37.014 MPa.

V.3.3.- Esfuerzo cortante (τ)

Con el fin de observar de qué tipo de esfuerzo es al que cede el material, se analizan los esfuerzos cortantes, que indican el comportamiento tanto a tensión como a compresión del material sujeto a impacto, presentándose los valores máximos para ambos casos. Se presenta los esfuerzos en el plano YZ para ambos caso por ser los valores más críticos.

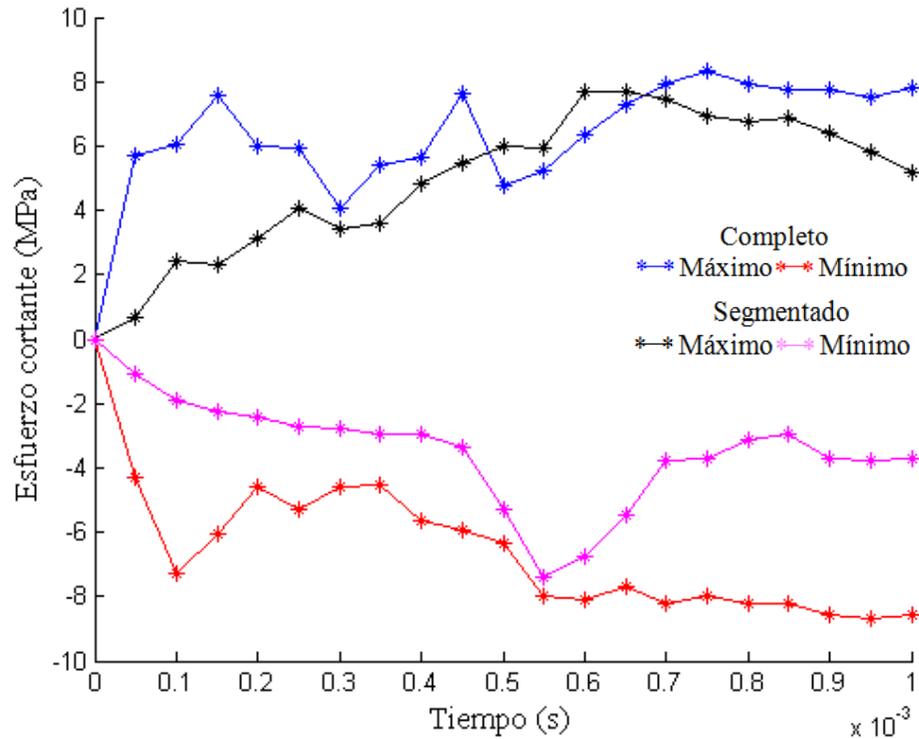


Figura V.16.- Valores del esfuerzo cortante en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.8.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante

Tipo	Tiempo (s)	Esfuerzo cortante (MPa)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00075	-7.9534	8.3453
Segmentado	0.00060	-6.7456	7.678

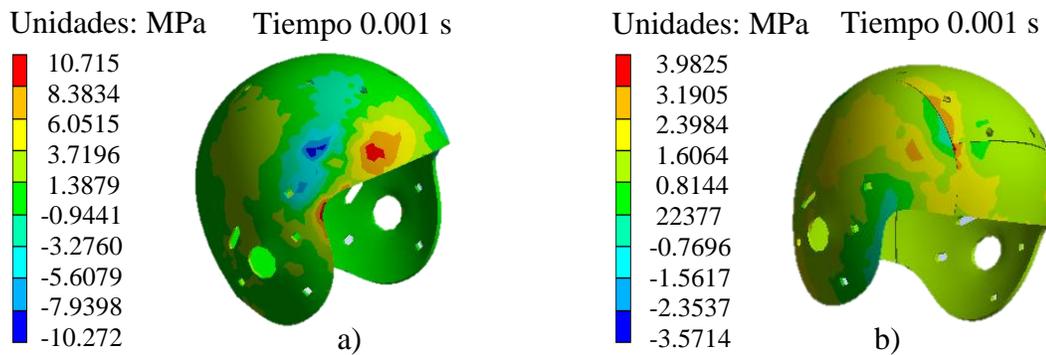
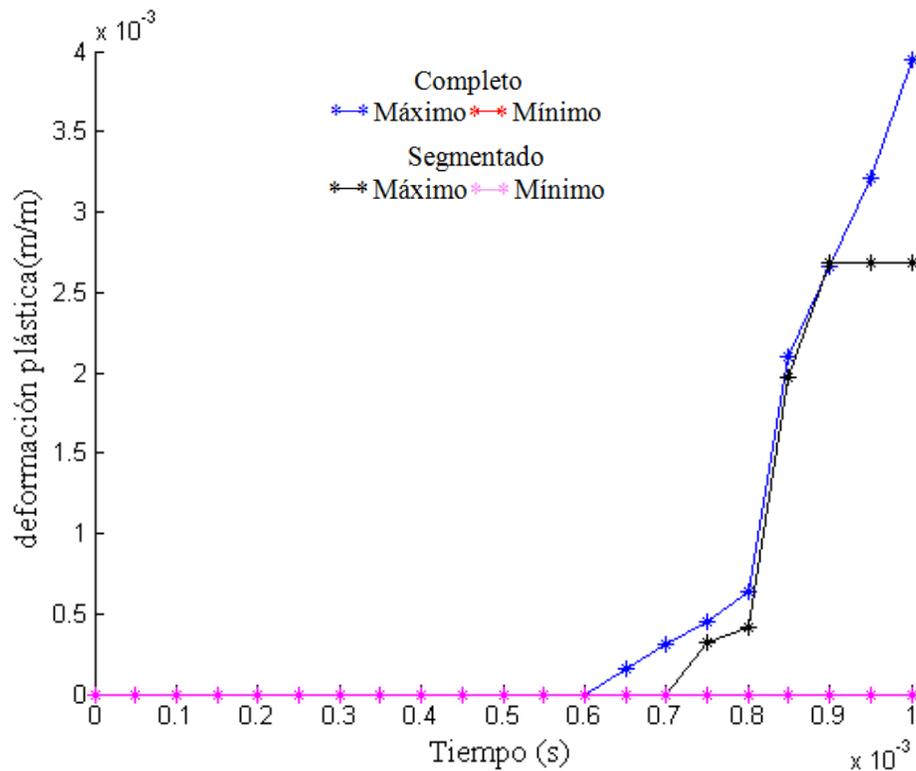


