



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: VALIDACIÓN DE ELEMENTOS POLIMÉRICOS SOMETIDOS
A CARGAS COMBINADAS, OPTIMIZADOS TOPOLÓGICAMENTE
MEDIANTE SOFTWARE INSPIRE 9.5 .**

AUTORA: PÉREZ PRADO, MARCELA ALEXANDRA

DIRECTOR: ING. OLMEDO, JOSÉ FERNANDO MSC.

SANGOLQUÍ

2017



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación, “**VALIDACIÓN DE ELEMENTOS POLIMÉRICOS SOMETIDOS A CARGAS COMBINADAS, OPTIMIZADOS TOPOLÓGICAMENTE MEDIANTE SOFTWARE INSPIRE 9.5**” realizado por la señorita **MARCELA ALEXANDRA PÉREZ PRADO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita **MARCELA ALEXANDRA PÉREZ PRADO** para que lo sustente públicamente.

Ing. Fernando Olmedo MSc.

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente trabajo de titulación “**VALIDACIÓN DE ELEMENTOS POLIMÉRICOS SOMETIDOS A CARGAS COMBINADAS, OPTIMIZADOS TOPOLÓGICAMENTE MEDIANTE SOFTWARE INSPIRE 9.5**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándolos en citas a pie de página y como fuentes en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.

Marcela Alexandra Pérez Prado



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **MARCELA ALEXANDRA PÉREZ PRADO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” a publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**VALIDACIÓN DE ELEMENTOS POLIMÉRICOS SOMETIDOS A CARGAS COMBINADAS, OPTIMIZADOS TOPOLÓGICAMENTE MEDIANTE SOFTWARE INSPIRE 9.5**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 18 de septiembre del 2017

Marcela Alexandra Pérez Prado

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación va dedicado a mis padres, a mi abuelito y sobre todo a mi abuelita. A mis padres porque siempre estuvieron conmigo en los momentos más difíciles, apoyándome y ayudándome, llorando conmigo cuando no podía más y dándome la mano para levantarme y salir adelante. A mi abuelito, "Papapaito", por brindarme su apoyo, darme fuerzas y por confiar siempre en mí. Y a mi abuelita, "Mama Elinita", que siempre fue mi motor para seguir adelante para terminar mi carrera, que gracias a sus rezos estoy aquí, terminando esto, que comencé hace cinco años. Abuelita, a pesar de que no cumplí con lo que te prometí quiero que sepas, donde sea que estés, que lo he logrado gracias a ti.

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y a todos mis profesores por brindarme las enseñanzas necesarias para poder completar este ciclo tan importante de mi vida. A mi director del proyecto, Ing. Fernando Olmedo, por guiarme y por tenerme paciencia durante toda la realización de este proyecto.

Agradezco a mis padres y a mis abuelitos por siempre estar ahí, por darme sus fuerzas, sus conocimientos y guiarme siempre por un buen camino. A mi familia y a mis amigos que con una risa, un abrazo, una molestada, con muy poquito, hicieron que este camino tan duro sea más llevadero.

Y por último agradezco a Dios que me ha dado cada momento bueno y malo, y me ha ayudado a salir adelante siempre con el amor de mis padres, de mi familia y de las personas que me aprecian.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	xxiv
ABSTRACT	xxv
CAPITULO I	1
1. GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	1
1.1.1. Objetivo General	1
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcance del proyecto	2
1.4. Justificación del proyecto	3
CAPITULO II	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Optimización Topológica	5
2.1.1. Optimización Topológica de Estructuras Continuas	6
2.1.2. Optimización Topológica de Estructuras Discretas	6
2.1.2.1. Optimización topológica de estructura de malla continua	6
2.1.2.2. Optimización topológica de estructuras discretas	6
2.2. Software Inspire 9.5	10
2.3. Impresora 3D	11
2.3.1. Materiales	12
2.3.1.1. Termoplástico ABS	12
2.3.1.2. Termoplástico PLA	14
CAPITULO III	16
3. DISEÑO DE PROTOTIPOS	16
3.1. Material	16
3.1.1. Propiedades Mecánicas	17
3.1.1.1. Ensayo de Tracción en Material PLA	17

3.1.1.2. Ensayo de Flexión en Material PLA	23
3.1.1.3. Ensayo de Tracción en Material ABS	36
3.1.1.4. Ensayo de Flexión en Material ABS	37
3.1.1.5. Densidad en el Material ABS y PLA	40
3.2. Geometría.....	42
3.2.1. Viga rectangular a flexión	42
3.2.2. Cilindro a torsión	43
3.2.3. Prisma cuadrado a Flexo Torsión	44
3.3. Cargas a aplicar.....	46
3.3.1. Viga rectangular a flexión	46
3.3.2. Cilindro a torsión	46
3.3.3. Prisma cuadrado a Flexo Torsión	48
3.4. Uso de Software para análisis del comportamiento mecánico (Esfuerzos, deformaciones unitarias, desplazamientos)	49
3.4.1. Viga rectangular a flexión	49
3.4.2. Cilindro a torsión	54
3.4.3. Prisma cuadrado a Flexo Torsión	60
CAPITULO IV	66
4. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA	66
4.1. Modelado de elementos.....	66
4.1.1. Viga rectangular a flexión	66
4.1.2. Cilindro a torsión	67
4.1.3. Prisma cuadrado a flexo torsión	68
4.2. Uso de Software Inspire 9.5.....	69
4.2.1. Software Inspire 9.5.....	69
4.2.2. Optimización topológica en la viga rectangular a flexión	69
4.2.3. Optimización topológica en el cilindro a torsión	82
4.2.4. Optimización topológica en el prisma cuadrado a flexo torsión.	89
4.3. Análisis del resultado obtenido en la utilización del Software	96
4.3.1. Simulación en elementos optimizados topológicamente de la viga rectangular a flexión	96
4.3.1.1. Viga rectangular optimizada al 50% de la masa del elemento.....	97
4.3.1.2. Viga rectangular optimizada al 30% de la masa del elemento.....	101
4.3.1.3. Viga rectangular optimizada al 20% de la masa del elemento.....	105

4.3.2. Simulación en elementos optimizados topológicamente del cilindro a torsión	109
4.3.2.1. Cilindro optimizado al 50% de la masa del elemento	109
4.3.2.2. Cilindro optimizado al 30% de la masa del elemento	114
4.3.2.3. Cilindro optimizado al 20% de la masa del elemento	118
4.3.3. Simulación en elementos optimizados topológicamente del prisma cuadrado a flexo torsión.	118
4.3.3.1. Prisma cuadrado optimizado al 50% de la masa del elemento.....	118
4.3.3.2. Prisma cuadrado optimizado al 30% de la masa del elemento.....	123
4.3.3.3. Prisma cuadrado optimizado al 20% de la masa del elemento.....	128
4.4. Modelado final de prototipos.....	133
CAPITULO V	136
5. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS OPTIMIZADOS	136
5.1. Operación Impresora 3D.....	136
5.2. Construcción.....	138
5.2.1. Especificaciones técnicas de la Impresora 3D Lulz bot TAZ 6	139
5.2.2. Prototipos impresos	141
CAPITULO VI	142
6. ENSAYOS MECÁNICOS.....	142
6.1. Operación de instrumentos y equipos a utilizar	142
6.2. Protocolo de Pruebas y resultados	145
6.2.1. Flexión	145
6.2.2. Torsión.....	151
6.2.3. Flexo Torsión	156
CAPITULO VII	163
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	163
7.1. Viga rectangular a flexión	163
7.2. Cilindro a torsión	170
7.3. Prisma cuadrado a flexo torsión	174
CAPITULO VIII	180
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	180
8.1. Conclusiones	180
8.2. Recomendaciones	181
BIBLIOGRAFÍA	183

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Elemento sometido a flexión.....	3
Figura 2 Elemento sometido a torsión	3
Figura 3 Elemento sometido a flexo torsión.....	3
Figura 4 Tres tipos de optimización estructural. a) Optimización de tamaño, b) optimización geométrica y c) optimización topológica.....	5
Figura 5 a) Elemento mecánico generalizado donde se representan las cargas, el dominio bidimensional, las restricciones, áreas donde no existe material b) Viga en voladizo con carga en el extremo con dominio de diseño rectangular, c) solución mediante análisis topológico de optimización del diseño basada en una discretización de 3200 elementos y 50% Volumen del material.	8
Figura 6 Diagrama de flujo del proceso de cálculo para el diseño de optimización topológica.....	10
Figura 7 Interfaz del Software Inspire 9.5 para realizar la optimización topológica.....	11
Figura 8 Medidas de probeta de tracción.....	17
Figura 9 Probeta de Tracción.....	18
Figura 10 Probeta 1 a tracción impresa, Material PLA.....	19
Figura 11 Ensayo de tracción, Material PLA.....	19
Figura 12 Probeta 1 Ensayada, Material PLA.....	20
Figura 13 Probeta 2 ensayada, Material PLA	21
Figura 14 Probeta 3 ensayada, Material PLA	22
Figura 15 Medidas probeta flexión.....	23
Figura 16 Probeta de flexión.....	24
Figura 17 Probeta 1 de flexión, Material PLA	26
Figura 18 Ensayo de flexión, Material PLA	26
Figura 19 Probeta 1 de flexión ensayada, Material PLA.....	27
Figura 20 Diagrama Fuerza [N] - Deflexión [mm] del comportamiento lineal de la probeta 1 sometido al ensayo de flexión, Material PLA	27
Figura 21 Probeta 2 de flexión ensayda, Material PLA.....	28
Figura 22 Diagrama Fuerza [N] - Deflexión [mm] del comportamiento lineal de la Probeta 2 sometido al Ensayo de Flexión, Material PLA	29
Figura 23 Probeta 3 de Flexión Ensayada, Material PLA	30
Figura 24 Diagrama Fuerza [N] - Deflexión [mm] del comportamiento lineal de la Probeta 3 sometido al Ensayo de Flexión, Material PLA	31
Figura 25 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Probeta1 S3D, PLA	32

Figura 26 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Probeta 2 S3D, PLA	33
Figura 27 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Probeta 3 MG, PLA	33
Figura 28 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Viga 100% de masa MG, PLA.....	35
Figura 29 Probeta de Tracción Ensayada, Material ABS	36
Figura 30 Probeta de Flexión Ensayada, Material ABS	37
Figura 31 Diagrama Fuerza [N] - Deflexión [mm] del comportamiento lineal de la Probeta sometido al Ensayo de Flexión, Material ABS.....	38
Figura 32 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Viga 100% de masa MG, ABS	39
Figura 33 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Material ABS.....	40
Figura 34 Medidas de la viga rectangular	42
Figura 35 Medidas del Bloque	42
Figura 36 Diseño Final Viga.....	43
Figura 37 Dimensiones del Cilindro	43
Figura 38 Medidas del Dado Cuadrado	44
Figura 39 Medidas del Dado Hexagonal.....	44
Figura 40 Diseño Final del Cilindro sometido a Torsión.....	44
Figura 41 Geometría en “L” para flexo torsión	45
Figura 42 Medidas de la pieza para flexo torsión.....	45
Figura 43 Medidas de dado para sujetar la pieza	46
Figura 44 Diseño final de la pieza para flexo torsión	46
Figura 45 Aplicación de carga considerando un brazo mecánico en una probeta cilíndrica de acero.....	47
Figura 46 Ingreso del material ABS en el programa AAWW.....	50
Figura 47 Ingreso del material PLA en el programa AAWW	50
Figura 48 Sólido exportado de la viga rectangular a flexión	50
Figura 49 Apoyos y cargas aplicadas en la viga rectangular	51
Figura 50 Diagrama de análisis de convergencia. Viga 100% de masa, ABS.....	51
Figura 51 Resultados de esfuerzos en la viga rectangular a flexión, Material ABS	52
Figura 52 Resultados de Deformación Unitario para la viga rectangular a flexión, Material ABS.....	52
Figura 53 Resultados de Deflexión para viga rectangular a flexión, Material ABS	52
Figura 54 Diagrama de análisis de convergencia. Viga 100% de masa, PLA	53
Figura 55 Resultados de esfuerzos en la viga rectangular a flexión, Material PLA	53

Figura 56 Resultados de Deformación Unitario para la viga rectangular a flexión, Material ABS.....	54
Figura 57 Resultados de Deflexión para viga rectangular a flexión, Material PLA	54
Figura 58 Sólido exportado del cilindro a torsión	55
Figura 59 Apoyo y torque aplicado en el cilindro	55
Figura 60 Diagrama de análisis de convergencia. Cilindro 100% de masa, ABS	56
Figura 61 Resultados de esfuerzos cortantes en el cilindro a torsión, Material ABS	56
Figura 62 Resultados de desplazamiento en el cilindro a torsión, Material ABS	57
Figura 63 Medidas de la cara del dado hexagonal	57
Figura 64 Diagrama de análisis de convergencia. Cilindro 100% de masa, PLA	58
Figura 65 Resultados de esfuerzos cortantes en el cilindro a torsión, Material PLA	59
Figura 66 Resultados de desplazamiento en el cilindro a torsión, Material PLA	59
Figura 67 Sólido exportado del prisma a flexo torsión	60
Figura 68 Apoyo y carga aplicada en el prisma	61
Figura 69 Diagrama de análisis de convergencia. Prisma cuadrado 100% de masa, ABS	61
Figura 70 Resultados de esfuerzos en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material ABS	62
Figura 71 Resultados de deformación unitaria en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material ABS.....	62
Figura 72 Resultados de desplazamientos en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material ABS.....	63
Figura 73 Diagrama de análisis de convergencia. Prisma cuadrado 100% de masa, PLA	63
Figura 74 Resultados de esfuerzos en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material PLA.....	64
Figura 75 Resultados de deformación unitaria en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material PLA	64
Figura 76 Resultados de desplazamientos en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material PLA	65
Figura 77 Viga rectangular a flexión	67
Figura 78 Apoyos y carga aplicados en la viga rectangular	67
Figura 79 Cilindro a torsión	67
Figura 80 Apoyo y torque aplicado en el cilindro	68
Figura 81 Prisma cuadrado a flexo torsión	68
Figura 82 Apoyo y carga aplicado en el prisma cuadrado	68
Figura 83 Interfaz de ingreso de material en el programa Inspire 9.5.....	69

Figura 84 Aplicación de cargas y apoyos en la viga rectangular a flexión en el programa Inspire 9.5	70
Figura 85 Selección del material de la viga a flexión	71
Figura 86 Selección de "Espacio de diseño" en la viga a flexión	71
Figura 87 Interfaz de selección de parámetros para ejecutar la optimización	73
Figura 88 Interfaz del estado de ejecución de la optimización.....	73
Figura 89 Viga a flexión optimizados al 50% de masa, Material ABS.....	74
Figura 90 Corte transversal en el centro de la viga optimizada con el 50% de masa, Material ABS	74
Figura 91 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 50% de masa, Material ABS	75
Figura 92 Viga a flexión optimizada con el 30% de masa, Material ABS.....	75
Figura 93 Corte transversal en el centro de la viga a flexión optimizada con el 30% de masa, Material ABS.....	76
Figura 94 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 30% de masa, Material ABS	76
Figura 95 Viga a flexión optimizada con el 20% de masa, Material ABS.....	77
Figura 96 Corte transversal en el centro de la viga a flexión optimizada con el 20% de masa, Material ABS.....	77
Figura 97 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 20% de masa, Material PLA	78
Figura 98 Viga a flexión optimizados al 50% de masa, Material PLA	78
Figura 99 Corte transversal en el centro de la viga optimizada con el 50% de masa, Material PLA.....	79
Figura 100 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 50% de masa, Material PLA	79
Figura 101 Viga a flexión optimizada con el 30% de masa, Material PLA ...	80
Figura 102 Corte transversal en el centro de la viga a flexión optimizada con el 30% de masa, Material PLA	80
Figura 103 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 30% de masa, Material PLA	81
Figura 104 Viga a flexión optimizada con el 20% de masa, Material PLA ...	81
Figura 105 Corte transversal en el centro de la viga a flexión optimizada con el 20% de masa, Material PLA	82
Figura 106 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 20% de masa, Material PLA	82

Figura 107 Aplicación de torque y apoyo en el cilindro a torsión en el programa Inspire 9.5	83
Figura 108 Selección de "Espacio de diseño" en el cilindro a torsión	83
Figura 109 Cilindro a torsión optimizado al 50% de masa, Material ABS	84
Figura 110 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 50% de masa, Material ABS	84
Figura 111 Cilindro a torsión optimizado al 30% de masa, Material ABS	85
Figura 112 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 30% de masa, Material ABS	85
Figura 113 Cilindro a torsión optimizado al 20% de masa, Material ABS	86
Figura 114 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 20% de masa, Material ABS	86
Figura 115 Cilindro a torsión optimizado al 50% de masa, Material PLA.....	87
Figura 116 Figura 4. 34 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 50% de masa, Material PLA.....	87
Figura 117 Cilindro a torsión optimizado al 30% de masa, Material PLA.....	88
Figura 118 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 30% de masa, Material PLA.....	88
Figura 119 Cilindro a torsión optimizado al 20% de masa, Material PLA.....	89
Figura 120 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 20% de masa, Material ABS	89
Figura 121 Aplicación de la carga y apoyo, y selección del "Espacio de diseño" en el prisma cuadrado a flexo torsión en el programa Inspire 9.5	90
Figura 122 Vista trasera del prisma cuadrado al 50% de masa, Material ABS.....	90
Figura 123 Vista delantera del prisma cuadrado al 50% de masa, Material ABS	91
Figura 124 Vista trasera del prisma cuadrado al 30% de masa, Material ABS.....	91
Figura 125 Vista delantera del prisma cuadrado al 30% de masa, Material ABS	92
Figura 126 Vista trasera del prisma cuadrado al 20% de masa, Material ABS.....	92
Figura 127 Vista delantera del prisma cuadrado al 20% de masa, Material ABS	93
Figura 128 Vista trasera del prisma cuadrado al 50% de masa, Material PLA	93
Figura 129 Vista delantera del prisma cuadrado al 50% de masa, Material PLA	94
Figura 130 Vista trasera del prisma cuadrado al 30% de masa, Material PLA	94
Figura 131 Vista delantera del prisma cuadrado al 30% de masa, Material PLA	95

Figura 132 Vista trasera del prisma cuadrado al 20% de masa, Material PLA	95
Figura 133 Vista delantera del prisma cuadrado al 20% de masa, Material PLA	96
Figura 134 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 50% de masa	97
Figura 135 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 50% de masa, ABS.....	97
Figura 136 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 50% de masa, Material ABS	98
Figura 137 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 50% de masa, Material ABS	98
Figura 138 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 50% de masa, Material ABS	98
Figura 139 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 50% de masa, Material PLA.....	99
Figura 140 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 50% de masa, PLA	99
Figura 141 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 50% de masa, Material PLA.....	100
Figura 142 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 50% de masa, Material PLA.....	100
Figura 143 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 50% de masa, Material PLA.....	100
Figura 144 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 30% de masa	101
Figura 145 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 30% de masa, ABS.....	101
Figura 146 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 30% de masa, Material ABS	102
Figura 147 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 30% de masa, Material ABS	102
Figura 148 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 30% de masa, Material ABS	102
Figura 149 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 30% de masa, Material PLA.....	103
Figura 150 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 30% de masa, PLA	103
Figura 151 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA.....	104
Figura 152 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA.....	104
Figura 153 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA.....	104