Figura V.17.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado

Los valores suceden de una manera constante tanto en tensión como en compresión, se puede determinar que la estructura del casco no falla por el trabajo de los esfuerzos cortantes. Teniendo en el casco completo en el tiempo 0.001, los valores máximos y mínimos de -10.272 MPa y 10.715 MPa. En el casco segmentado se presentan los valores en el tiempo 0.00055 s, el máximo de 5.338 MPa y el mínimo de -6.442 MPa

V.3.4.- Deformación plástica (D_p)

Ya que se está considerando la zona elástica, así como la plástica del material, recordando que en las cargas de impacto se tiene un comportamiento frágil del material debido a lo súbito de la carga, se usa el análisis del equivalente plástico para observar el fenómeno de fragilización del material.



Figuras V.18.- Valores de la deformación plástica en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.9.- Valores máximos y mínimos del comparativo de la deformación plástica

Tipo	Tiempo (s)	Deformación plástica (m/m)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	0	0.00395
Segmentado	0.00100	0	0.00268

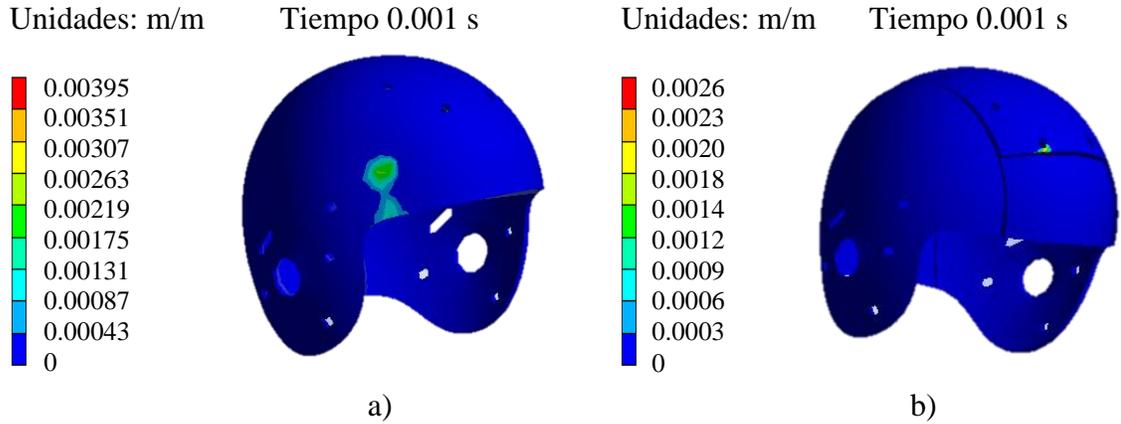


Figura V.19.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos de la deformación plástica en m/m, a) casco completo, b) casco segmentado

Como se muestra en la tabla V.9 y en las figuras V.18 y V.19, que no existe una deformación plástica considerable en el casco completo y en el segmentado.

V.3.5.-Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x.}$)

Dentro de la falla del material al cortante, se debe de observar el máximo punto de este para considerar la importancia de su acción.

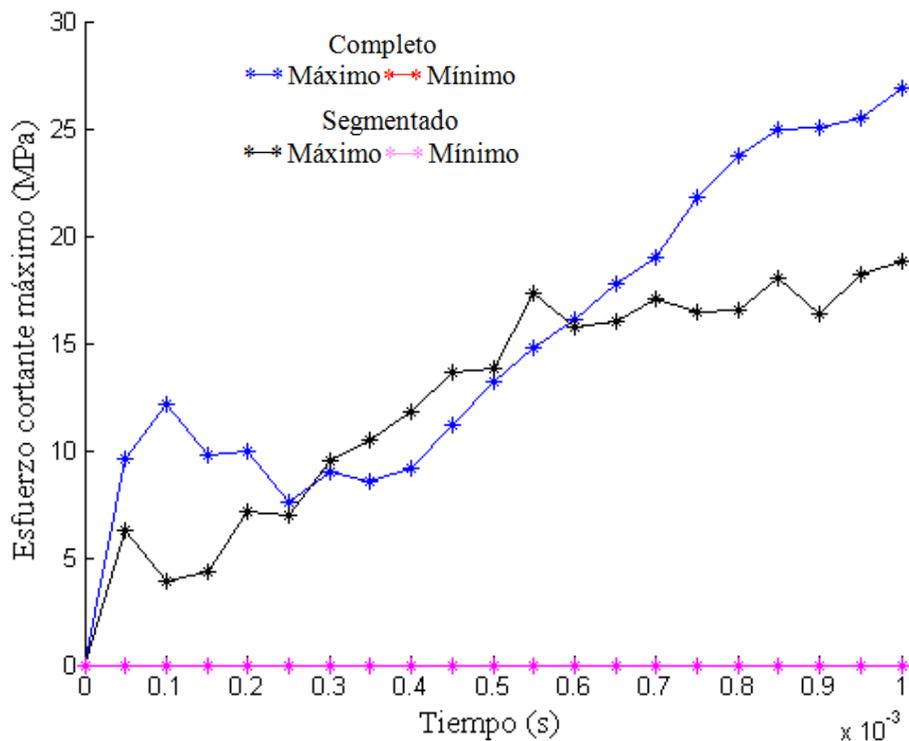


Figura V.20.- Valores del esfuerzo cortante máximo en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.10.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante máximo

Tipo	Tiempo (s)	Esfuerzo cortante máximo (MPa)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	0	26.890
Segmentado	0.00100	0	18.852

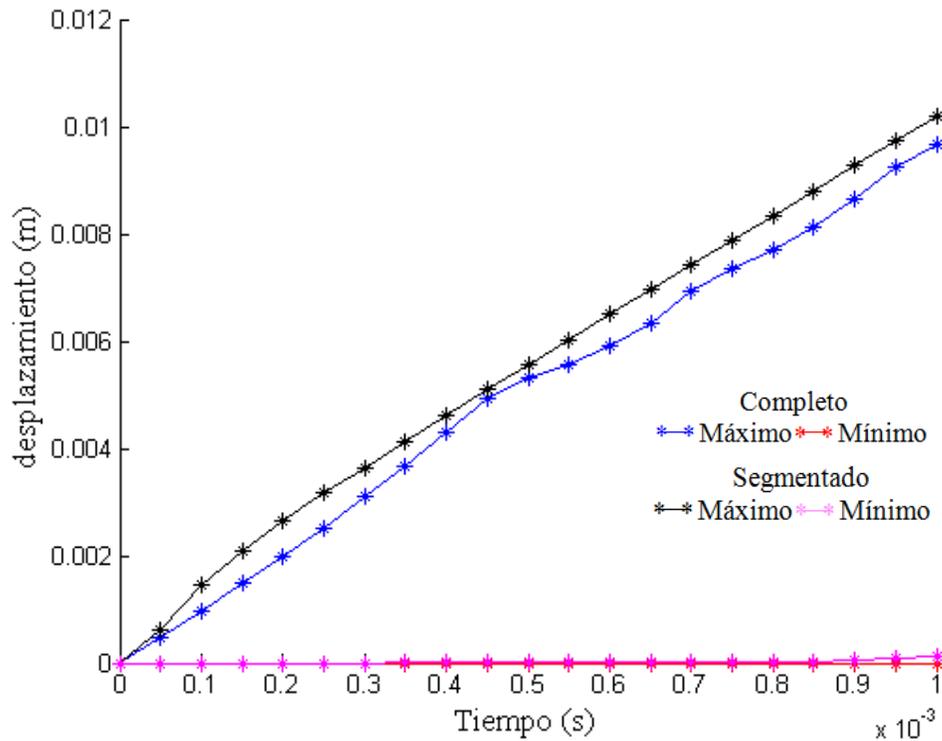


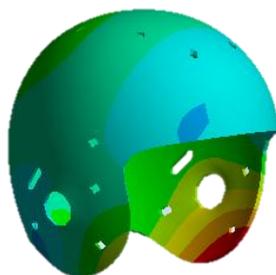
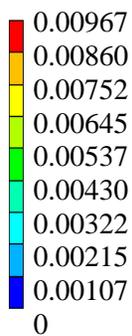
Figura V.22.- Valores para el desplazamiento total en el intervalo de 0 a 0.001 s

Tabla V.11.- Valores máximos y mínimos del comparativo del desplazamiento total

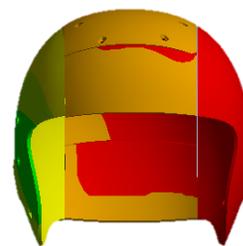
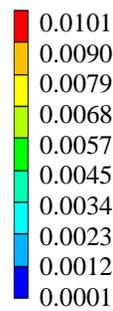
Tipo	Tiempo (s)	Desplazamiento total (m)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	0	0.009677
Segmentado	0.00100	0	0.01018

Unidades: m/m Tiempo 0.00070 s

Unidades: m/m Tiempo 0.001s



a)



b)

Figura V.23.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del desplazamiento en metros (m), a) casco completo, b) casco segmentado

En la Figura V.22, Se observa como es el desplazamiento en ambos cascos, en las mismas condiciones de tiempo y velocidad de impacto. El casco completo presenta una tendencia de los valores de desplazamiento casi lineal en un principio y parabólica a partir del tiempo 0.00040 s teniendo un valor máximo de 0.0085 m en el tiempo 0.0007 s. El casco segmentado presenta un desplazamiento casi lineal teniendo un valor máximo de 0.010 m en el tiempo 0.001 s.