Figura 154 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 20% de masa	105
Figura 155 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 20% de masa, ABS.....	105
Figura 156 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 20% de masa, Material ABS	106
Figura 157 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 20% de masa, Material ABS	106
Figura 158 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 20% de masa, Material ABS	106
Figura 159 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 20% de masa, Material PLA.....	107
Figura 160 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 20% de masa, PLA	107
Figura 161 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 20% de masa, Material PLA.....	108
Figura 162 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 20% de masa, Material PLA.....	108
Figura 163 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA.....	108
Figura 164 Aplicación de torque y soporte en la viga optimizada al 50% de masa, Material ABS	109
Figura 165 Diagrama de análisis de Convergencia, Cilindro 50% de masa, ABS	110
Figura 166 Resultado de esfuerzo cortante en el cilindro optimizado al 50% de masa, Material ABS	110
Figura 167 Resultado de desplazamiento en el cilindro optimizado al 50% de masa, Material ABS	111
Figura 168 Aplicación de torque y soporte en la viga optimizada al 50% de masa, Material PLA.....	112
Figura 169 Diagrama de análisis de Convergencia, Cilindro 50% de masa, PLA	112
Figura 170 Resultado de esfuerzo cortante en el cilindro optimizado al 50% de masa, Material PLA.....	113
Figura 171 Resultado de desplazamiento en el cilindro optimizado al 50% de masa, Material PLA.....	113
Figura 172 Aplicación de torque y soporte en la viga optimizada al 30% de masa, Material ABS	114
Figura 173 Diagrama de análisis de Convergencia, Cilindro 30% de masa, ABS	115
Figura 174 Resultado de esfuerzo cortante en el cilindro optimizado al 30% de masa, Material ABS	115
Figura 175 Resultado de desplazamiento en el cilindro optimizado al 30% de masa, Material ABS	116

Figura 176 Aplicación de torque y soporte en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA.....	116
Figura 177 Diagrama de análisis de Convergencia, Cilindro 30% de masa, PLA	117
Figura 178 Resultado de esfuerzo cortante en el cilindro optimizado al 30% de masa, Material PLA.....	117
Figura 179 Resultado de desplazamiento en el cilindro optimizado al 30% de masa, Material PLA.....	117
Figura 180 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material ABS	118
Figura 181 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 50% de masa, ABS	119
Figura 182 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material ABS	119
Figura 183 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material ABS	120
Figura 184 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material ABS	120
Figura 185 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material PLA.....	121
Figura 186 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 50% de masa, PLA	121
Figura 187 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material PLA.....	122
Figura 188 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material PLA.....	122
Figura 189 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material PLA.....	123
Figura 190 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material ABS	123
Figura 191 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 30% de masa, ABS	124
Figura 192 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material ABS	124
Figura 193 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material ABS	125
Figura 194 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material ABS	125
Figura 195 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material PLA.....	126
Figura 196 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 30% de masa, PLA	126
Figura 197 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material PLA.....	127

Figura 198 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material PLA.....	127
Figura 199 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material PLA.....	128
Figura 200 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material ABS	128
Figura 201 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 20% de masa, ABS	129
Figura 202 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material ABS	129
Figura 203 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material ABS	130
Figura 204 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material ABS	130
Figura 205 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material PLA.....	131
Figura 206 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 20% de masa, PLA	131
Figura 207 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material PLA.....	132
Figura 208 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material PLA.....	132
Figura 209 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material PLA.....	133
Figura 210 Diseño final de la viga a flexión optimizada con el 50% de la masa	134
Figura 211 Diseño final del cilindro a torsión optimizado con el 50% de la masa	134
Figura 212 Diseño final del prisma cuadrado a flexo torsión optimizado con el 50% de la masa.....	135
Figura 213 Proceso de polímero fundido	137
Figura 214 Proceso de deposición fundida.....	137
Figura 215 Interfaz del programa CURA para la realización de la impresión 3D.....	138
Figura 216 Aplicación de soportes en las piezas desde el programa CURA.....	139
Figura 217 Impresora 3D Lulz bot TAZ 6.....	140
Figura 218 Prototipos impresos de la viga rectangular a flexión con el 100%, 50%, 30% y 20% de masa, Material ABS y PLA.....	141
Figura 219 Prototipos impresos del cilindro a torsión con el 100%, 50%, 30% y 20% de masa, Material ABS y PLA.....	141
Figura 220 Prototipos impresos del prisma cuadrado a flexo torsión con el 100%, 50%, 30% y 20% de masa, Material ABS y PLA.....	141
Figura 221 Máquinas de ensayos universales MTS, capacidad 5 KN	142

Figura 222 Máquina de ensayos universales.....	143
Figura 223 Calibrador de toquimetro	143
Figura 224 Calibrador	144
Figura 225 Entenalla.....	144
Figura 226 Comparador de reloj.....	144
Figura 227 Pesos.....	145
Figura 228 Balanza.....	145
Figura 229 Ensayo de flexión en vigas	146
Figura 230 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 100% de masa, Material ABS	146
Figura 231 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 50% de masa, Material ABS	147
Figura 232 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 30% de masa, Material ABS	147
Figura 233 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 20% de masa, Material ABS	148
Figura 234 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 100% de masa, Material PLA.....	149
Figura 235 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 50% de masa, Material PLA.....	149
Figura 236 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 30% de masa, Material PLA.....	150
Figura 237 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 20% de masa, Material PLA.....	151
Figura 238 Ensayo de torsión en el elemento cilíndrico.....	152
Figura 239 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 100% de masa, Material ABS	152
Figura 240 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 50% de masa, Material ABS	153
Figura 241 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 30% de masa, Material ABS	153
Figura 242 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 100% de masa, Material PLA.....	154
Figura 243 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 50% de masa, Material PLA.....	155
Figura 244 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 30% de masa, Material PLA.....	155
Figura 245 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 20% de masa, Material PLA.....	156
Figura 246 Nivelación del prisma cuadrado a flexo torsión.....	156
Figura 247 Ensayo de flexo torsión en el prisma cuadrado	157
Figura 248 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 100% de masa, Material ABS	157

Figura 249 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 50% de masa, Material ABS	158
Figura 250 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 30% de masa, Material ABS	158
Figura 251 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 20% de masa, Material ABS	159
Figura 252 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 100% de masa, Material PLA.....	160
Figura 253 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 50% de masa, Material PLA.....	160
Figura 254 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 30% de masa, Material PLA.....	161
Figura 255 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 20% de masa, Material PLA.....	162
Figura 256 Diagrama de esfuerzos vs porcentaje de masa para la viga rectangular, Material ABS y PLA.....	165
Figura 257 Diagrama de deformación unitaria vs porcentaje de masa para la viga rectangular, Material ABS y PLA	166
Figura 258 Diagrama de fuerza máxima vs porcentaje de masa, Material ABS y PLA.....	168
Figura 259 Diagrama de deflexión con una fuerza máxima vs porcentaje de masa para la viga rectangular, Material ABS y PLA	169
Figura 260 Diagrama de deflexión con una fuerza de 30 N vs porcentaje de masa para la viga rectangular, Material ABS y PLA	170
Figura 261 Diagrama de esfuerzos cortantes vs porcentaje de masa para el cilindro a torsión, Material ABS y PLA.....	173
Figura 262 Diagrama de esfuerzos vs porcentaje de masa para el prisma cuadrado, Material ABS y PLA.....	177
Figura 263 Diagrama de deformación unitaria vs porcentaje de masa para el prisma cuadrado, Material ABS y PLA	178

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Propiedades cualitativas del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	12
Tabla 2	Propiedades cuantitativas del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	13
Tabla 3	Propiedades físicas y mecánicas del ácido poliláctico (PLA)	14
Tabla 4	Dimensiones Probeta Tracción	18
Tabla 5	Dimensiones Probeta 1 de Tracción, Material PLA	19
Tabla 6	Dimensiones Probeta 2 de Tracción, Material PLA	20
Tabla 7	Dimensiones probeta 3 de tracción, Material PLA	21
Tabla 8	Comparación de resultados de tracción en las diferentes empresas, Empresa S3D y MG	22
Tabla 9	Dimensiones probeta 1 de flexión, Material PLA	26
Tabla 10	Dimensiones probeta 2 de flexión, Material PLA	28
Tabla 11	Dimensiones probeta 3 de flexión, Material PLA	30
Tabla 12	Comparación de resultados de flexión en las diferentes empresas, Empresa S3D y MG	34
Tabla 13	Comparación Módulo de Elasticidad, Empresa MG, Material PLA	35
Tabla 14	Dimensiones Probeta de Tracción, Material ABS	36
Tabla 15	Dimensiones Probeta de Flexión, Material ABS	37
Tabla 16	Comparación Módulo de Elasticidad, Empresa MG, Material ABS	40
Tabla 17	Comparación de fuerzas y ángulos para ensayo de torsión	48
Tabla 18	Especificaciones técnicas de la impresora Lulz bot TAZ 6	140
Tabla 19	Características técnicas, Máquina de ensayos universales MTS capacidad de 5 KN	142
Tabla 20	Características técnicas, Máquina de ensayos universales ...	143
Tabla 21	Características técnicas, Calibrador de toquimetro	143
Tabla 22	Características técnicas, Calibrador	144
Tabla 23	Características técnicas, Entenalla	144
Tabla 24	Características técnicas, Comparador de reloj	144
Tabla 25	Características técnicas, Balanza	145
Tabla 26	Cuadro comparativo de resultados de la viga a flexión del material ABS	163
Tabla 27	Cuadro comparativo de resultados de la viga a flexión del material PLA	163
Tabla 28	Cuadro de análisis de pesos para la viga rectangular a flexión, Material ABS	164
Tabla 29	Cuadro de análisis de pesos para la viga rectangular a flexión, Material PLA	164
Tabla 30	Cuadro comparativo de resultados de esfuerzo entre el material ABS y PLA para la viga rectangular	164

Tabla 31	Cuadro comparativo de resultados de deformaciones unitarias entre el material ABS y PLA para la viga rectangular.....	166
Tabla 32	Comparación de resultados de deflexiones de la simulación y del ensayo para la viga rectangular, Material ABS	167
Tabla 33	Comparación de resultados de deflexiones de la simulación y del ensayo para la viga rectangular, Material PLA.....	167
Tabla 34	Cuadro comparativo de resultados de fuerza máxima entre el material ABS y PLA para la viga rectangular	168
Tabla 35	Cuadro comparativo de resultados de deflexiones con una fuerza máxima entre el material ABS y PLA para la viga rectangular.....	169
Tabla 36	Cuadro comparativo de resultados de deflexiones con una fuerza de 30 N entre el material ABS y PLA para la viga rectangular.....	170
Tabla 37	Cuadro comparativo de resultados del cilindro a torsión del material ABS	171
Tabla 38	Cuadro comparativo de resultados del cilindro a torsión del material PLA	171
Tabla 39	Cuadro de análisis de pesos para el cilindro a torsión, Material ABS	172
Tabla 40	Cuadro de análisis de pesos para el cilindro a torsión, Material PLA	172
Tabla 41	Cuadro comparativo de resultados de esfuerzo cortante para el cilindro a torsión entre el material ABS y PLA.....	173
Tabla 42	Comparación de resultados de ángulos de torsión de la simulación y del ensayo para el cilindro a torsión, Material ABS.....	174
Tabla 43	Comparación de resultados de ángulos de torsión de la simulación y del ensayo para el cilindro a torsión, Material ABS.....	174
Tabla 44	Cuadro comparativo de resultados del prisma cuadrado a flexo torsión del material ABS	175
Tabla 45	Cuadro comparativo de resultados del prisma cuadrado a flexo torsión del material PLA	175
Tabla 46	Cuadro de análisis de pesos para el prisma cuadrado a flexo torsión, Material ABS	176
Tabla 47	Cuadro de análisis de pesos para el prisma cuadrado a flexo torsión, Material PLA.....	176
Tabla 48	Cuadro comparativo de resultados de esfuerzo entre el material ABS y PLA para el prisma cuadrado.....	177
Tabla 49	Cuadro comparativo de resultados de deformaciones unitarias entre el material ABS y PLA para el prisma cuadrado.....	178

Tabla 50	Comparación de resultados de desplazamientos de la simulación y del ensayo para el prisma cuadrado, Material ABS.....	179
Tabla 51	Comparación de resultados de desplazamientos de la simulación y del ensayo para el prisma cuadrado, Material PLA.....	179

RESUMEN

Uno de los problemas más frecuentes que existen en la ingeniería, es determinar la óptima configuración geométrica de los elementos que conforman un sistema mecánico que utiliza como material el polímero conservando su resistencia a cargas estáticas y su rigidez mecánica. En este trabajo se plantea la validación de elementos poliméricos que conforman un sistema elemental mecánico sometidos a cargas combinadas, optimizados topológicamente mediante el software Inspire 9.5. La validación del comportamiento mecánico de estos elementos empezó con la realización de ensayos mecánicos sobre los polímeros ABS (Acrilo Nitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Ácido Poliláctico) con el fin de obtener sus propiedades físicas y mecánicas. Los elementos fueron simulados en su comportamiento mecánico mediante programas adecuados, utilizando las propiedades mecánicas medidas en los ensayos, una vez obtenidos los resultados de las simulaciones se procedió a realizar una optimización topológica de elementos básicos tipo viga simplemente apoyada, barra cilíndrica a torsión y elemento prismático sometido a flexo torsión con retiro de material al 50 %, 30 % y 20 % bajo la condición de máxima rigidez, utilizando para ello el programa computacional Inspire 9.5 el cual basa su análisis en método de los elementos finitos calculando la máxima rigidez con restricción de volumen, permitiendo la reducción del peso. Los prototipos optimizados fueron construidos en impresoras 3D y utilizando equipos e instrumentos del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas, se procedió a validar los resultados obtenidos en las simulaciones con los valores obtenidos en los ensayos mecánicos de laboratorio.

PALABRAS CLAVES:

- **OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA**
- **VALIDACIÓN**
- **INSPIRE 9.5**

ABSTRACT

One of the most frequent problems that exist in the engineering, is determined the geometric configuration of the elements that conform a mechanical system that uses like material the polymer conserving its resistance a static charges and its mechanical rigidity. In this paper we propose the validation of the polymer elements that make up a mechanical elemental system some search engines, optimized topologically using the software Inspire 9.5. The validation of the mechanical behavior of these elements began with the realization of mechanical tests on ABS (Acryl Nitrile Butadiene Styrene) and PLA (Polylactic Acid) polymers in order to obtain their physical and mechanical properties. The elements were simulated in their mechanical behavior in the appropriate programs, using the mechanical properties measured in the tests, once obtained the results of the simulations a topological optimization was performed of basic elements type simply supported beam, a cylindrical bar a torsion and prismatic element subjected to a twisting flexion with removal of material at 50%, 30% and 20% under the condition of maximum rigidity, using for this purpose the computer program Inspire 9.5 which bases its analysis on the method of the Finite Elements calculating maximum stiffness with volume restriction, allowing weight reduction. The optimized prototypes were built in 3D printers and used the instruments and instruments of the Laboratory of Materials Mechanics of the University of the Armed Forces, validated the results obtained in the simulations with the values obtained in the mechanical laboratory tests

KEYWORDS:

- **TOPOLOGICAL OPTIMIZATION**
- **VALIDATION**
- **INSPIRE 9.5**

CAPITULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

El estudio del óptimo diseño de estructuras han ido desarrollándose desde hace, aproximadamente, 25 años atrás, los cuales han ayudado a que se realicen diseños con menor peso y menor costo pero conservando sus propiedades mecánicas.

Los primeros estudios de optimización fueron realizados por Maxwell, entre los años de 1860 y 1865, sobre los estudios de estructuras en celosía. Sin embargo, en 1960, Schmidt propone la idea de que los ingenieros deben realizar diseños de elementos los cuales tengan el menor costo y que puedan resistir las cargas máximas que se puedan producir en las mismas. (Quintas, 1989)

En 1988, Bense y Kikuch desarrollaron conceptos básicos acerca de la optimización topológica los cuales han sido planteados por medio de la máxima rigidez, en el cual se va a distribuir el material de manera que se maximice la rigidez de la pieza. (OPReseña)

Este tipo de optimización surgió como un método teórico al inicio, pero según como se ha ido desarrollando la tecnología se ha ido implementando procesos computacionales en los cuales han ayudado a realizar la optimización topológica de una manera más fácil.

1.2. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Realizar la validación de elementos estructurales sometidos a cargas combinadas, optimizados topológicamente mediante software Inspire 9.5.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Obtener información sobre el tema de optimización topológica.
- Diseñar los prototipos que se someterán al análisis de optimización topológica, utilizando el programa AAWW¹.
- Realizar la optimización topológica de los prototipos diseñados, utilizando el software Inspire 9.5.
- Construir los prototipos optimizados utilizando impresora 3D.
- Realizar los ensayos mecánicos respectivos para la validación del software utilizado.
- Realizar un análisis de resultados a través de una comparación entre los valores de esfuerzos, deflexiones y deformaciones unitarias, obtenidos en la simulación y ensayos.

1.3. Alcance del proyecto

La optimización topológica tendrá como base el uso del programa Inspire 9.5 con sus módulos de dibujo, modelado y un nivel de optimización máximo del 50%, que corresponde al porcentaje de modificaciones en el peso del material, uniones y eliminación de elementos; el material a utilizar serán polímeros PLA y ABS de donde se fabricarán con la impresora 3D del Laboratorio de Procesos de Manufactura, tres prototipos de elementos tipo viga y elemento a torsión sometidos a combinaciones de carga simple previamente optimizados con el software, con formas geométricas tipo rectangular, cilíndrica y L. Para la simulación se utilizará el software de Ingeniería Mecánica, AAWW y SSWW², y para las validaciones a través de ensayos mecánicos se utilizará la máquina de ensayos universales y la máquina de ensayos de torsión del laboratorio de Mecánica de Materiales con capacidades de carga de hasta 5 kN

¹ Se omite el nombre de los programas computacionales debido a que son softwares comerciales.

² Se omite el nombre de los programas computacionales debido a que son softwares comerciales.

y 150 Nm. Para las mediciones de rigidez se utilizarán medidores de deflexión con apreciación de hasta 0.01 de mm.

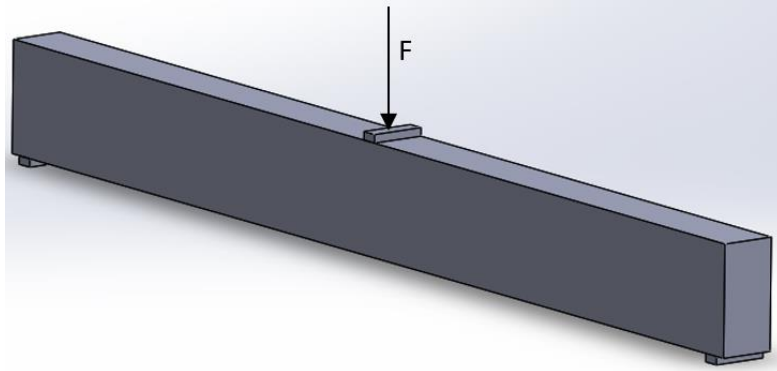


Figura 1 Elemento sometido a flexión

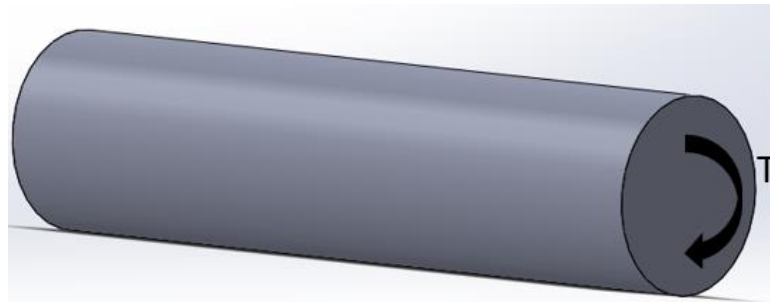


Figura 2 Elemento sometido a torsión

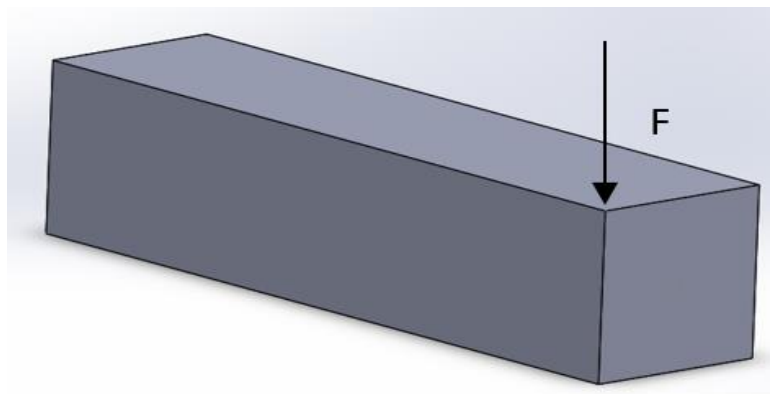


Figura 3 Elemento sometido a flexo torsión

1.4. Justificación del proyecto

En la Carrera de Ingeniería Mecánica de la ESPE, no existen proyectos de investigación que involucren la utilización del software Inspire 9.5 para la

optimización topológica de elementos, por lo que luego de haber recibido capacitación sobre la utilización de este software para alumnos y profesores del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, es importante empezar a utilizarlo a través de este proyecto planteado, en el que se pretende buscar una distribución óptima del material en un sistema básico mecánico mediante modificaciones de la conectividad y/o las coordenadas nodales o también mediante la supresión de elementos.

Este tipo de optimización es muy compleja, ya que para su análisis es necesario el uso de una cantidad elevada de variables; es por ello que se quiere analizar la optimización mediante un software (Inspire 9.5) que permitirá el análisis topológico de los elementos a estudiar de una manera fácil, rápida y concreta.

Para poder verificar los resultados obtenidos por el software que permitirá realizar la optimización de los elementos, se procederá a fabricar un prototipado de los mismos en la impresora 3D del laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas y posteriormente se someterá a ensayos mecánicos, con la finalidad de obtener una comparación entre los resultados previamente simulados y los resultados conseguidos con los ensayos.

Una vez obtenidos los resultados en los elementos poliméricos de sistemas básicos mecánicos con la disminución de material, con las modificaciones de la conectividad y/o las coordenadas nodales o también mediante la supresión de elementos, disminuye el peso de los sistemas, por tanto disminuyen también los costos que conllevan la compra de material, manufactura de conexiones y elementos; y gastos en procesos de montaje.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Optimización Topológica

La óptima configuración geométrica de una estructura es uno de los problemas más comunes que tienen los ingenieros al momento de realizar un diseño. Estos problemas se pueden solucionar mediante tres tipos de optimización:

- Optimización del tamaño (Figura a): donde la reducción de peso se logra mediante la modificación de las secciones rectas, manteniendo fijas las coordenadas nodales y la conectividad entre elementos.
- Optimización de la geometría (Figura b): donde la reducción de peso se logra cambiando la conectividad entre nodos, manteniendo fijas las coordenadas nodales y las secciones rectas.
- Optimización topológica (Figura c): donde la reducción de peso se logra cambiando las coordenadas y conectividad nodales, manteniendo fijas las secciones rectas.

(Bendsoe & Sigmund, 2004)

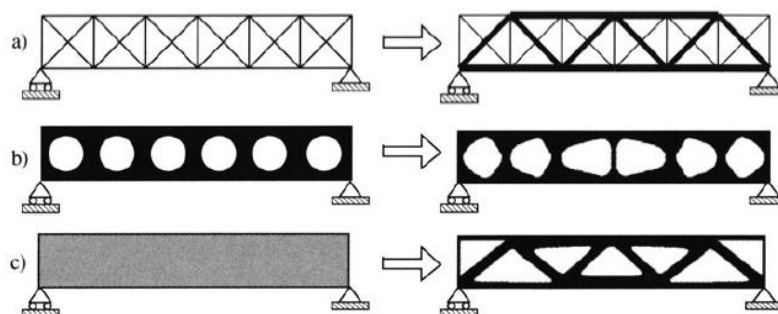


Figura 4 Tres tipos de optimización estructural. a) Optimización de tamaño, b) optimización geométrica y c) optimización topológica.

Fuente: (Bendsoe & Sigmund, 2004)

2.1.1. Optimización Topológica de Estructuras Continuas

En un medio continuo, se busca la óptima configuración de la estructura, donde el dominio se discretiza en elementos finitos que representan divisiones del material. (Meza, 2012)

2.1.2. Optimización Topológica de Estructuras Discretas

La optimización topológica en las estructuras discretas se divide en dos categorías: Optimización topológica de estructura de malla continua y optimización topológica de estructuras discretas. (Meza, 2012)

2.1.2.1. Optimización topológica de estructura de malla continua

Considera un dominio continuo de la estructura discretizando por un número infinito de barras rígidas distanciadas por un espacio infinitesimal, cuya solución óptima es obtenida analíticamente por la teoría de la elasticidad. (Meza, 2012)

2.1.2.2. Optimización topológica de estructuras discretas

Considera un dominio donde hay varios puntos distribuidos y pueden ser posibles juntas, cuya solución óptima se obtiene numéricamente. (Meza, 2012)

La técnica de optimización topológica (OT) aplicada al diseño de elementos estructurales mecánicos de peso reducido consiste en que al problema de máxima rigidez con restricción de volumen requiere en encontrar la distribución de material en un dominio donde se tenga dicha máxima rigidez, para determinada carga aplicada, restringiendo el volumen final del material usado en la estructura

El problema de la máxima rigidez con restricción de volumen es de gran importancia en Ingeniería Mecánica e Ingeniería de Estructuras, pues permite reducir el peso final del elemento mecánico o estructural, conservando su rigidez y funcionalidad. Partes mecánicas de bajo peso implican menores costos por material y menor consumo de combustible en el caso de vehículos de transporte. En general, la reducción de la inercia en partes en movimiento, sea maquinaria o vehículos, disminuye la cantidad de energía necesaria para su operación. La reducción de peso en estructuras mecánicas es importante

por su impacto en el ahorro de energía al reducir la inercia en máquinas y vehículos, además de la posible reducción de costos de fabricación. (Meza, Tamayo, & Franco, 2015)

Sirve para estructuras linealmente elásticas, se reduce a resolver tres problemas correspondientes al tamaño, forma y optimización topológica, que implica la determinación de características, tales como, el número y la ubicación y forma de los agujeros y la conectividad de los elementos. El propósito de la optimización topológica es encontrar la disposición óptima de una estructura dentro de una región específica.

Por lo general, las cantidades conocidas en el problema son las cargas aplicadas, las condiciones de soporte, el volumen de la estructura, algunas restricciones de diseño adicionales, como la ubicación y tamaño de los agujeros prescritos o áreas sólidas. En cambio las variables desconocidas son el tamaño físico y la forma y conectividad de la estructura.

La topología, la forma y el tamaño de la estructura no se pueden representar por funciones paramétricas estándar, sino por un conjunto de funciones distribuidas definidas en un dominio de diseño fijo. Estas funciones a su vez representan una parametrización del tensor de rigidez del sólido continuo y ésta es la elección adecuada del proceso de parametrización que conduce a la formulación de un diseño adecuado para poder realizar el mejoramiento del análisis topológico.

La estructuración del problema de optimización es análogo al conjunto de formulaciones conocidas que se utilizan para la solución de problemas de dimensionado de estructuras discretas y continuas así como también de estructuras tipo celosía con el fin de poder empezar por un nivel bajo del análisis topológico, los primeros problemas que se deben resolver son los que involucran el diseño en términos de objetivos y restricciones, es decir, diseñar para los problemas llamados de cumplimiento mínimo (máxima Rigidez global). (Bendsoe & Sigmund, 2004)

De ésta forma si se considera un elemento mecánico como un cuerpo que ocupa un dominio, que está sometido a cargas y dispone de ciertas condiciones de contorno tal como se muestra en la siguiente figura 2.2

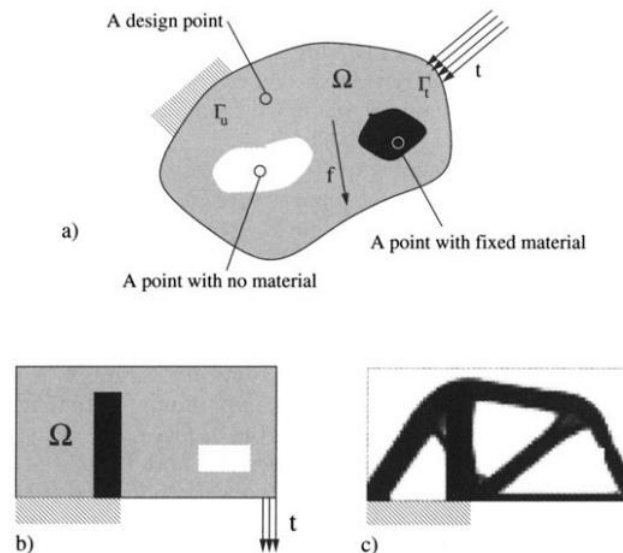


Figura 5 a) Elemento mecánico generalizado donde se representan las cargas, el dominio bidimensional, las restricciones, áreas donde no existe material b) Viga en voladizo con carga en el extremo con dominio de diseño rectangular, c) solución mediante análisis t topológico de optimización del diseño basada en una discretización de 3200 elementos y 50% Volumen del material.

Fuente: (Bendsoe & Sigmund, 2004)

Se puede definir el problema de diseño óptimo como la resolución del problema de encontrar la elección óptima del tensor de rigidez $E_{ijkl}(x)$ que en este caso es una variable, por medio de la aplicación de definiciones energéticas tal como el del trabajo virtual interno de un cuerpo elástico U y para un trabajo virtual arbitrario de un desplazamiento v ,

$$a(u, v) = \int_{\Omega} E_{ijkl}(x) \varepsilon_{ij}(u) \varepsilon_{kl}(v) d\Omega$$

Si se procede a resolver el problema de la forma anterior utilizando medios computacionales con el método de discretización por elementos finitos,

señalando que en el análisis los dos campos de interés son, el desplazamiento u y la rigidez E . Ahora minimizando la función

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}, E_e} \mathbf{f}^T \mathbf{u} \\ \text{s.t. : } \mathbf{K}(E_e) \mathbf{u} = \mathbf{f} , \\ E_e \in \mathbf{E}_{\text{ad}} . \end{aligned}$$

Se llega a obtener la rigidez admisible E_{ad} , también \mathbf{f} representa el campo de cargas y \mathbf{K} la matriz de rigidez del sólido.

Al diseñar una estructura mediante análisis topológico interesa la colocación óptima de un material isotrópico dado en el espacio, es decir, se debe determinar qué puntos del espacio deben ser puntos con materiales y que puntos deben permanecer vacíos (sin material).

El problema de diseño se formula entonces como un problema de dimensionamiento, modificando la Matriz de rigidez, de modo que ella depende en forma continua de una función que se interpreta como una densidad de material,

$$\begin{aligned} E_{ijkl}(x) = \rho(x)^p E_{ijkl}^0, \quad p > 1, \\ \int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq V; \quad 0 \leq \rho(x) \leq 1, \quad x \in \Omega, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p \geq \max \left\{ \frac{2}{1-\nu^0}, \frac{4}{1+\nu^0} \right\} \quad (\text{in 2-D}), \\ p \geq \max \left\{ 15 \frac{1-\nu^0}{7-5\nu^0}, \frac{3}{2} \frac{1-\nu^0}{1-2\nu^0} \right\} \quad (\text{in 3-D}), \end{aligned}$$

Ésta función es la variable de diseño que junto con el método de interpolación SIMP, Material isotrópico sólido con penalización, realizan el análisis topológico minimizando la función a través de minimizar la energía de deformación, considerando $p=0$ cuando no exista material y $p=1$ cuando exista material.

Luego se aplica el método de los elementos finitos para resolver las ecuaciones matriciales antes descritas, que junto a programas computacionales, tal como Inspire 9.5, permiten obtener el diseño optimizado con mínimo peso. La siguiente figura muestra en forma resumida el proceso de aplicación del método.

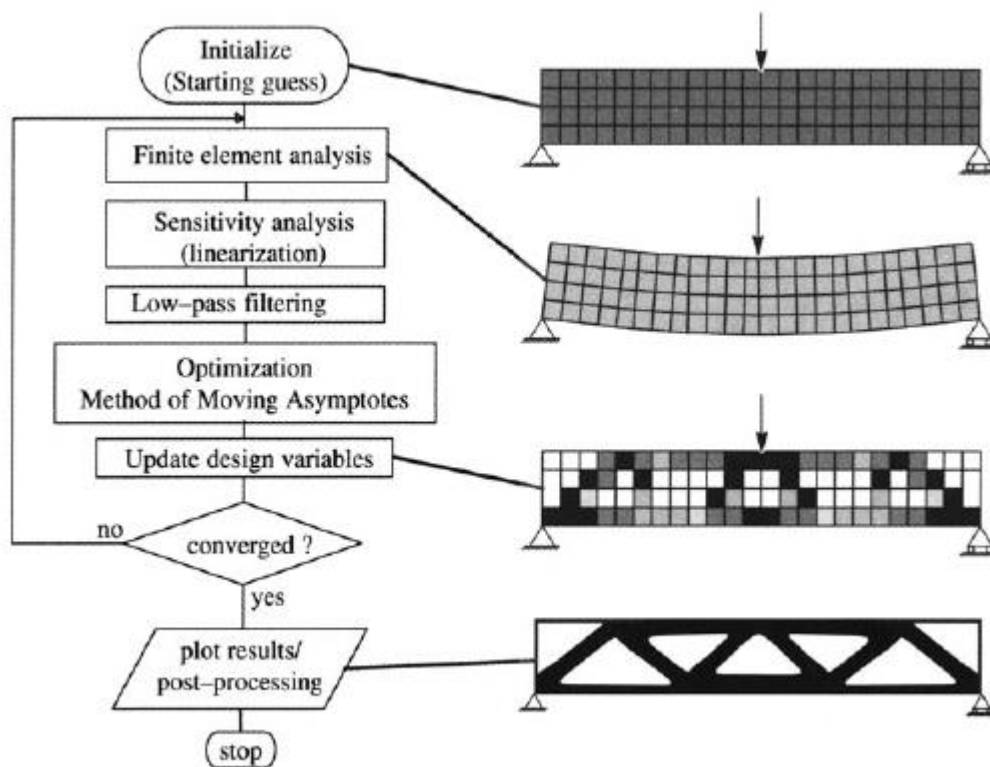


Figura 6 Diagrama de flujo del proceso de cálculo para el diseño de optimización topológica

Fuente: (Bendsoe & Sigmund, 2004)

2.2. Software Inspire 9.5

Inspire permite crear e investigar conceptos estructuralmente eficientes, rápida y fácilmente. Las simulaciones estructurales tradicionales permiten a los ingenieros comprobar si un diseño soportará las cargas requeridas. Inspire mejora este proceso, generando un nuevo diseño mediante optimización topológica, utilizando las cargas como una entrada.

Inspire trabaja con las herramientas existentes de CAD para ayudar a diseñar piezas estructurales bien desde la primera vez, reduciendo drásticamente costes, tiempo de desarrollo, consumo de material y peso del producto.

Inspire realiza un análisis en tensiones, desplazamientos y modos propios, mostrando gráficamente los resultados. Permite validar tanto la geometría optimizada, como cualquier otro modelo que se importe (Idaero, 2014).

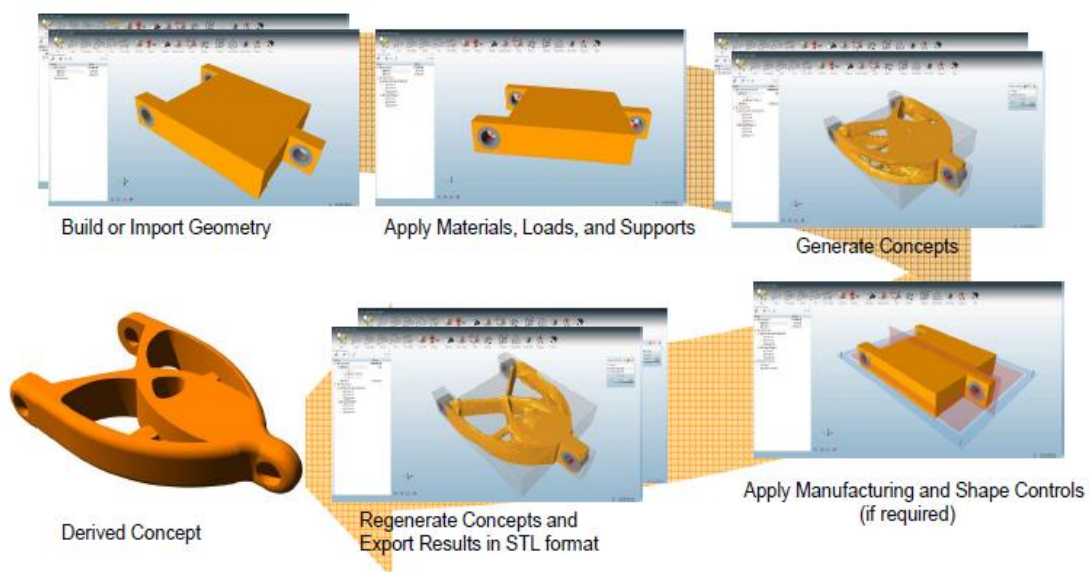


Figura 7 Interfaz del Software Inspire 9.5 para realizar la optimización topológica

Fuente: (Idaero, 2014)

2.3. Impresora 3D

Una impresora 3D es un dispositivo capaz de generar un objeto sólido tridimensional mediante la adición de material. Las impresoras 3D se basan en modelos 3D para definir qué se va a imprimir. Un modelo no es sino la representación digital de lo que se va a imprimir mediante algún software de modelado. Como por ejemplo, con una impresora 3D se puede generar cualquier objeto que se pueda imaginar, usando tan solo la cantidad estrictamente necesaria de material, y para hacerlo se debe tener la representación del objeto en un formato de modelo 3D reconocible para la impresora (3dimepresoras3d, 2016)

2.3.1. Materiales

Los materiales compatibles con la mayoría de las impresoras 3D son los termoplásticos ABS y PLA (Tecnonauta, 2016). También existen, como material para impresoras 3D, las resinas fotopoliméricas.

2.3.1.1. Termoplástico ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es un termoplástico muy duro y resistente a altas temperaturas. Es fácil pintar sobre él o pegar diferentes partes. También es llamado como plástico de ingeniería, ya que su elaboración es mucho más compleja que otros tipos de plásticos.