V.4.2.-Esfuerzo von Mises (σ)

Dentro de la falla del material se debe de considerar el esfuerzo equivalente a tensión, observando el máximo punto de este para considerar de importancia su acción. En la Figura V.24 se observa la gráfica comparativa del esfuerzo equivalente del impacto frontal en ambos cascos.

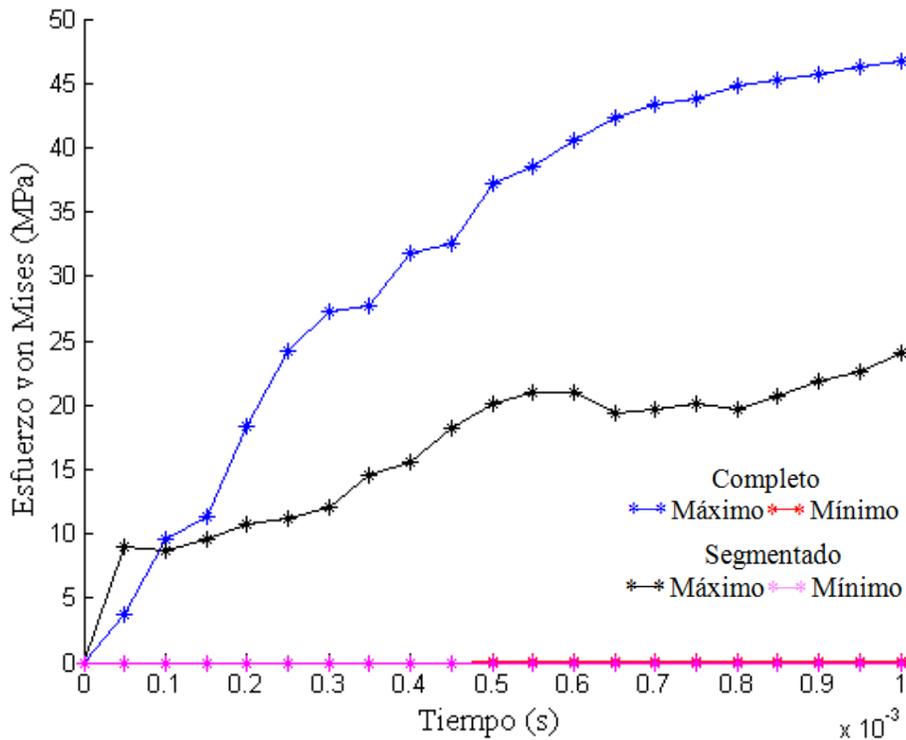


Figura V.24.- Valores del esfuerzo von Mises en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.12.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo von Mises

Tipo	Tiempo (s)	Esfuerzo von Mises (MPa)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	0	46.776
Segmentado	0.00100	0	24.097

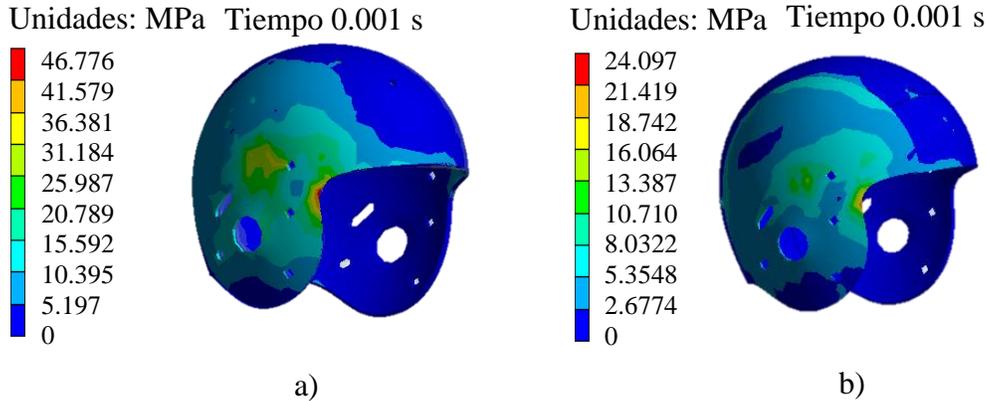


Figura V.25.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo von Mises en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado

En la Figura V.24, se puede apreciar el comportamiento del esfuerzo equivalente para ambos casos de estudio, en el casco completo, la gráfica se presenta de casi parabólica aunque no de forma continua, teniendo como valor máximo 46.776 MPa en el tiempo 0.001, Por otro lado en el casco segmentado inicia de una manera un poco más lineal teniendo un máximo en el tiempo 0.001 s, de 24.097 MPa.

V.3.3.- Esfuerzo cortante (τ)

Con el fin de observar de qué tipo de esfuerzo es al que cede el material, se analizan los esfuerzos cortantes, que indican el comportamiento tanto a tensión como a compresión del material sujeto a impacto, se muestran los valores críticos en el plano YZ para el casco completo y en el plano XY en el caso del segmentado.