El ABS es el resultado de la combinación de tres monómeros: estireno, acrilonitrilo y polibutadieno. Las porciones pueden variar del 15-35% de acrilonitrilo, 5-30% de butadieno y 40-60% de estireno (QuimiNet , 2006).

- **Propiedades Cualitativas**

Tabla 1
Propiedades cualitativas del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Resistencia a la abrasión	Alta
Permeabilidad	Todos los grados son considerados impermeables al agua, pero ligeramente permeables al vapor.
Propiedades relativas a la fricción	No los degradan los aceites son recomendables para cojinetes sometidos a cargas y velocidades moderadas
Estabilidad dimensional	Es una de las características más sobresalientes, lo que permite emplearla en partes de tolerancia dimensional cerrada. La baja capacidad de absorción de la resina y su resistencia a los fluidos fríos, contribuyen a su estabilidad dimensional
Pigmentación	La mayoría de estas resinas, están disponibles en colores estándar sobre pedido, se pueden pigmentar aunque requieren equipo especial.
Facilidad de unión	Se unen fácilmente entre sí y con materiales plásticos de otros grupos mediante cementos y adhesivos
Cap. de absorción	Baja
Propiedades ambientales	La exposición prolongada al sol produce una capa delgada quebradiza, causando un cambio de color y reduciendo el brillo de la superficie y la



	resistencia a la flexión. La pigmentación en negro provee mayor resistencia a la intemperie
Resistencia química	Generalmente buena aunque depende del grado de la resina, de la concentración química, temperatura y esfuerzos sobre las partes. En general no son afectadas por el agua, sales inorgánicas, álcalis y por muchos ácidos. Son solubles en ésteres, acetona, aldehídos y en algunos hidrocarburos clorados
Formado	Se adaptan bien a las operaciones secundarias de formado. Cuando se calientan, los perfiles extruidos, se pueden doblar y estampar.
Facilidad de maquinado	Sus características son similares a las de los metales no ferrosos, se pueden barrenar, fresar, torneare, aserrar y troquelar
Acabados superficiales	Pueden ser acabados mediante metalizado al vacío y electro plateado
Resistencia a la fatiga	Se presenta para cargas cíclicas o permanentes mayores a 0.7 Kg mm ²
Recocida	Se mantiene 5° C arriba de la Temp. de distorsión durante 2 a 4 h.

Fuente: (Mariano, 2011)

- **Propiedades Cuantitativas**

Tabla 2
Propiedades cuantitativas del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Propiedades	Método ASTM	Unidad	Grados de ABS			
			Alto impacto	Impacto medio	Bajo Impacto	Resistente al calor
Mecánicas a 23°C						
Resistencia al impacto, prueba Izod	D2546	J / m	375-640	215-375	105-215	105-320
Resistencia a la tensión	D638	Kg / mm ²	3,3 - 4,2	4,2-4,9	4,2-5,3	4,2-5,3
elongación	D638	%	15-70	10-50	5-30	5-20
Módulo de tensión	D638		173-214	214-255	214-265	214-265
Dureza	D785	HRC (Rockwell)	88-90	95-105	105-110	105-110
Peso específico	D792		1,02-1,04	1,04-1,05	1,05-1,07	1,04-1,06



Térmicas						
Coefficiente de expansión térmica	D696	$X 10^5 \text{ cm} / \text{cm}^* \text{ } ^\circ\text{C}$	9,5-11,0	7,0-8,8	7,0-8,2	6,5-9,3
Distorsión por calor	D648	$^\circ\text{C a } 18,4 \text{ Kg} / \text{cm}^2$	93-99	96-102	96-104	102-112

Fuente: (Mariano, 2011)

2.3.1.2. Termoplástico PLA

El ácido poliláctico (PLA) es un termoplástico biodegradable derivado de recursos renovables como son el almidón de maíz, la caña de azúcar, la tapioca, la remolacha, el trigo, entre otros productos (Mariano, 2011).

Es un termoplástico de origen natural, cuya ventaja es la gran cantidad de colores disponibles y que permite impresiones más rápidas. Además no emite gases perjudiciales al salir del extrusor y tiene características similares a los plásticos que son derivados del petróleo (Blog de HXX, 2015)

- **Propiedades físicas y mecánicas**

Tabla 3
Propiedades físicas y mecánicas del ácido poliláctico (PLA)

Propiedades PLA		
Propiedades	Unidad	
Densidad	g/cm^3	1,25
Módulo de elasticidad	GPa	3,5
Elongación a la rotura	%	6
Módulo de flexión	GPa	4
Resistencia a la flexión	MPa	80
Temperatura de transición vítrea	$^\circ\text{C}$	60
Temperatura de deflexión del calor (a 455 kPa)	$^\circ\text{C}$	65
Comienzo de fusión	$^\circ\text{C}$	160
Módulo de corte	GPa	2,4
Capacidad calorífica	J/kg-K	1800



específica		
Relación fuerza- peso	kN-m/kg	40
Resistencia a la tracción (UTS)	MPa	50
Conductividad térmica	W/m-K	0,13

Fuente: (Make It From, 2017)

CAPITULO III

3. DISEÑO DE PROTOTIPOS

3.1. Material

Los materiales que se van a utilizar para realizar los prototipos de los elementos deben ser compatibles para impresoras 3D y que se encuentren en el mercado. Se consultó los tipos de materiales más usados para la impresión, en diferentes lugares donde se realizan impresiones 3D. Las empresas visitadas fueron S3D, ubicada en Salgolquí y MG, ubicada en Av. Los Shyris³. También se obtuvo información de la impresora 3D, Stratasys, del laboratorio de manufactura de la Universidad de las Fuerza Armadas- ESPE, Sangolquí por lo tanto, los termoplásticos escogidos para realizar los elementos poliméricos son: ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (ácido poliláctico).

Debido a que las propiedades de los termoplásticos ABS y PLA, descritos en el capítulo anterior, son valores teóricos obtenidos a través de las fuentes de información como internet, libros y papers; y debido que al momento de realizar la impresión 3D el plástico va a ser calentado para pasar por el extrusor, este cambiará sus propiedades en las piezas impresas, por lo tanto, se deberá obtener las propiedades mecánicas de los materiales tales como: módulos de elasticidad, la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión, el porcentaje de alargamiento y la densidad que tengan según la carga aplicada. También obtener un análisis dimensional entre los elementos que han sido impresos con respecto a los diseñados en el programa CAD (Computer Aided Desing). Los resultados obtenidos se utilizarán en los programas de simulación para conocer el comportamiento mecánico que van a tener cada uno de los elementos.

Para ello, se ha procedido a realizar ensayos mecánicos de flexión y de tracción en cada una de las probetas de ABS y PLA.

³ Se ha omitido los nombres completos de las empresas para evitar cualquier conflicto de índole de propiedad intelectual.

3.1.1. Propiedades Mecánicas

Para obtener las propiedades mecánicas del ABS y PLA que se utilizaron en el software Inspire 9.5 para la Optimización Topológica y los Simuladores CAD, se procedió a seleccionar los lugares donde se realicen las impresiones 3D; para lo cual se analizaron las empresas S3D y MG; y el área de prototipado del laboratorio de Procesos de Manufactura de la ESPE. El área de Prototipado de la ESPE no fue considerado debido a que la impresora 3D, Stratasys, tenía una gran demanda por medio de estudiantes y profesores, y esto generaba una baja disponibilidad del tiempo de uso de la misma, escasez de material y al momento de hacer una prueba preliminar la impresora estaba en mantenimiento por lo que esto iba a generar un retraso en el proyecto de titulación, el cual tiene una durabilidad de seis meses.

Para la selección entre las empresas S3D y MG se decidió realizar dos ensayos, de tracción y de flexión sobre el material PLA, cuyos análisis fueron los siguientes:

3.1.1.1. Ensayo de Tracción en Material PLA

Para la realización de los ensayos de tracción se utilizó la norma ASTM D 638.

- **Probeta para Tracción**

Según la norma ASTM D 638, la probeta de tracción es de Tipo III, la cual tiene un espesor de 7 mm hasta 14 mm.

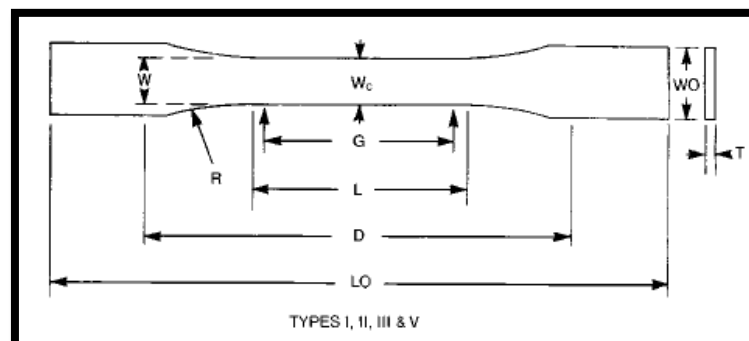


Figura 8 Medidas de probeta de tracción

Fuente: (ASTM, 2003)

Las medidas de la Probeta Tipo III, según la norma utilizada, son:

Tabla 4
Dimensiones Probeta Tracción

Dimensiones	Dimensiones de espesor, mm, [in.]
	Espesor entre 7 y 14 [0.28 y 0.55]
TIPO III	
W- Ancho de la sección estrecha	19 [0.75]
L-Longitud de la sección estrecha	57 [2.25]
WO- Ancho total	29 [1.13]
LO- Longitud total	246 [9.7]
G- Longitud calibrada	50 [2.00]
D- Distancia entre marcas	115 [4.5]
R- Radio del filete	76 [3.00]

Fuente: (ASTM, 2003)

La probeta de tracción fue diseñada en un programa CAD como se muestra en la figura 9.

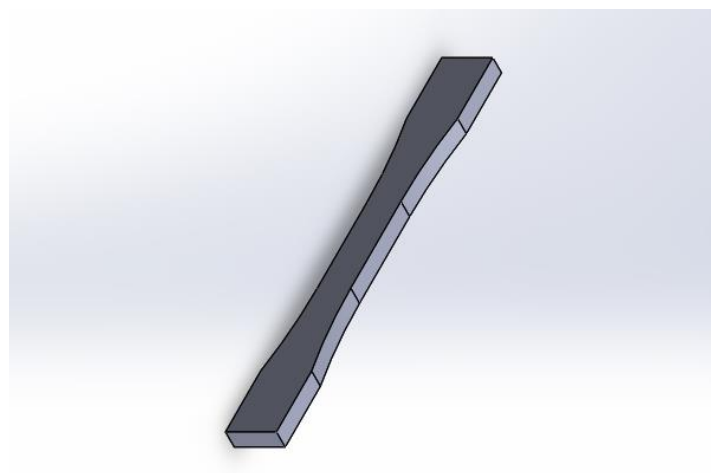


Figura 9 Probeta de Tracción

- **PROBETA 1 (Empresa S3D)**

Tabla 5
Dimensiones Probeta 1 de Tracción, Material PLA

Dimensiones Probeta Tracción	
Ancho (a)	18.65 [mm]
Espesor (e)	9.93 [mm]
Lo (Longitud Inicial)	50 [mm]
Lf (Longitud Final)	51 [mm]
Peso (P)	42.57 [g]

En la figura 10 se observa la probeta utilizada para el ensayo de tracción y en la figura 11 se observa la máquina de ensayos universales Amsler capacidad 10 t, donde se realizó el ensayo.



Figura 10 Probeta 1 a tracción impresa, Material PLA



Figura 11 Ensayo de tracción, Material PLA

Luego del ensayo, la rotura de la probeta se observa en la siguiente figura 12



Figura 12 Probeta 1 Ensayada, Material PLA

$$F = F \text{ [kg]} - \text{Peso Cabezal [kg]}$$

$$F = 422 \text{ [Kg]} - 135 \text{ [Kg]}$$

$$F = 287 \text{ [kg]} \times 9.8 \text{ [N]}$$

$$F = 2815.47 \text{ [N]}$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = a \times e$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = 18.65 \times 9.93$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = 185.19 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_u = \frac{F}{A} = \frac{2815.47 \text{ [N]}}{185.19 \text{ [mm}^2\text{]}}$$

$$\sigma = 15.20 \text{ MPa}$$

$$\Delta\% \text{ (Alargamiento Porcentual)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

$$\Delta\% = \frac{51 - 50}{50} \times 100$$

$$\Delta\% = 2$$

- **PROBETA 2 (Empresa S3D)**

Tabla 6

Dimensiones Probeta 2 de Tracción, Material PLA

Dimensiones Probeta Tracción	
Ancho (a)	19.20 [mm]
Espesor (e)	10 [mm]
Lo (Longitud Inicial)	50 [mm]
Lf (Longitud Final)	50.15 [mm]
Peso (P)	67.90 [g]



Figura 13 Probeta 2 ensayada, Material PLA

$$F = F \text{ [kg]} - \text{Peso Cabezal [kg]}$$

$$F = 1032 \text{ [Kg]} - 135 \text{ [Kg]}$$

$$F = 897 \text{ [kg]} \times 9.8 \text{ [N]}$$

$$F = 8790.6 \text{ [N]}$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = a \times e$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = 19.20 \times 10$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = 192 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_u = \frac{F}{A} = \frac{8790.6 \text{ [N]}}{192 \text{ [mm}^2\text{]}}$$

$$\sigma = 45.78 \text{ MPa}$$

$$\Delta\% \text{ (Alargamiento Porcentual)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

$$\Delta\% = \frac{50.15 - 50}{50} \times 100$$

$$\Delta\% = 0.3$$

- **PROBETA 3 (Empresa MG)**

Tabla
Dimensiones probeta 3 de tracción, Material PLA

7

Dimensiones Probeta Tracción	
Ancho (a)	19.79 [mm]
Espesor (e)	10.50 [mm]
Lo (Longitud Inicial)	50 [mm]
Lf (Longitud Final)	50.30 [mm]
Peso (P)	75.03 [g]



Figura 14 Probeta 3 ensayada, Material PLA

$$F = 1096 \text{ [Kg]}$$

$$F = 1096 \text{ [kg]} \times 9.8 \text{ [N]}$$

$$F = 10740.8 \text{ [N]}$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = a \times e$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = 19.79 \times 10.50$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = 207.795 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_u = \frac{F}{A} = \frac{10740.8 \text{ [N]}}{207.795 \text{ [mm}^2\text{]}}$$

$$\sigma = 51.69 \text{ MPa}$$

$$\Delta\% \text{ (Alargamiento Porcentual)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

$$\Delta\% = \frac{50.30 - 50}{50} \times 100$$

$$\Delta\% = 0.6$$

Tabla 8

Comparación de resultados de tracción en las diferentes empresas, Empresa S3D y MG

Ensayo de Tracción, Material PLA			
	S3D		MG
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
σ_u [Mpa]	15,2	45,78	51,69
Δ [%]	2	0,3	0,6

En el siguiente análisis cabe mencionar que la probeta 1 con respecto a la probeta 2 fue impresa una semana antes, y de la tabla 8 se observa que existe una gran diferencia entre los valores del esfuerzo último (σ_u) y

alargamiento porcentual ($\Delta\%$) entre las dos probetas. Además, haciendo consultas en las dos empresas sobre la impresión de los elementos optimizados topológicamente, la empresa S3D manifestó que solo podría trabajar con material PLA y no con ABS, y que no era posible realizar todas las geometrías de los elementos; mientras tanto, la empresa MG si podría trabajar con los dos materiales y con la realización de todas las geometrías obtenidas, por lo que desde el punto de vista del ensayo de tracción y considerando la información dada por cada empresa, se procedió a realizar el resto de las piezas con la empresa MG.

También se puede observar en la tabla 8 que los valores bajos de alargamiento porcentual de los ensayos realizados que se hallan entre 0.3-2 % y la conservación de la forma rectangular de la sección en la rotura, demuestran que los materiales obtenidos se los podría clasificar como frágiles.

3.1.1.2. Ensayo de Flexión en Material PLA

Los ensayos se basaron en la disponibilidad de la máquina con la que cuenta el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE.

- **Probeta a flexión**

Las medidas de la probeta de flexión se encuentran dadas en la figura 15, las cuales están basadas en las especificaciones de la máquina para realizar los respectivos ensayos.

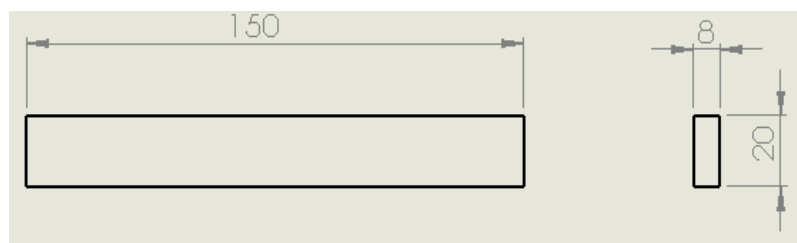


Figura 15 Medidas probeta flexión

La probeta de flexión, como la de tracción, fue diseñada en un programa CAD la cual se muestra en la figura 16.

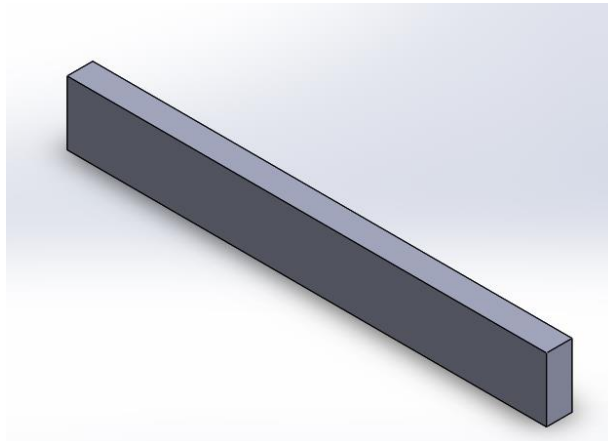


Figura 16 Probeta de flexión

- **Cálculo del Módulo de Elasticidad (E)**

Para la obtención del Módulo de Elasticidad (E) se ha realizado dos métodos: a) Línea de tendencia por ajuste de curva de los comandos de Excel y b) A través del uso de pequeños intervalos de fuerza y deflexión.

a) Línea de tendencia por ajuste de curva de los comandos de Excel

Para calcular el Módulo de Elasticidad (E) por este método, se identificó la zona donde el material va a tener un comportamiento lineal, se tomó los valores de fuerza y deflexión y se procedió a realizar su respectivo gráfico. Por medio de la aplicación de Excel, “formato de línea de tendencia”, se tomó línea de tendencia “lineal” y se consiguió la ecuación de la recta.

La pendiente de la ecuación lineal obtenida en el programa Excel representa la variación de fuerza con respecto a la deflexión $\left(\frac{\Delta F}{\Delta d}\right)$, Ley de Hooke, y este valor se reemplazó en la ecuación (3.1), que representa la ecuación del Módulo de Elasticidad (E) que se la obtiene en base de la deflexión en el rango elástico para el caso de una viga simplemente apoyada con una fuerza concentrada en la mitad de la misma.

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{48 \times \Delta d \times I} \quad (3.1)$$

Donde:

ΔF = Variación Fuerza [N]

L = Longitud [mm]

Δd = Variación Deflexión [mm]

I = Inercia [mm⁴]

b) A través del uso de pequeños intervalos de fuerza y deflexión.