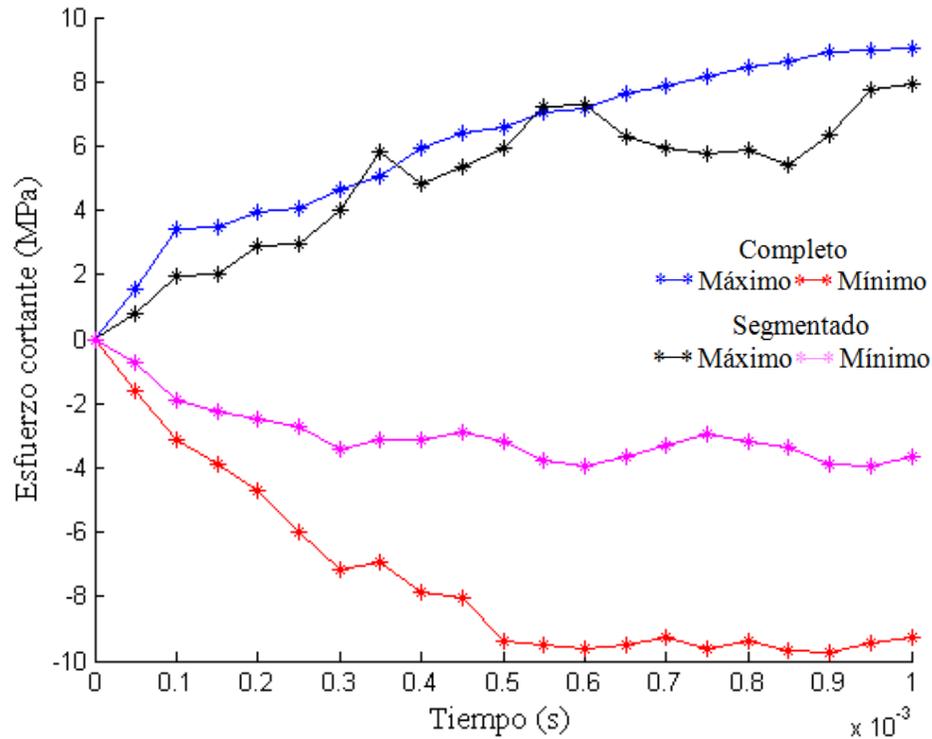


Figura V.26.- Valores del esfuerzo cortante en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.13.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante

Tipo	Tiempo (s)	Esfuerzo cortante (MPa)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	-9.2441	9.0164
Segmentado	0.00100	-3.6592	7.9377

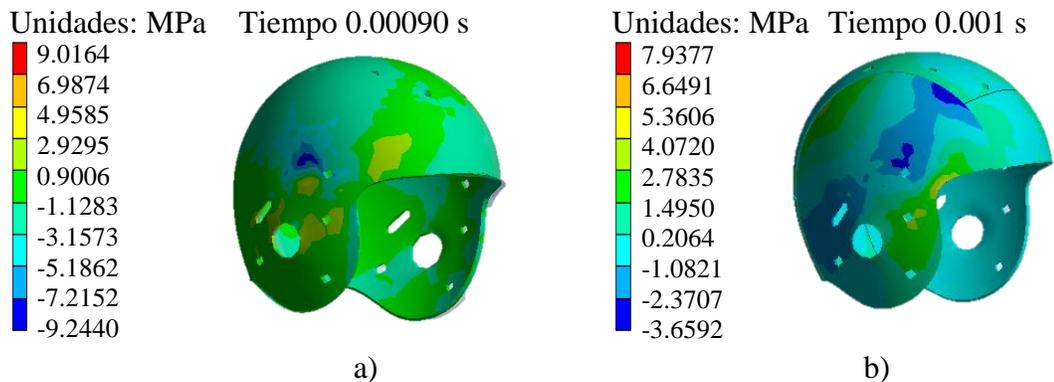
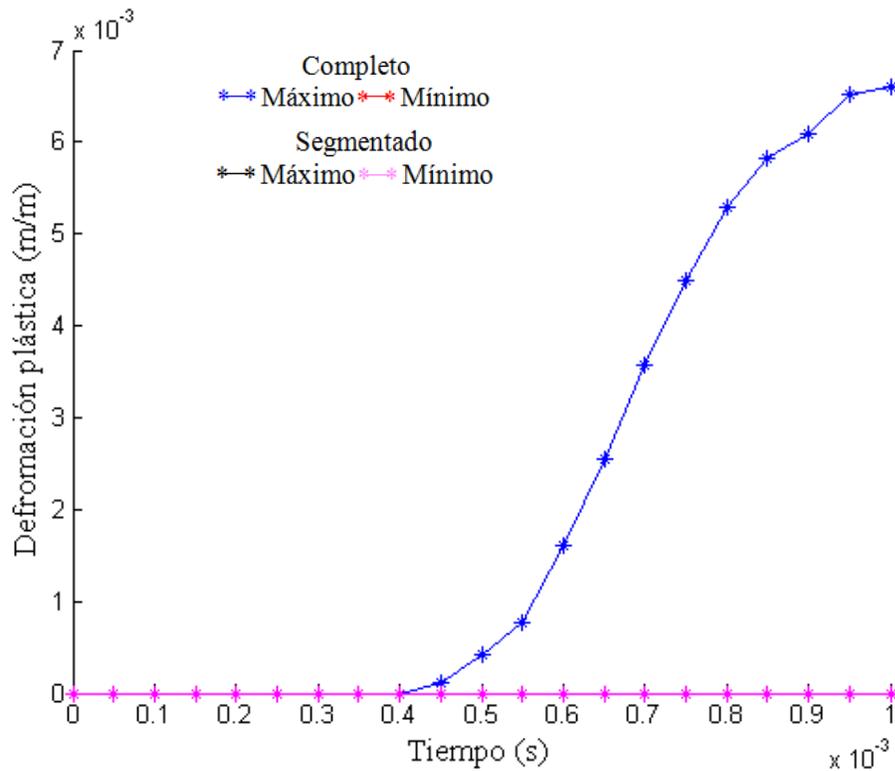


Figura V.27.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado

Los valores suceden de una manera constante tanto en tensión como en compresión, se puede determinar que la estructura del casco no falla por el trabajo de los esfuerzos cortantes. Teniendo en el casco completo en el tiempo 0.001, los valores máximos y mínimos de -9.244 MPa y 9.016 MPa. En el casco segmentado se presentan los valores en el tiempo 0.001 s, el máximo de 7.937 y el mínimo de -3.659 MPa

V.3.4.- Deformación plástica (D_p)

Ya que se está considerando la zona elástica, así como la plástica del material, recordando que en las cargas de impacto se tiene un comportamiento frágil del material debido a lo súbito de la carga, se usa el análisis del equivalente plástico para observar el fenómeno de fragilización del material.



Figuras V.28.- Valores de la deformación plástica en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.14.- Valores máximos y mínimos del comparativo del equivalente plástico

Tipo	Tiempo (s)	Deformación plástica (m/m)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	0	0.0066
Segmentado	0.00100	0	0

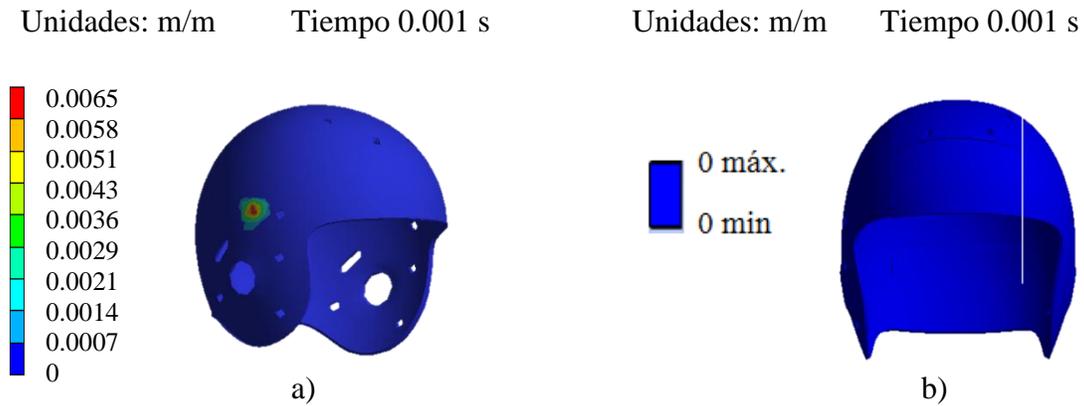


Figura V.29.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos de la Deformación plástica en m/m, a) casco completo, b) casco segmentado

Como se muestra en la tabla V.14 y en las figuras V.28 y V.29, que no existe una deformación plástica en el casco segmentado, por otro lado la deformación en el casco completo es mínima.

V.3.5.-Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{máx.}$)

Dentro de la falla del material al cortante, se debe de observar el máximo punto de este para considerar la importancia de su acción.

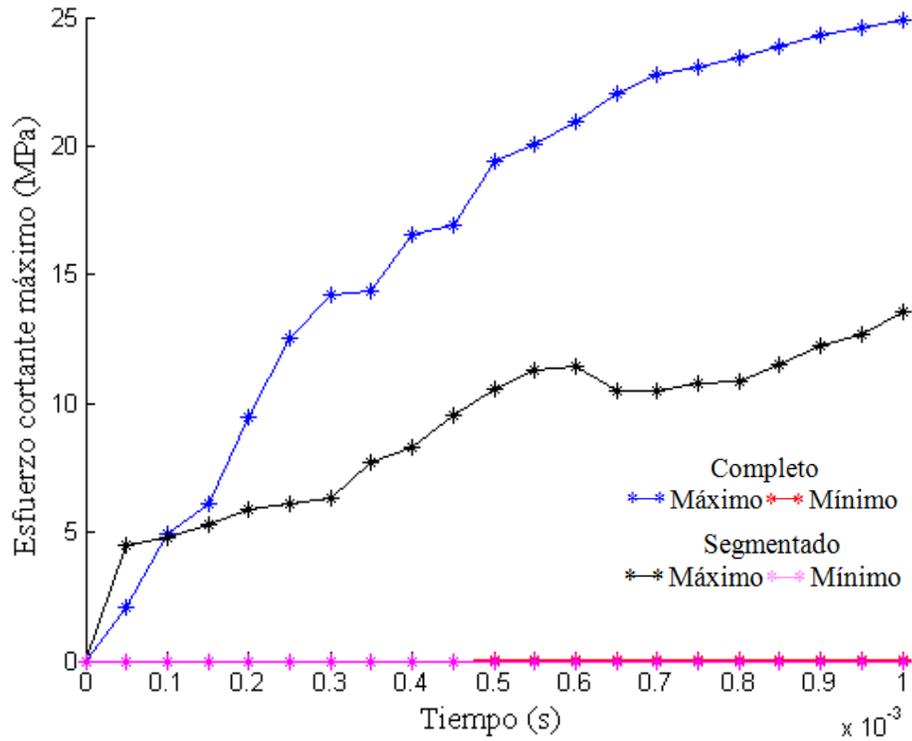


Figura V.30.- Valores del esfuerzo cortante máximo en el periodo de tiempo 0 a 0.001 s