El uso de este método para obtener el Módulo de Elasticidad (E) consistió, como en el método anterior, en identificar la zona del comportamiento lineal y tomar los valores de fuerza y deflexión consecutivas a cada dos puntos. Se aplicó la ecuación (3.1) en la cual van a ir variando los valores de fuerza y deflexión.

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{48 \times \Delta d \times I} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{(F2 - F1) \times L^3}{48 \times (d2 - d1) \times I} \quad (3.2)$$

Al momento de aplicar la ecuación (3.2) en todos los valores que se encuentren dentro de la zona del comportamiento lineal, se obtuvo el promedio de los valores de módulos de Elasticidad (E) generados y ese valor se tomó para la simulación en los programas respectivos.

Por tanto al aplicar los métodos anteriormente descritos, se tiene los siguientes resultados mostrados a continuación.

Todas las tablas obtenidas en los ensayos de flexión para la obtención del módulo de elasticidad de cada material se encuentran en el Anexo 1.

- **PROBETA 1 (Empresa S3D)**

Tabla 9
Dimensiones probeta 1 de flexión, Material PLA

Dimensiones Probeta Flexión	
Ancho (a)	19.70 [mm]
Espesor (e)	7.84 [mm]
L (Longitud)	149.30 [mm]
Peso (P)	20.89 [gr]
Longitud entre apoyos (d)	145 [mm]
Inercia [I]	4994.98 [mm ⁴]

En la figura 17 se observa la probeta utilizada para el ensayo de flexión y en la figura 18 se observa la máquina donde se realizó el ensayo.



Figura 17 Probeta 1 de flexión, Material PLA



Figura 18 Ensayo de flexión, Material PLA

Una vez que se realizó el ensayo de flexión, se observa en la figura 19 la rotura que tuvo la probeta.



Figura 19 Probeta 1 de flexión ensayada, Material PLA

Módulo de Elasticidad (E)

a) Método: Línea de tendencia por ajuste de curva de los comandos de Excel

En la figura 20 que se muestra a continuación se puede observar el comportamiento lineal que va a tener la probeta y su respectiva ecuación, según los valores obtenidos en los ensayos.

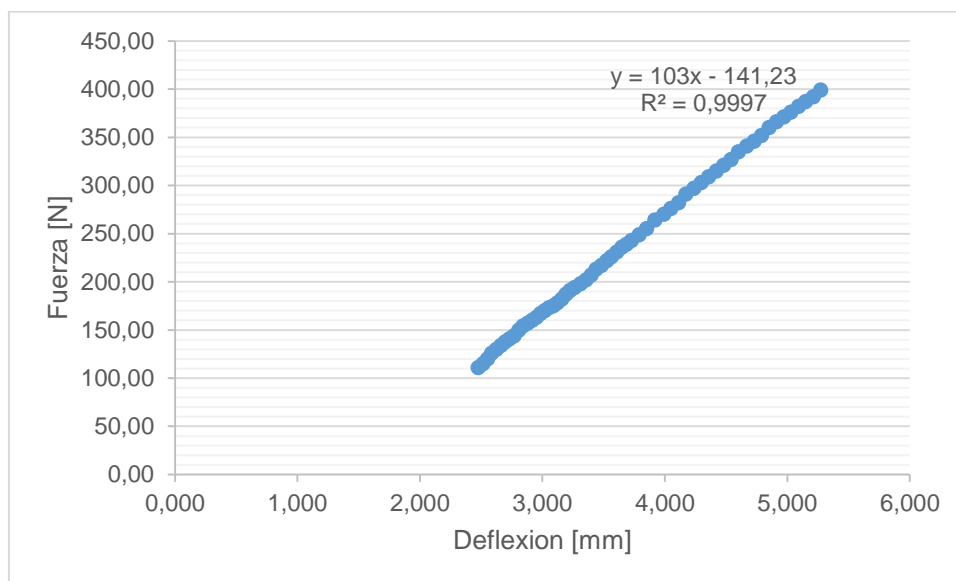


Figura 20 Diagrama Fuerza [N] - Deflexión [mm] del comportamiento lineal de la probeta 1 sometido al ensayo de flexión, Material PLA

$$F = 103 d - 141.23$$

$$\frac{\Delta F}{\Delta d} = 103$$

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{48 \times \Delta d \times I} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{103 \times 145^3}{48 \times 4994.98}$$

$$E = 1309.68 \text{ [MPa]}$$

b) Método: A través del uso de pequeños intervalos de fuerza y deflexión

El resultado calculado del promedio de los Módulos de Elasticidad (E) para la probeta 1 de PLA es de 1320.1 [MPa].

El promedio del módulo de elasticidad (E) para la probeta 1 entre los dos métodos es de 1314.89 [MPa].

- **PROBETA 2 (Empresa S3D)**

Tabla 10
Dimensiones probeta 2 de flexión, Material PLA

Dimensiones Probeta Flexión	
Ancho (a)	20.10 [mm]
Espesor (e)	8.20 [mm]
L (Longitud)	151.60 [mm]
Peso (P)	28.74 [gr]
Longitud entre apoyos (d)	145 [mm]
Inercia [mm ⁴]	5549.08 [MPa]



Figura 21 Probeta 2 de flexión ensayada, Material PLA

Módulo de Elasticidad (E)

a) Método: Línea de tendencia por ajuste de curva de los comandos de Excel

En la figura 22 que se muestra a continuación se puede observar el comportamiento lineal que va a tener la probeta 2 con material PLA según los valores generados en los ensayos de flexión y su respectiva ecuación.

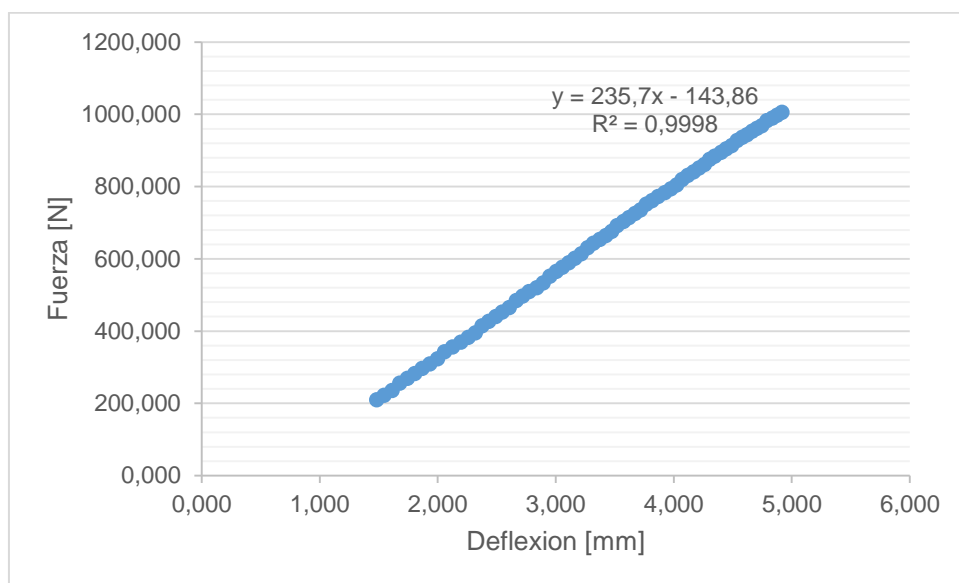


Figura 22 Diagrama Fuerza [N] - Deflexión [mm] del comportamiento lineal de la Probeta 2 sometido al Ensayo de Flexión, Material PLA

$$F = 235.7 d - 143.86$$

$$\frac{\Delta F}{\Delta d} = 235.7$$

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{48 \times \Delta d \times I} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{235.7 \times 145^3}{48 \times 5549.08}$$

$$E = 2697.74 \text{ [MPa]}$$

b) Método: A través del uso de pequeños intervalos de fuerza y deflexión.

El resultado calculado del promedio de los Módulos de Elasticidad (E) para la probeta 2 de PLA es de 2661.4 [MPa].

El promedio del módulo de elasticidad (E) para la probeta 2 entre los dos métodos es de 2679.57 [MPa].

- **PROBETA 3 (Empresa MG)**

Tabla 11
Dimensiones probeta 3 de flexión, Material PLA

Dimensiones Probeta Flexión	
Ancho (a)	20.29 [mm]
Espesor (e)	8.23 [mm]
L (Longitud)	150.80 [mm]
Peso (P)	30.45 [gr]
Longitud entre apoyos (d)	145 [mm]
Inercia [mm⁴]	5728.81 [MPa]



Figura 23 Probeta 3 de Flexión Ensayada, Material PLA

Módulo de Elasticidad (E)

a) Método: Línea de tendencia por ajuste de curva de los comandos de Excel

En la figura 24 que se muestra a continuación se puede observar el comportamiento lineal que va a tener la probeta según los datos obtenidos del ensayo de flexión y su respectiva ecuación.

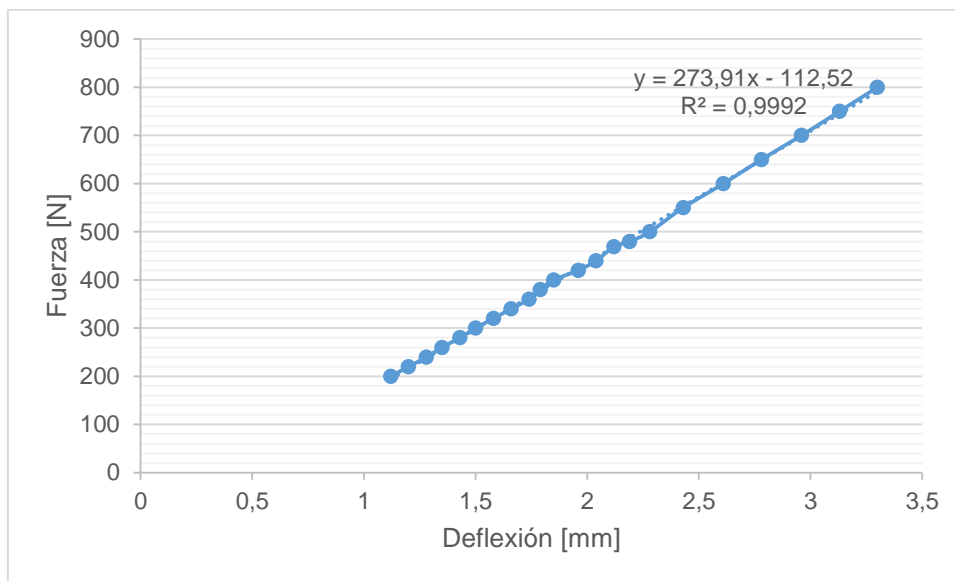


Figura 24 Diagrama Fuerza [N] - Deflexión [mm] del comportamiento lineal de la Probeta 3 sometido al Ensayo de Flexión, Material PLA

$$F = 273.91 d - 112.52$$

$$\frac{\Delta F}{\Delta d} = 273.91$$

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{48 \times \Delta d \times I} \quad (1)$$

$$E = \frac{273.91 \times 145^3}{48 \times 5728.81}$$

$$E = 3036.73 \text{ [MPa]}$$

b) Método: A través del uso de pequeños intervalos de fuerza y deflexión.

El resultado calculado del promedio de los Módulos de Elasticidad (E) para la probeta 3 de PLA es de 3157.2 [MPa].

El promedio del módulo de elasticidad (E) para la probeta 3 entre los dos métodos es de 3096.97 [MPa].

- **Esfuerzo Último y Esfuerzo en el Límite de Proporcionalidad a la flexión.**

Para calcular el esfuerzo a la flexión de cada uno de los valores obtenidos por medio del ensayo, se aplicó la fórmula del esfuerzo flector que se muestra en la ecuación 3.

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} \quad (3.3)$$

Donde:

σ = Esfuerzo flector [MPa]

M= Momento flector [N mm]

y= Distancia desde la línea neutra hasta la fibra más alejada [mm]

I= Inercia [mm⁴]

El momento flector se calculó por medio de la ecuación 4 propuesta a continuación.

$$M = \frac{F \times L}{4} \quad (4)$$

Donde:

F= Fuerza [N]

L= Longitud entre apoyos [mm]

- **PROBETA 1 (Empresa S3D)**

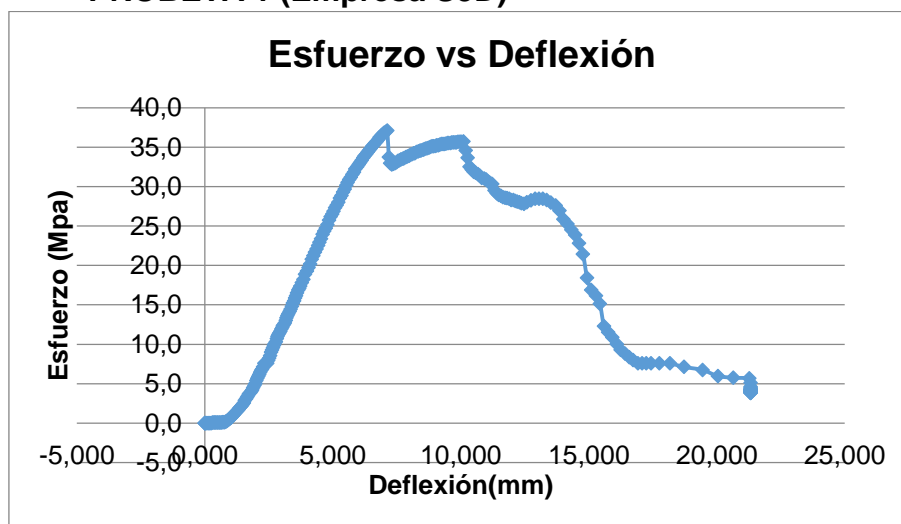


Figura 25 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Probeta1 S3D, PLA

El esfuerzo último (σ_u) que tiene la probeta 1 (Empresa S3D) es 37,1 [MPa] y el esfuerzo en el límite de proporcionalidad (σ_p) es 28,5 [MPa].

- **PROBETA 2 (Empresa S3D)**

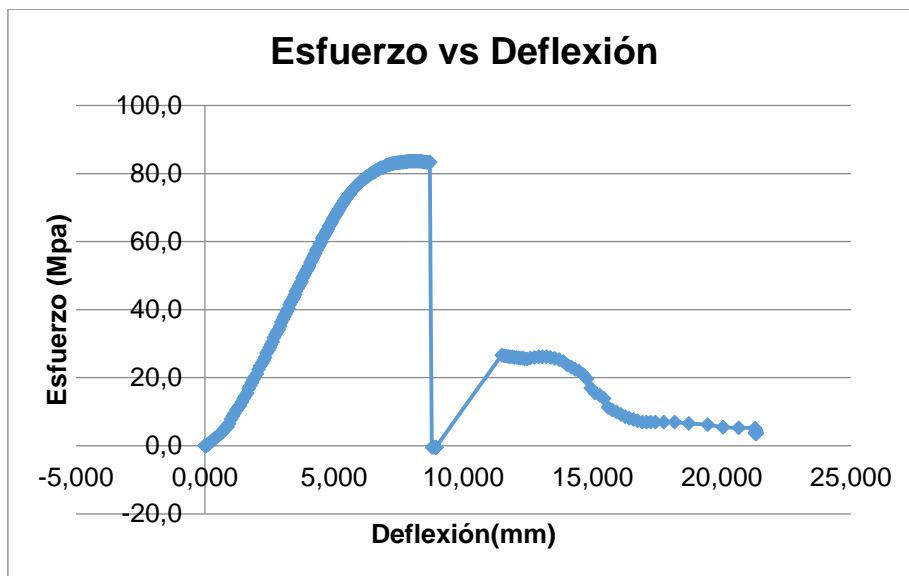


Figura 26 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Probeta 2 S3D, PLA

El esfuerzo último (σ_u) que tiene la probeta 2 (Empresa S3D) es 83.6 [MPa] y el esfuerzo en el límite de proporcionalidad (σ_p) es 66 [MPa].

- **PROBETA 3 (Empresa MG)**

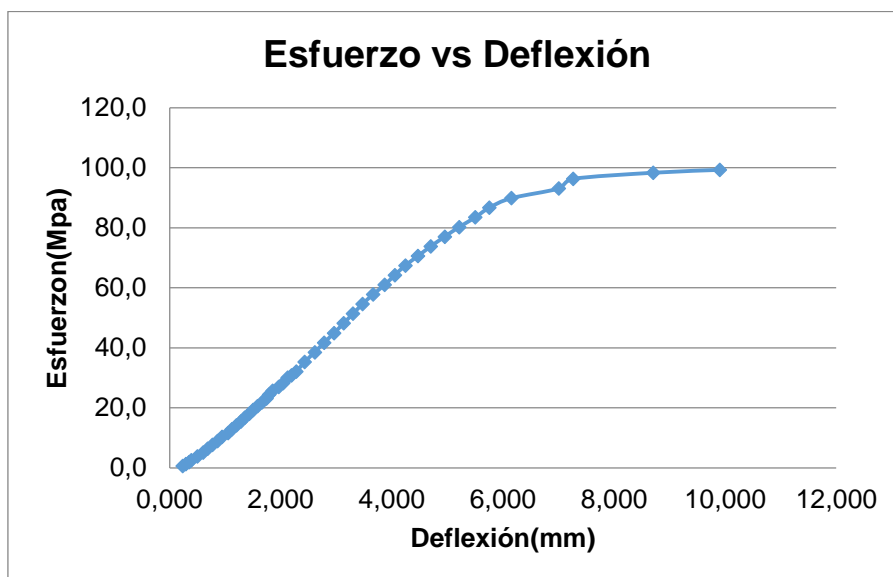


Figura 27 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Probeta 3 MG, PLA

El esfuerzo último (σ_u) que tiene la probeta 3 es 99.3 [MPa] y el esfuerzo en el límite de proporcionalidad (σ_p) es 51.4 [MPa].

Tabla 12
Comparación de resultados de flexión en las diferentes empresas, Empresa S3D y MG

Ensayo de Flexión, Material PLA			
	S3D		MG
	Probeta	Probeta	Probeta
	1	2	3
E [Mpa]	1314,89	2679,57	3096,97
σ_p [Mpa]	28,5	66	51,4
σ_u [Mpa]	37,1	83,6	99,3

En el siguiente análisis cabe mencionar que la probeta 1 con respecto a la probeta 2 fue impresa una semana antes, y de la tabla 12 se observa que existe una gran diferencia entre los valores del módulo de elasticidad (E), esfuerzo en el límite de proporcionalidad (σ_p) y esfuerzo último (σ_u) entre las dos probetas. Además, haciendo consultas en las dos empresas sobre la impresión de los elementos optimizados topológicamente, la empresa S3D manifestó que solo podría trabajar con material PLA y no con ABS, y que no era posible realizar todas las geometrías de los elementos; mientras tanto, la empresa MG si podría trabajar con los dos materiales y con la realización de todas las geometrías obtenidas, por lo que desde el punto de vista del ensayo de flexión y considerando la información dada por cada empresa, se procedió a realizar el resto de las piezas con la empresa MG.

Como resultados adicionales del ensayo de flexión de la viga al 100% impresa con material PLA en la empresa MG, se obtuvo un módulo de elasticidad que se utilizó para la comparación del módulo escogido con anterioridad, el cual tiene el siguiente diagrama de fuerza vs deflexión que se muestra en la figura 28.