Tabla V.15.- Valores máximos y mínimos del comparativo del esfuerzo cortante máximo

Tipo	Tiempo (s)	Esfuerzo cortante máximo (MPa)	
		Mínimo	Máximo
Completo	0.00100	0.0000197	24.921
Segmentado	0.00100	0	13.545

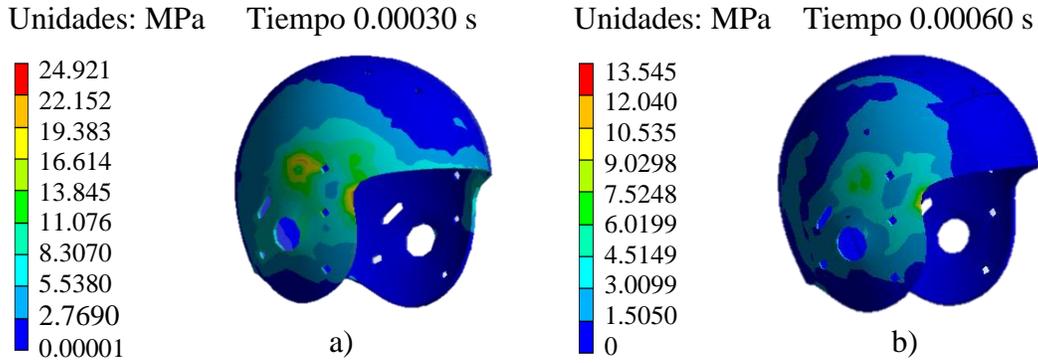


Figura V.31.- Valores y ejemplificación gráfica de los valores máximos del esfuerzo cortante máximo en MPa, a) casco completo, b) casco segmentado

Los valores del esfuerzo cortante máximo se presentan en el casco completo de una forma casi parabólica en la figura V.30, teniendo el valor máximo en el tiempo 0.001 s, 0.00001 MPa en el mínimo y de 24.921 MPa en el máximo para el casco completo. En el casco segmentado los valores del esfuerzo cortante máximo inician de una forma alternada con una tendencia lineal, teniendo el máximo en el tiempo 0.001 s, el cual es de 13.545 MPa.

V.4.- Sumario

El capítulo V se enfoca en la demostración de las ventajas del casco segmentado, en comparación del casco completo que se está usando actualmente, mediante simulaciones computacionales, ayudadas por el método de elemento finito. La disminución en valores de las pruebas realizada a ambos casos de estudio en igualdad de circunstancias.

The background features a dynamic, abstract composition of flowing, overlapping lines in various shades of red, from deep maroon to bright white. The lines curve and sweep across the frame, creating a sense of movement and depth. The overall effect is modern and energetic.

CONCLUSIONES

Conclusiones del impacto frontal

El desplazamiento que presentan ambos cascos es casi lineal, se observa un aumento del desplazamiento en el casco segmentado en comparación con el casco completo, se deduce que al ser solo la parte frontal del casco segmentado recibe el impacto, el desplazamiento ocurre solo en esa parte, ya que no se observa un desplazamiento importante en el resto del casco, por otro lado se observa los puntos críticos en el casco completo debido al desplazamiento general del casco, teniendo una diferencia entre los desplazamientos de 1 milímetro, concluyendo que aunque existe un desplazamiento mayor en el casco segmentado, no se observan zonas críticas en el.

En el esfuerzo von Mises, se muestran de manera importante los esfuerzos a tensión con valores semejantes, 38.89 MPa en el tiempo 0.00095 s para el casco completo y 31.96 MPa en el tiempo 0.00065 s en el segmentado, la diferencia radica al final del movimiento, en casco completo el esfuerzo a partir del tiempo 0.0005 s tiende a subir hasta alcanzar su máximo en el tiempo 0.001 s, mientras que en el casco segmentado, una vez que alcanza su máximo en el tiempo 0.00065 s la magnitud del esfuerzo va disminuyendo de forma importante. Con lo anterior el casco segmentado presenta valores inferiores al casco completo, teniendo de igual forma una zona menos afectada en la estructura.

El esfuerzo cortante, avanza de manera semejante tanto a tensión como a compresión en ambos cascos, teniendo valores mayores a compresión, nuevamente la diferencia radica en el punto en que se observan estos valores, en el casco completo, éstos se observan casi al final del movimiento en el tiempo 0.00095 s. En el casco segmentado los valores máximos y mínimos se dan en el principio del impacto, en el tiempo 0.00025 s, para después reducir de forma considerable en comparación del casco completo al final del impacto, en la Figura V.7b, se observa una zona crítica en el casco segmentado en la parte frontal, mientras que en la figura V.7a, se puede observar una zona de mayor afectación.

La deformación plástica es prácticamente nula en ambos cascos, esto se debe a que no se sobrepasa la zona elástica, si bien se presentan valores en la zona plástica del material, estos no son considerables para el estudio.