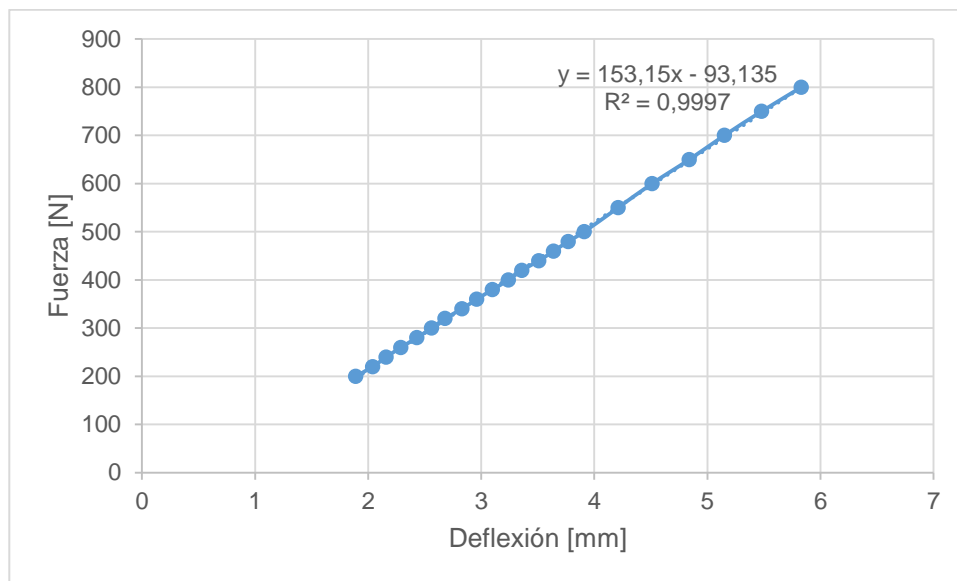


Figura 28 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Viga 100% de masa MG, PLA

$$F = 153.15 d - 93.135$$

$$\frac{\Delta F}{\Delta d} = 153.15$$

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{48 \times \Delta d \times I} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{153.15 \times 193.34^3}{48 \times 7582.45}$$

$$E = 3041.10 [MPa]$$

Tabla 13 Comparación Módulo de Elasticidad, Empresa MG, Material PLA

Comparación Módulo de Elasticidad, Empresa MG			
	Probeta 3	Viga 100%	Error Porcentual [%]
E [Mpa]	3096,97	3041,1	1,84

En la tabla 13 se observa que los valores entre los dos elementos tiene un error porcentual entre ellas de 1.84%, por lo tanto el módulo de elasticidad de las probeta 3 escogido es correcto.

Continuando con las propiedades mecánicas, se realizaron los ensayos de tracción y flexión sobre ABS y el cálculo de la densidad en los materiales ABS y PLA de las probetas fabricadas en la empresa MG.

3.1.1.3. Ensayo de Tracción en Material ABS

Tabla 14
Dimensiones Probeta de Tracción, Material ABS

Dimensiones Probeta Tracción	
Ancho (a)	19.31 [mm]
Espesor (e)	10.36 [mm]
Lo (Longitud Inicial)	50 [mm]
Lf (Longitud Final)	50.66 [mm]
Peso (P)	60.43 [g]



Figura 29 Probeta de Tracción Ensayada, Material ABS

$$F = 640 \text{ [Kg]}$$

$$F = 640 \text{ [kg]} \times 9.8 \text{ [N]}$$

$$F = 6272 \text{ [N]} \text{ (Máx)}$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = a \times e$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = 19.31 \times 10.36$$

$$A \text{ (Área Sección Transversal)} = 200.05 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{6272 \text{ [N]}}{200.05 \text{ [mm}^2\text{]}}$$

$$\sigma = 31.35 \text{ MPa}$$

$$\Delta\% \text{ (Alargamiento Porcentual)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

$$\Delta\% = \frac{50.66 - 50}{50} \times 100$$

$$\Delta\% = 1.32$$

3.1.1.4. Ensayo de Flexión en Material ABS

Tabla 15
Dimensiones Probeta de Flexión, Material ABS

Dimensiones Probeta Flexión	
Ancho (a)	20.35 [mm]
Espesor (e)	8.18 [mm]
L (Longitud)	150.18 [mm]
Peso (P)	24.13 [g]
Longitud entre apoyos (d)	145 [mm]
Inercia (I)	5744.67 [mm ⁴]



Figura 30 Probeta de Flexión Ensayada, Material ABS

Módulo de Elasticidad (E)

a) Método: Línea de tendencia por ajuste de curva de los comandos de Excel

En la figura 31, que se muestra a continuación, se observa el comportamiento lineal y su respectiva ecuación que va a tener la probeta según los datos obtenidos en los ensayos de flexión.

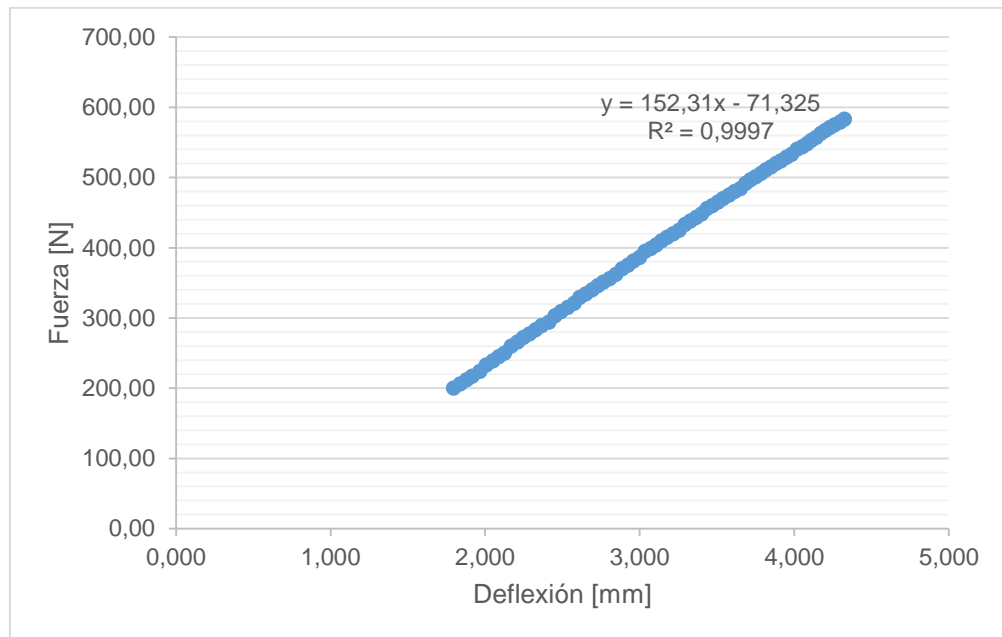


Figura 31 Diagrama Fuerza [N] - Deflexión [mm] del comportamiento lineal de la Probeta sometido al Ensayo de Flexión, Material ABS

$$F = 152.31 d - 71.325$$

$$\frac{\Delta F}{\Delta d} = 152.31$$

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{48 \times \Delta d \times I} \quad (3.1)$$

ΔF = Fuerza [N]

L =Longitud [mm]

Δd = Desplazamiento [mm]

I = Inercia [mm⁴]

$$E = \frac{152.31 \times 145^3}{48 \times 5794.67}$$

$$E = 1683.94 [MPa]$$

b) Método: A través del uso de pequeños intervalos de fuerza y deflexión.

El resultado calculado del promedio de los Módulos de Elasticidad (E) para la probeta ABS es de 1663.9 [MPa].

El promedio del módulo de elasticidad (E) entre los dos métodos es de 1673.92 [MPa].

Como resultados adicionales del ensayo de flexión de la viga al 100% impresa con material ABS en la empresa MG, se obtuvo un módulo de elasticidad que el utilizó para la comparación del módulo escogido con anterioridad, el cual tiene el siguiente diagrama de fuerza vs deflexión que se muestra en la figura 32.

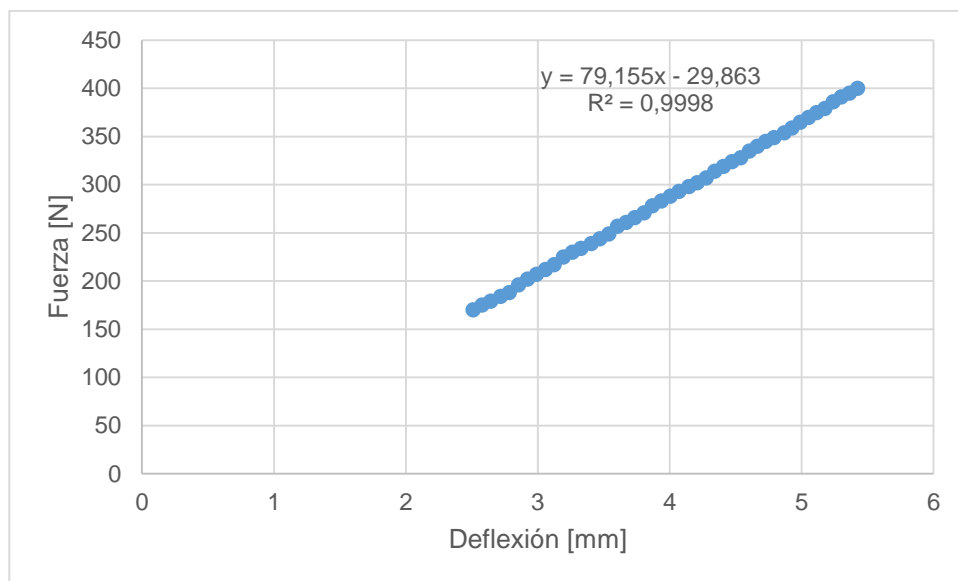


Figura 32 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Viga 100% de masa MG, ABS

$$F = 79.15 d - 29.824$$

$$\frac{\Delta F}{\Delta d} = 79.15$$

$$E = \frac{\Delta F \times L^3}{48 \times \Delta d \times I} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{79.15 \times 193.4^3}{48 \times 7582.45}$$

$$E = 1573.14 [MPa]$$

Tabla 16
Comparación Módulo de Elasticidad, Empresa MG, Material ABS

Comparación Módulo de Elasticidad, Empresa MG			
	Probeta 3	Viga 100%	Error Porcentual [%]
E [Mpa]	1673,92	1573,14	6,41

En la tabla 16 se observa que los valores entre los dos elementos tiene un error porcentual entre ellas de 6.41%, por lo tanto el módulo de elasticidad de las probeta de flexión escogido es correcto.

Esfuerzo último (σ_u) y Esfuerzo en el Límite de Proporcionalidad (σ_p)

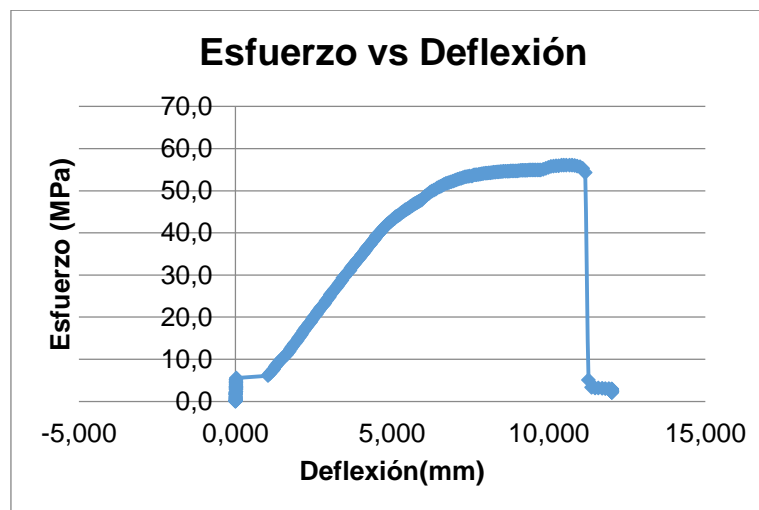


Figura 33 Diagrama Esfuerzo [MPa] vs Deflexión [mm], Material ABS

De donde se observa que El esfuerzo último (σ_u) es 56.1 [MPa] y el esfuerzo en el límite de proporcionalidad (σ_p) es 37.4 [MPa].

3.1.1.5. Densidad en el Material ABS y PLA

El cálculo de la densidad es un parámetro necesario para agregar el material de los elementos al momento de realizar la optimización topológica en el software Inspire 9.5.

La densidad se va a calcular por medio de la fórmula que se da a continuación:

$$\text{Densidad (D)} = \frac{\text{peso [g]}}{\text{Volumen [mm}^3\text{]}}$$

- **Densidad del Material ABS**

$$\text{DensidadTracción} = \frac{60.43 \text{ [g]}}{58361.12 \text{ [mm}^3\text{]}} = 1.03544 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \right]$$

$$\text{DensidadFlexión} = \frac{24.13 \text{ [g]}}{24999.41 \text{ [mm}^3\text{]}} = 9.6522 \times 10^{-4} \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \right]$$

$$\text{DensidadTotalABS} = \frac{1.03544 \times 10^{-3} + 9.6522 \times 10^{-4}}{2} \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \right]$$

$$\text{DensidadTotalABS} = 1.0003 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \right] = 1.0003 \times 10^{-9} \left[\frac{\text{ton}}{\text{mm}^3} \right]$$

- **Densidad del Material PLA**

$$\text{DensidadFlexión} = \frac{30.45 \text{ [g]}}{25181.59 \text{ [mm}^3\text{]}} = 1.2092 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \right]$$

$$\text{DensidadTracción} = \frac{75.03 \text{ [g]}}{58361.12 \text{ [mm}^3\text{]}} = 1.2856 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \right]$$

$$\text{DensidadTotalPLA} = \frac{1.2092 \times 10^{-3} + 1.2856 \times 10^{-3}}{2} \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \right]$$

$$\text{DensidadTotalPLA} = 1.2474 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \right] = 1.2474 \times 10^{-9} \left[\frac{\text{ton}}{\text{mm}^3} \right]$$

Con el cálculo de la media aritmética se obtiene los siguientes valores de la densidad que se los utiliza en el software de optimización topológica es de $1.0003 \times 10^{-9} \left[\frac{\text{t}}{\text{mm}^3} \right]$ para el material ABS y de $1.2474 \times 10^{-9} \left[\frac{\text{ton}}{\text{mm}^3} \right]$ para el material PLA. Se utiliza las unidades de $\left[\frac{\text{ton}}{\text{mm}^3} \right]$ debido al software Inspire 9.5.

3.2. Geometría

La geometría de los elementos que van a ser impresos va a depender básicamente de la disponibilidad del tamaño de impresión de la impresora 3D y de las máquinas para hacer los diferentes ensayos como son tracción, flexión, torsión y flexo torsión.

3.2.1. Viga rectangular a flexión

La viga está simplemente apoyada, por lo que la carga se aplicó en el centro de la misma. En un extremo tiene un apoyo tipo articulado y en el otro extremo tiene un apoyo tipo rodillo.

Las dimensiones de la viga se muestran en la figura 34:

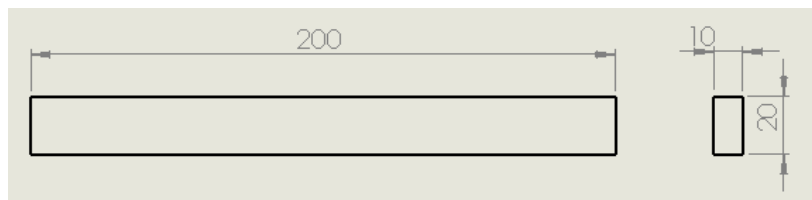


Figura 34 Medidas de la viga rectangular

Los 200 mm de longitud de la probeta, se deben a que el accesorio para ensayos sobre vigas de la máquina de ensayos universales MTS capacidad 5 KN, tiene esa longitud entre apoyos. Para evitar que en la flexión influya el efecto del esfuerzo cortante las dimensiones de la sección transversal se consideraron de 10 mm x 20 mm, donde la relación de la altura a la longitud entre fuerzas cortantes (0.2) es mayor a 0.1, que según la teoría es suficiente para evitar el efecto del cortante. Para que exista una mejor aplicación de las cargas y los tipos de apoyos, se colocó un bloque en cada extremo y en el lugar donde se aplicará la carga. Las medidas del bloque se muestran en la figura 35.

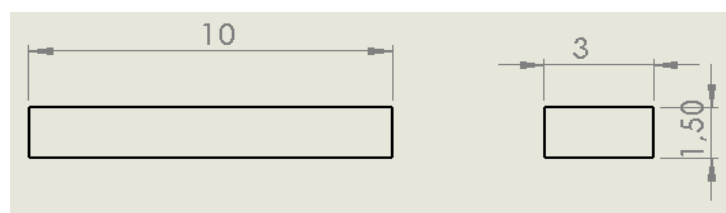


Figura 35 Medidas del Bloque

La geometría final de la viga para poder ser impresa en los materiales ABS y PLA, será como se muestra en la figura 36:

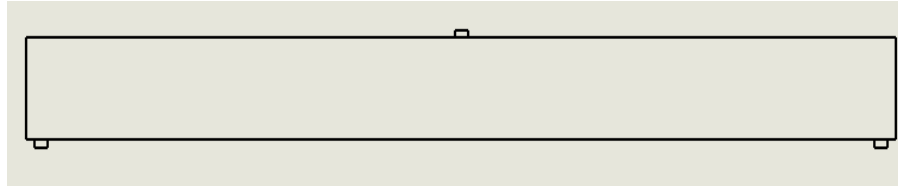


Figura 36 Diseño Final Viga

3.2.2. Cilindro a torsión

El cilindro va a estar sometido a torsión por medio de una llave de ajuste de ruedas de vehículos, que estará sujeta a un extremo de la pieza y el otro extremo estará sujeto al medidor de torque.

Por el diámetro de la llave y la sujeción al extremo del medidor de Torque del laboratorio de Mecánica de Materiales, para que se pueda realizar el respectivo ensayo en la pieza, ésta debe tener un diámetro de 19 [mm] como se muestra en la figura 37. A un extremo de la pieza tendrá un dado rectangular, figura 38, y en el otro extremo un dado hexagonal, figura 39, para la colocación de la llave.

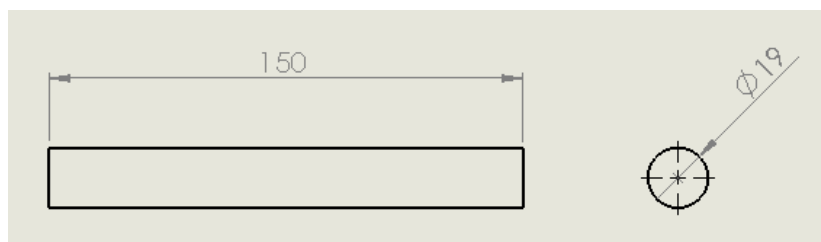


Figura 37 Dimensiones del Cilindro

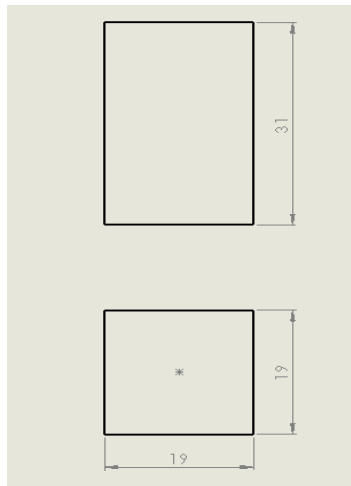


Figura 38 Medidas del Dado Cuadrado

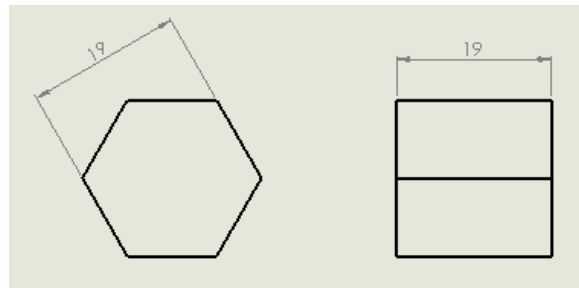


Figura 39 Medidas del Dado Hexagonal

El diseño de la pieza final se va a encontrar representado en la figura 40.

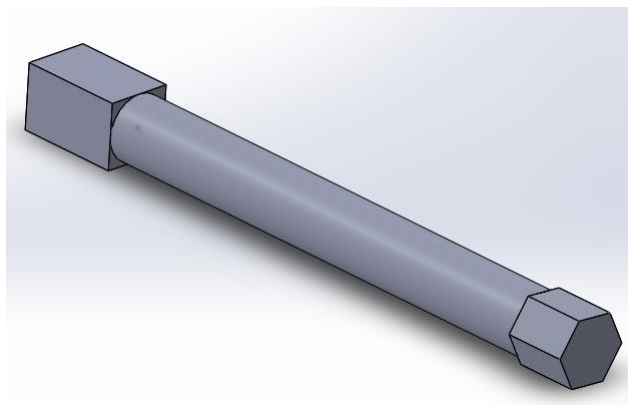


Figura 40 Diseño Final del Cilindro sometido a Torsión

3.2.3. Prisma cuadrado a Flexo Torsión

En pruebas preliminares del análisis de optimización topológica se utilizó una geometría en forma de “L”, como se muestra en la figura 41.

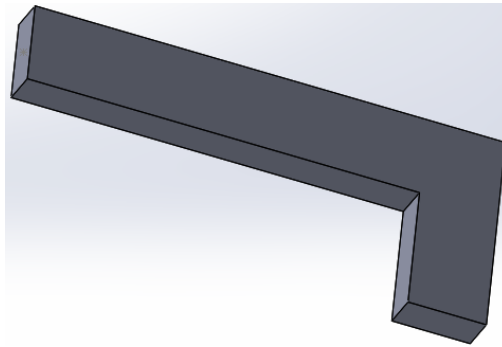


Figura 41 Geometría en “L” para flexo torsión

Sin embargo, como se observó que en la geometría optimizada existía mucha disminución de masa en el extremo donde se aplicó la carga y esto generaba falla en el mismo extremo, se optó por realizar una viga cuadrada con un dado en un extremo para poder ser sujeta por la entenalla, y así, realizar el ensayo respectivo.

También se consideró las dimensiones de 30x30x120 [mm] debido a que la relación entre la altura y la longitud de separación entre cargas es de 0.25, mayor a 0.1, en la cual predomina la flexión respecto al cortante.

Las medidas de la pieza que se utilizaron para flexo torsión se encuentran en la figura 42 y las medidas del dado donde la pieza se sujetó se encuentran dadas en la figura 43.

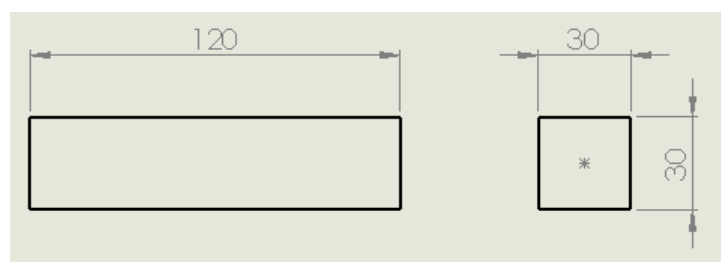


Figura 42 Medidas de la pieza para flexo torsión

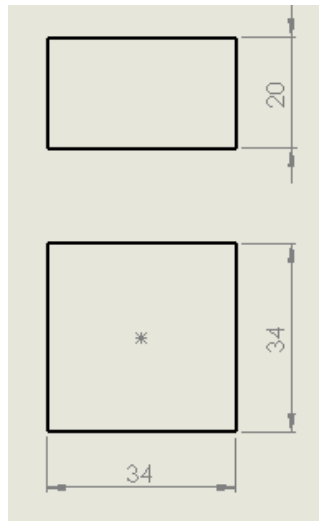


Figura 43 Medidas de dado para sujetar la pieza

El diseño de la pieza para flexo torsión se encuentra representado en la figura 44.

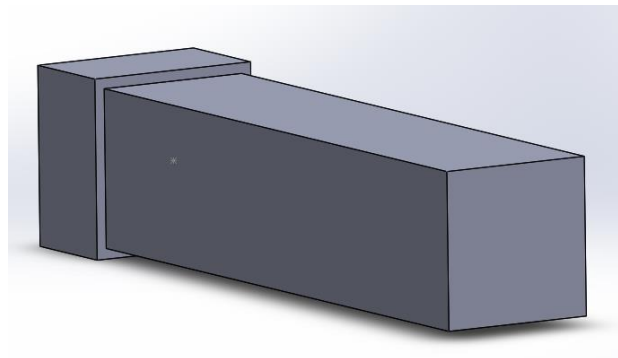


Figura 44 Diseño final de la pieza para flexo torsión

3.3. Cargas a aplicar

3.3.1. Viga rectangular a flexión

La máquina de ensayos universales MTS capacidad 5 KN dispone de medidores de fuerza y desplazamiento, por lo que en ésta prueba se aplicó cargas desde cero hasta la carga que produjo la rotura en la viga, midiendo la fuerza y su correspondiente deflexión.

3.3.2. Cilindro a torsión

Al inicio se pensó aplicar la carga sobre un extremo del cilindro, considerando un brazo mecánico en cuyo extremo se iba a aplicar una carga de 5 kg como se observa en la figura 45.

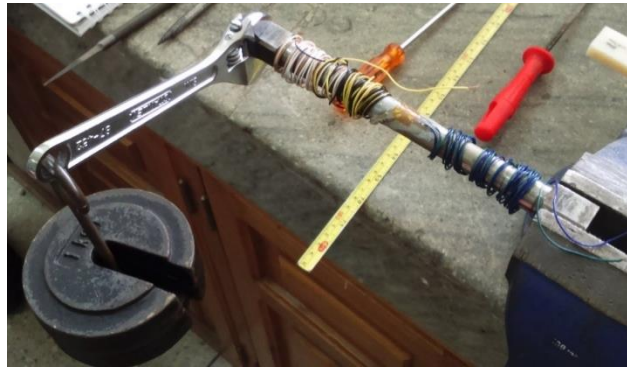


Figura 45 Aplicación de carga considerando un brazo mecánico en una probeta cilíndrica de acero.

Sin embargo, debido a que en la barra cilíndrica se producía torsión acompañada de flexión y el efecto de la fuerza cortante, con la finalidad de tener una torsión pura y eliminar los otros dos efectos, se decidió optar por aplicar la carga utilizando una llave para ajustar pernos de ruedas de automóviles, donde se aplicó dos fuerzas iguales pero en diferente dirección alrededor del eje axial, con el fin de que al aplicar la ecuación de la estática sumatoria de fuerzas en dirección vertical estas dos fuerzas se anulen, por lo tanto el efecto de la fuerza cortante y del momento flector se anulen.

Para la aplicación del toque de 3200 [N mm], se escogió por medio de la ecuación de la teoría básica de la Torsión que se muestra a continuación:

$$\phi_{rad} = \frac{T \times L}{J \times G}$$

Donde:

T= Torque [N mm]

L= Longitud [mm]

J= Momento polar de inercia [mm⁴]

G=Módulo de Rigidez [N/mm²]

Para obtener Momento polar de inercia (J) se usó la siguiente formula:

$$J = \frac{\pi \times d^4}{32}$$

Donde:

d= diámetro [mm]

Para obtener el Módulo de rigidez (G) se usó la siguiente formula:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

Donde:

E= Módulo de Elasticidad [MPa]

μ = Coeficiente de Poisson

Los datos obtenidos con tres fuerzas seleccionadas son

Tabla 17
Comparación de fuerzas y ángulos para ensayo de torsión

Fuerza [N]	Torque [N mm]	Angulo [rad]	Angulo [Grados]
5	800	0,01456	0,8
10	1600	0,02913	1,7
20	3200	0,05827	3,3

Consultando en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE, se llegó a la conclusión que si es posible realizar las pruebas aplicando una carga de 20 [N] y con un ángulo de alrededor de 3 grados como se muestra en la tabla 17.

3.3.3. Prisma cuadrado a Flexo Torsión

En vista a la disponibilidad de pesas de 2.5 [Kg] (aprox. 25 [N]) y 5 [Kg] (aprox. 50 [N]) se procedió aplicar una carga vertical de 50 [N] en la arista lateral extrema de la viga que va actuar a flexo torsión, debido a que si se aplica las ecuaciones de la estática: sumatoria de fuerzas en dirección vertical, sumatoria de momentos y sumatoria de torques igual a cero, se obtiene que en

la sección del empotramiento aparece la fuerza cortante, momento flector y torque. En la geometría expuesta en el tema “geometría del prisma cuadrado a flexo torsión”, se observa que la relación entre la altura y la longitud es 0.25 que es un valor en el cual se puede despreciar el efecto de la fuerza cortante quedando como efectos predominantes en el análisis del elemento, la flexión y la torsión.

3.4. Uso de Software para análisis del comportamiento mecánico (Esfuerzos, deformaciones unitarias, desplazamientos)

Una vez que se determinó el material, la geometría y las cargas a aplicar en los elementos se procedió a utilizar el software SSWW⁴ con la finalidad de realizar operaciones básicas de dibujo como el croquizado, extrusión y ensamblaje para las geometrías tipo prismática rectangular, cilíndrica y prismática cuadrada, los cuales fueron grabados con la extensión “Parasolid (.xt)” para poder abrirlo en el software AAWW⁵ y realizar el análisis comportamiento mecánico de las piezas.

3.4.1. Viga rectangular a flexión

El análisis del comportamiento mecánico de la viga a flexión se va a realizar en el software AAWW. Para la simulación, primeramente, se debe introducir el tipo de material el cual se quiere ensayar, por lo que se ingresó el módulo de elasticidad del material (E) y el coeficiente de Poisson (μ). Para el material ABS se colocó el $E = 1673.92$ [MPa] y $\mu=0.3$; y para el material PLA se colocó el $E = 3096.9$ [MPa] y $\mu=0.3$; como se muestran en las figuras 46 y 47.

⁴ Se omite el nombre de los programas computacionales debido a que son softwares comerciales.

⁵ Se omite el nombre de los programas computacionales debido a que son softwares comerciales.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Isotropic Elasticity				
3	Derive from	Young's M...			
4	Young's Modulus	1673,9	MPa		
5	Poisson's Ratio	0,3			
6	Bulk Modulus	1,3949E+09	Pa		
7	Shear Modulus	6,4382E+08	Pa		

Figura 46 Ingreso del material ABS en el programa AAWW

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Isotropic Elasticity				
3	Derive from	Young's M...			
4	Young's Modulus	3097	MPa		
5	Poisson's Ratio	0,3			
6	Bulk Modulus	2,5808E+09	Pa		
7	Shear Modulus	1,1911E+09	Pa		

Figura 47 Ingreso del material PLA en el programa AAWW

Luego se va a la opción de geometría y se exporta el documento previamente guardado como Parasolid (.xt), y se genera el sólido a analizar, el cual se lo observa en la figura 48.

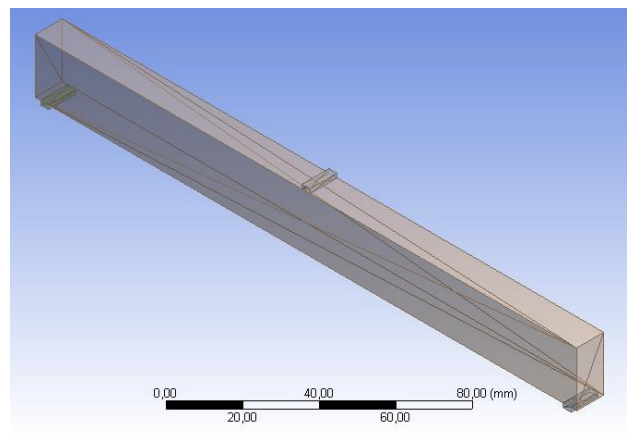


Figura 48 Sólido exportado de la viga rectangular a flexión

Una vez que se tiene el sólido en el programa, nos vamos a “Modelo” donde se coloca los apoyos en la viga y las cargas a aplicar como se muestra en la figura 49. Debido a los resultados de los ensayos realizados previamente con las probetas de flexión, se consideró aplicar una carga de 500 [N] ya que

este valor se encontraba dentro del límite de proporcionalidad para ambos materiales, ABS y PLA.

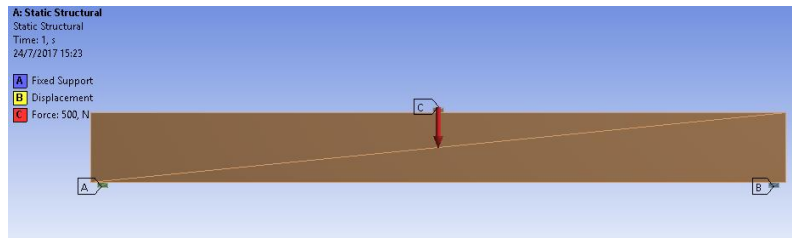


Figura 49 Apoyos y cargas aplicadas en la viga rectangular

Ya que se colocó las cargas y apoyos respectivos, se procedió a realizar la simulación de esfuerzo, deformación unitaria y desplazamiento. Se seleccionó el análisis por esfuerzos principales ya que los elementos son frágiles.

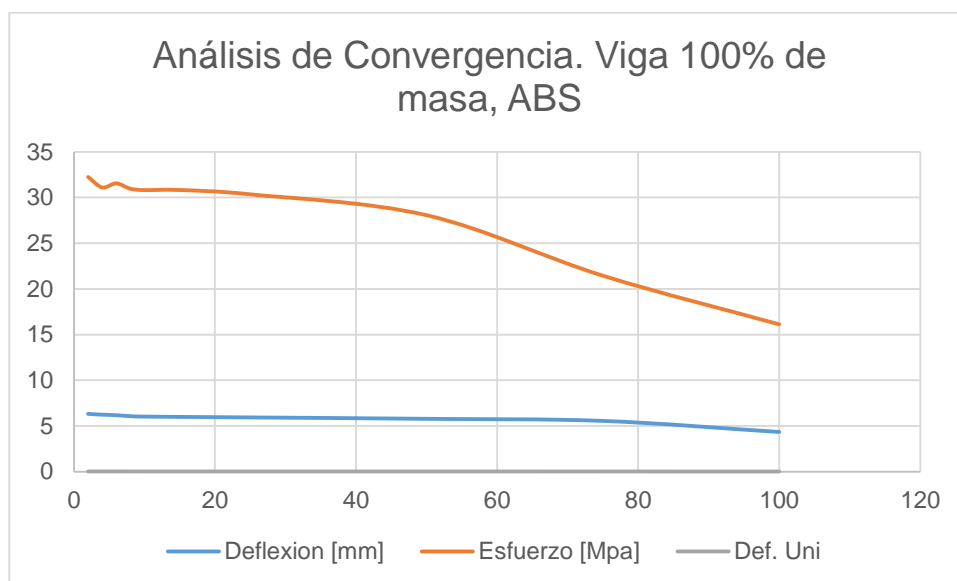


Figura 50 Diagrama de análisis de convergencia. Viga 100% de masa, ABS

Según el análisis de convergencia que se muestra en la figura 50 se observa que los resultados para la viga al 100% de masa con material ABS, fueron los que se muestran a continuación:

- **Esfuerzos**

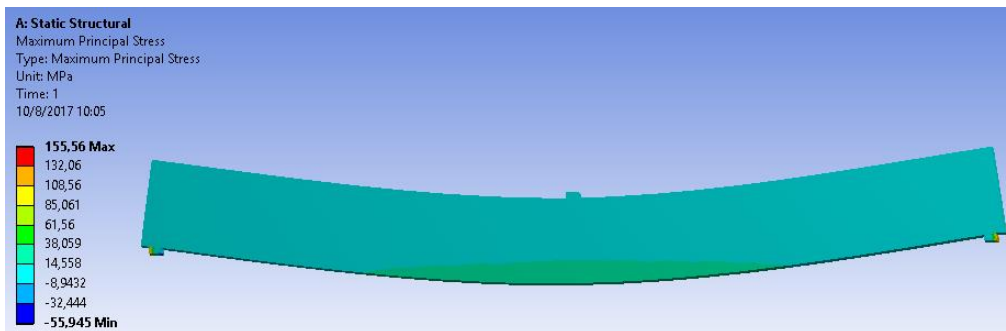


Figura 51 Resultados de esfuerzos en la viga rectangular a flexión, Material ABS

Existe un esfuerzo máximo principal en el centro de la viga con un valor de 32.52 [MPa] aproximadamente.

- **Deformación Unitaria**

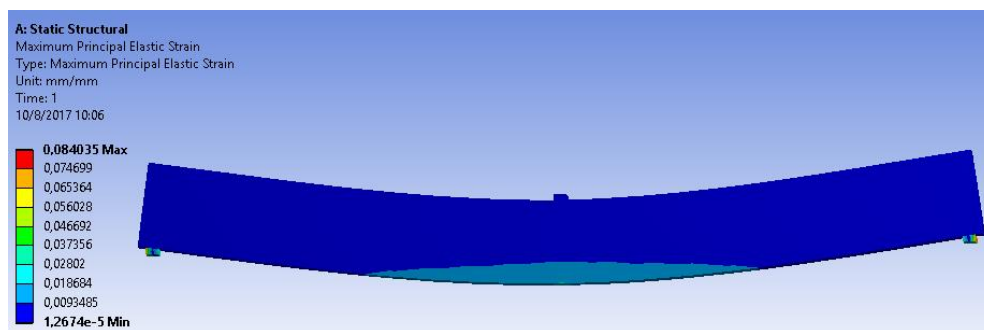


Figura 52 Resultados de Deformación Unitario para la viga rectangular a flexión, Material ABS

La deformación unitaria en el centro de la viga es de 0.0192 aproximadamente, mientras que en el resto de la misma se encuentran entre los valores de 0.00934 y 1.267×10^{-5} .

- **Deflexión**

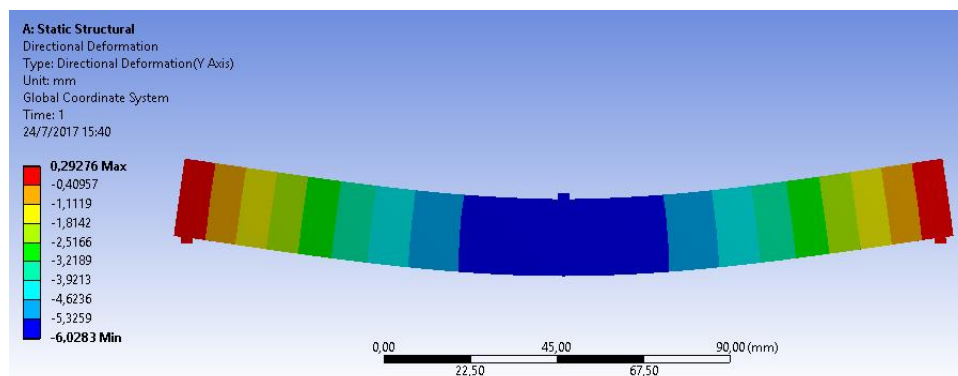


Figura 53 Resultados de Deflexión para viga rectangular a flexión, Material ABS

En el centro de la viga se observa que existe una deflexión de 6.32 [mm] hacia abajo en el centro de la viga, mientras que en los extremos, donde se encuentran los apoyos, la deflexión es de 0.29276 [mm].