El esfuerzo cortante máximo presenta valores mayores en el casco completo, teniendo una discontinuidad hasta el tiempo 0.0005 s después del cual se incrementa de una forma casi lineal hasta tener un valor máximo de 44.17 MPa. El casco segmentado presenta valores máximos menores que su contraparte completa teniendo un máximo de 16.767 MPa y descendiendo el final del movimiento. Por otro lado en la Figura V.11 se muestra claramente donde se encuentran las zonas más afectada en el casco completo y la región afectada del segmentado, la cual es menor.

Conclusiones del impacto frontal oblicuo

El desplazamiento ocurre de forma casi lineal en ambos casos, a diferencia del impacto frontal, donde solo es afectada la parte frontal del casco segmentado, en el impacto frontal oblicuo existen más zonas afectadas, teniendo un punto crítico en la parte frontal del mismo, aunque existe una mayor afectación, los valores de desplazamiento son menores que el casco completo.

En el esfuerzo von Mises, la Figura V.15 muestra la distribución del esfuerzo en la superficie del casco segmentado, aunque el valor máximo del esfuerzo von Mises es menor en él, 37.01 MPa, en comparación con el casco completo (50.22 MPa) que presenta una menor zona de distribución de los esfuerzos en su superficie, esto puede deberse al choque de las partes que componen al casco segmentado, ya que a pesar de que el impacto ocurre de forma oblicuo, el punto crítico se presenta en la zona frontal.

El esfuerzo cortante en el impacto frontal oblicuo se presentan valores de tensión y compresión para ambos casos, los cuales se comportan de una forma cuasi-simétrica; para el casco completo, los valores máximos y mínimos ocurren al final del tiempo teniendo valores -7.953 MPa y 8.345 MPa respectivamente, en el caso del casco segmentado los máximos y mínimos no se presentan en el mismo tiempo ya que se tienen el máximo en el tiempo 0.00060 s siendo 7.679 MPa y el mínimo en el tiempo 0.00055 s, el cual es de -7.37 MPa. Por otro lado en la Figura V.17, se aprecia los puntos críticos en el casco completo, y en el casco segmentado el punto crítico se ubica en donde chocan la parte lateral con la frontal y superior.

La deformación plástica es prácticamente nula en ambos cascos, esto se debe a que no se sobrepasa la zona elástica, si bien se presentan valores en la zona plástica del material, estos no son considerables para el estudio, ya que no representa valores superiores al 0.5%.

Se tiene en el esfuerzo cortante máximo valores máximos 26.890 MPa en el casco completo y un valor máximo de 18.852 en el casco segmentado. Nuevamente se observa la zona afectada en el casco completo se concentra en el punto del impacto, a diferencia del casco segmentado en donde la zona afectada se distribuye por una mayor superficie en el casco.

Conclusiones para el impacto lateral

El contacto entre los cascos inicia en el mismo tiempo para ambos casos, siendo casi lineal para el casco segmentado, mientras que el casco completo presenta un comportamiento casi lineal para después de alcanzar su máximo, inicia un descenso en la magnitud del desplazamiento, mientras que el casco segmentado presenta un valor máximo de 0.0101 m, en el casco completo es de 0.0009 m. Así mismo en la figura V.23 se observa la zona crítica en el casco segmentado, esta se da en toda la parte lateral contraria al impacto, esto se debe al choque de las diferentes secciones que componen el casco.

El esfuerzo de von Mises y esfuerzo cortante máximo presentan una discontinuidad de los valores para considerar un comportamiento parabólico en ambos casos, el casco completo muestra un valor de esfuerzos (46.77 MPa) casi de el doble de su contraparte segmentada (24.097 MPa).

El esfuerzo cortante se comporta de forma casi simétrica en el casco completo, teniendo un comportamiento similar en el casco segmentado, ambos presentan valores de tensión y compresión, teniendo el valor máximo en el tiempo 0.001 s. para los dos casos, en la figura V.27 se observa que en el caso completo hay una mayor área que presenta esfuerzos en comparación con el casco segmentado.

La deformación plástica es nula en el casco segmentado, por otro lado el casco completo presenta una zona crítica justo en el área del impacto, si bien se muestran valores éstos no son críticos para la integridad de la estructura del mismo.

En el esfuerzo cortante máximos, los valores presentados por el casco segmentado, son prácticamente la mitad de los que se obtienen en el casco completo.

De manera general se puede concluir que el casco con estructura segmentada tiene una respuesta más favorable a las condiciones de impacto, si bien se puede determinar que existe un mayor desplazamiento en los tres análisis realizados, esto se debe a que la geometría del casco segmentado está separada 1 milímetro entre sí y es justamente el valor de diferencia entre ambos cascos, por otro lado la disminución de los esfuerzos von Mises, cortante y cortante máximo, demuestra una mejor respuesta a las condiciones de impacto.

The background features a dynamic, abstract composition of flowing, overlapping lines in various shades of red, from deep maroon to bright white. The lines curve and sweep across the frame, creating a sense of movement and depth. The overall effect is modern and energetic.

TRABAJOS FUTUROS

-
- Implementación de un banco de pruebas para realizar las pruebas de impacto, para realizar pruebas físicas, instrumentando el mismo para corroborar los datos obtenidos experimentalmente.
 - Diseñar un sistema de amortiguación para mejorar la seguridad del casco, ya sea utilizando uno de los existente o buscar más alternativas en cuanto a materiales.
 - Llevar al casco a la etapa de prototipo completo, diseñando un sistema de fijación para las diferentes partes que componen el casco, así como el lugar de sujeción del amortiguamiento y la geometría de la barra