Para la viga con material PLA, se realizó el mismo procedimiento que el material ABS y según el análisis de convergencia que se muestra en la figura 54 se obtuvieron los siguientes resultados:

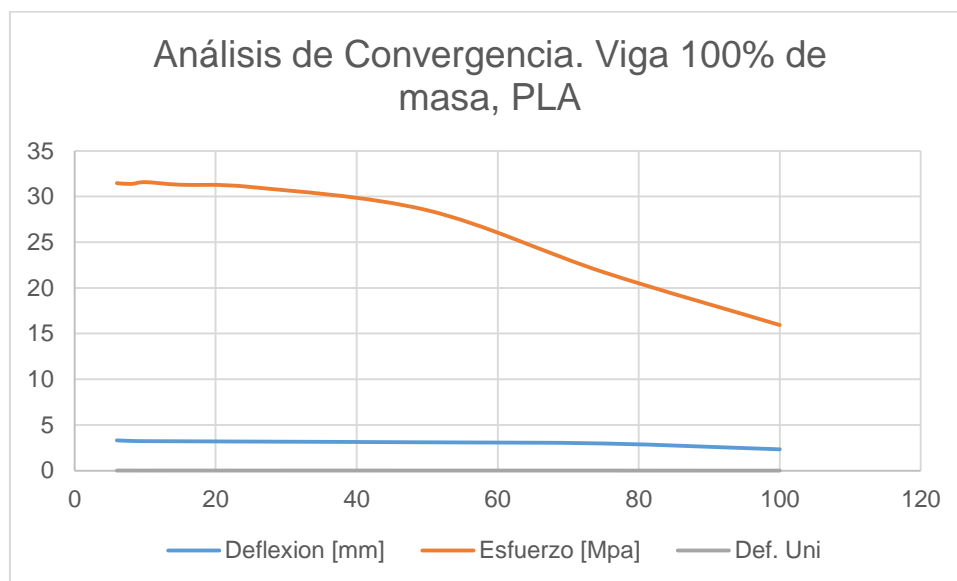


Figura 54 Diagrama de análisis de convergencia. Viga 100% de masa, PLA

- **Esfuerzos**

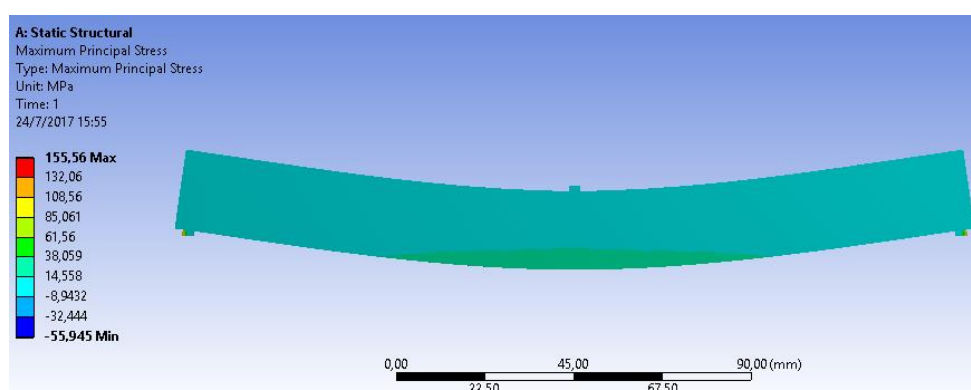


Figura 55 Resultados de esfuerzos en la viga rectangular a flexión, Material PLA

En la figura 55 se observa que en el centro de la viga se generó un esfuerzo de 31.38 [MPa] aproximadamente.

- **Deformación unitaria**

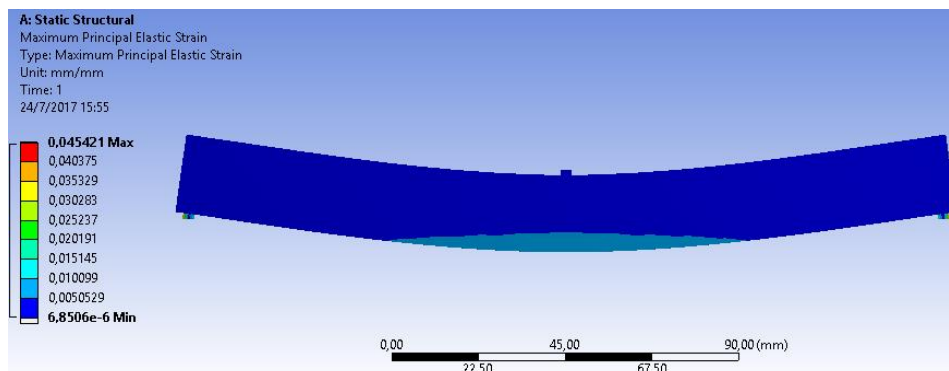


Figura 56 Resultados de Deformación Unitario para la viga rectangular a flexión, Material ABS

La deformación unitaria en el centro de la viga es de 0.00959 aproximadamente como se observa en la figura 56.

- **Desplazamientos**

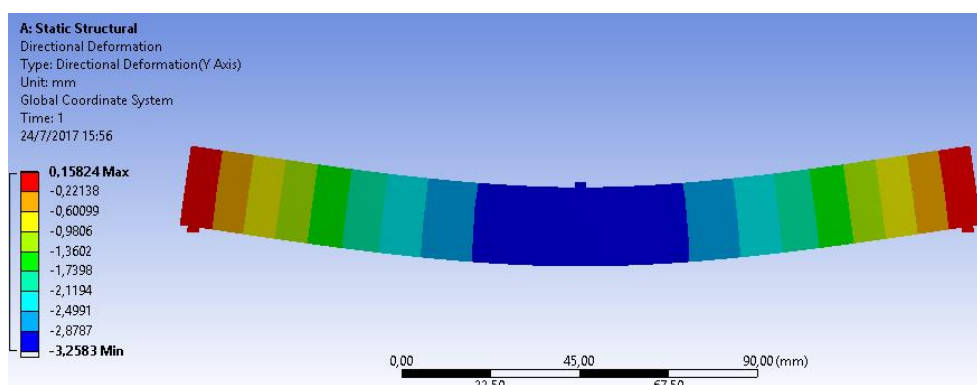


Figura 57 Resultados de Deflexión para viga rectangular a flexión, Material PLA

Como se muestra en la figura 57, la deflexión en el centro de la viga es de 3.25 [mm] y en los extremos de la viga es de 0.1582 [mm].

3.4.2. Cilindro a torsión

Al igual que la viga rectangular a flexión, para realizar la simulación en el cilindro a torsión se debe introducir el material que tienen los elementos. Se introduce el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (μ), los cuales tienen valores de $E = 1673.92$ [MPa] y $\mu = 0.3$ para el material ABS y $E = 3096.97$ [MPa] y $\mu = 0.3$ para el material PLA, como se realizó en el literal anterior de viga a flexión.

Una vez seleccionado el material con el cual se va a trabajar, se procedió a exportar el sólido del cilindro, como se lo realizó anteriormente en viga a flexión, el cual se muestra en la figura 58.

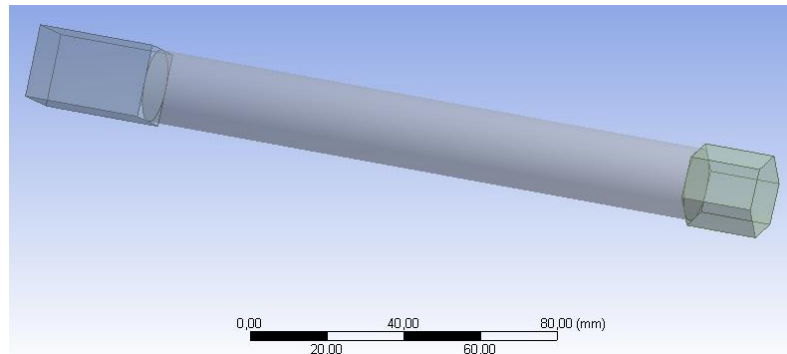


Figura 58 Sólido exportado del cilindro a torsión

Al igual que en el literal anterior para obtener los resultados de la simulación, primeramente, se debe colocar las cargas que se van a aplicar. El cilindro se encuentra empotrado en un extremo, para ello, en el software se seleccionó una sujeción fija en las dos caras del dado cuadrado. Mientras que en el otro extremo del mismo, en la cara frontal del dado hexagonal, se aplicó un torque de 3200 [N mm]. Los apoyos y las cargas aplicadas en el sólido, se muestran en la figura 59.

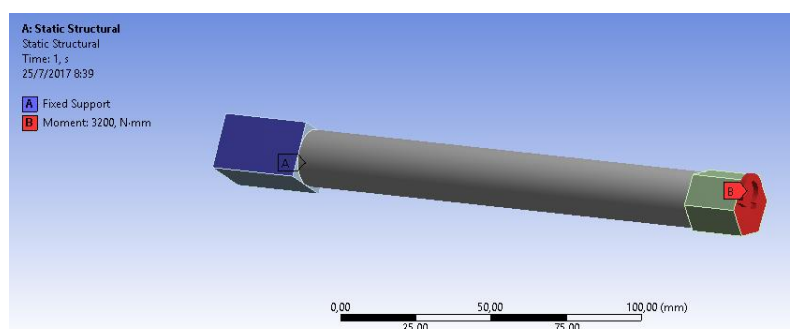


Figura 59 Apoyo y torque aplicado en el cilindro

Ya que las cargas y los apoyos se encuentran correctamente colocados en el cilindro, se procedió a realizar las simulaciones. Del software, se tomó los resultados del esfuerzo y la deformación unitaria principal porque los materiales usados son frágiles.

Los resultados obtenidos de la simulación con un análisis de convergencia para el material ABS del cilindro a torsión fueron:

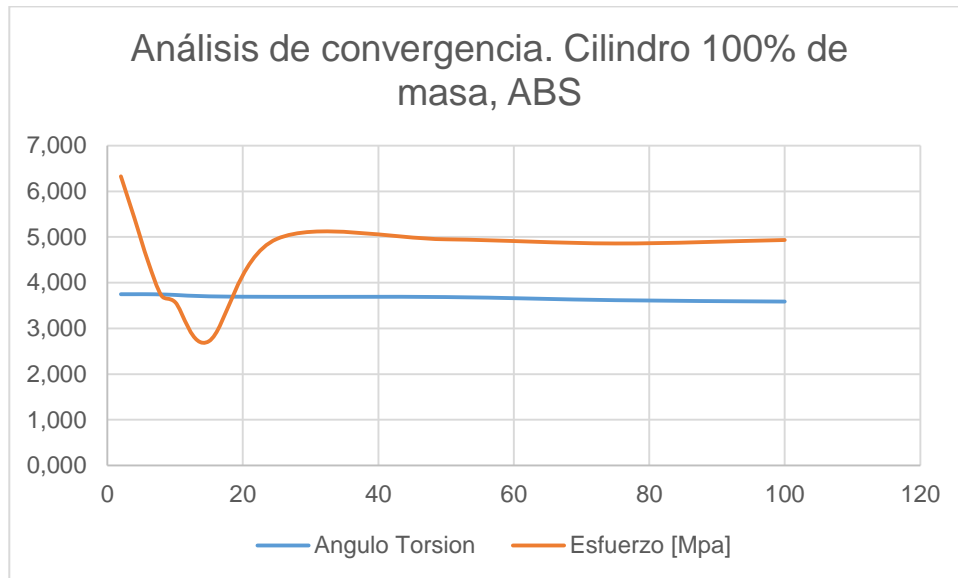


Figura 60 Diagrama de análisis de convergencia. Cilindro 100% de masa, ABS

- **Esfuerzo Cortante**

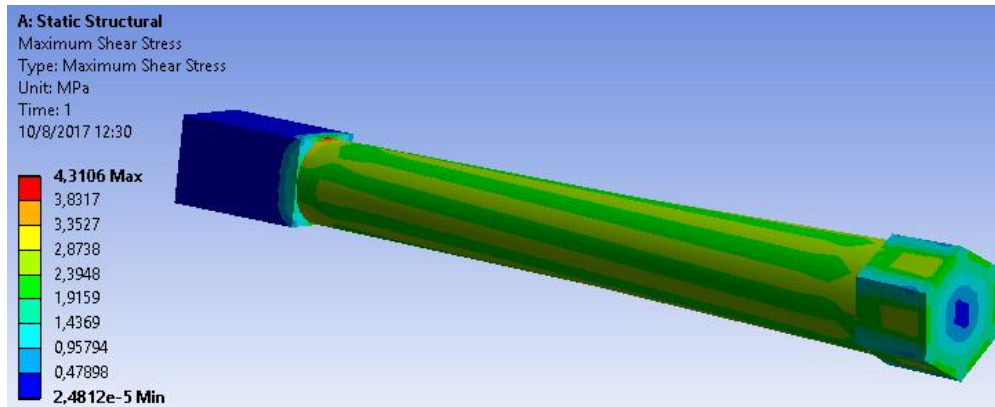


Figura 61 Resultados de esfuerzos cortantes en el cilindro a torsión, Material ABS

Como se observa en el diagrama de la figura 61, la barra circular va a tener un esfuerzo cortante máximo que se encuentra en el empotramiento con un valor de 4.96 [MPa], mientras que en la parte cilíndrica el valor es de 0.037334 [MPa] aproximadamente.

- **Desplazamiento**

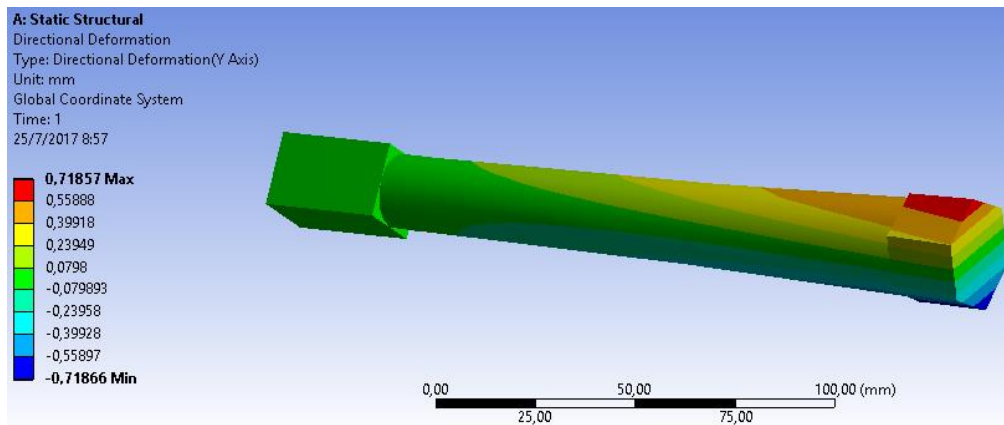


Figura 62 Resultados de desplazamiento en el cilindro a torsión, Material ABS

En la figura 62, se muestra los valores de desplazamiento que va a tener el sólido con un torque de 3200 [N mm], donde el desplazamiento vertical “y” en el extremo libre de la barra es de 0.706 [mm]. Por consultas en el laboratorio de mecánica de materiales, la deformación obtenida en el equipo disponible para ensayos de torsión, es el ángulo de torsión, por lo que el valor de desplazamiento “y” generado en la simulación fue convertido a valor de ángulo de torsión de la siguiente forma:

En la figura 63 que se muestra a continuación

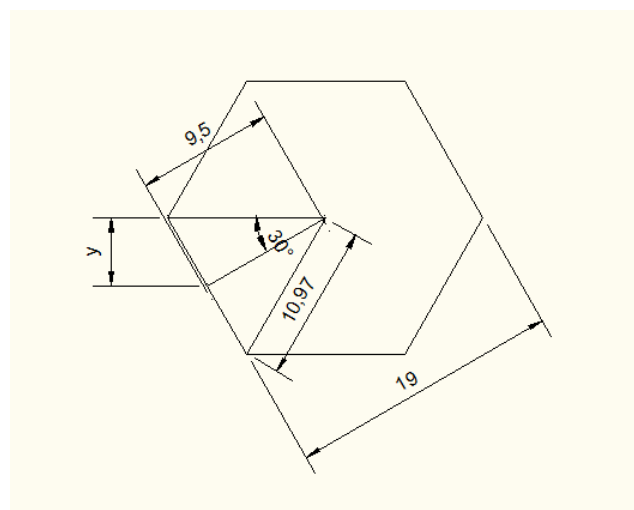


Figura 63 Medidas de la cara del dado hexagonal

El ángulo de torsión (θ) en grados viene dado por la ecuación:

$$\theta = \frac{y [mm]}{r} \times \frac{180}{\pi}$$

Donde:

θ = Angulo de torsión [grados]

r= radio del hexágono [mm]

y= desplazamiento [mm]

$$\theta = \frac{0.706 [mm]}{10.96} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 3.691^\circ$$

El valor del ángulo de torsión (θ) para el material ABS en el cilindro a torsión es de 3.691 °.

Los resultados obtenidos de la simulación con un análisis de convergencia para el material PLA del cilindro a torsión fueron:

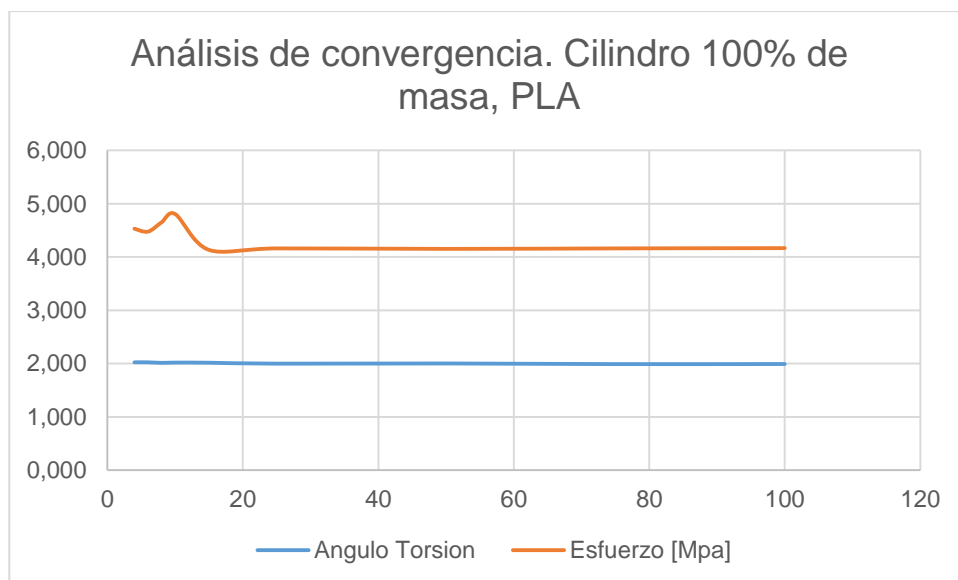


Figura 64 Diagrama de análisis de convergencia. Cilindro 100% de masa, PLA

- **Esfuerzo Cortante**

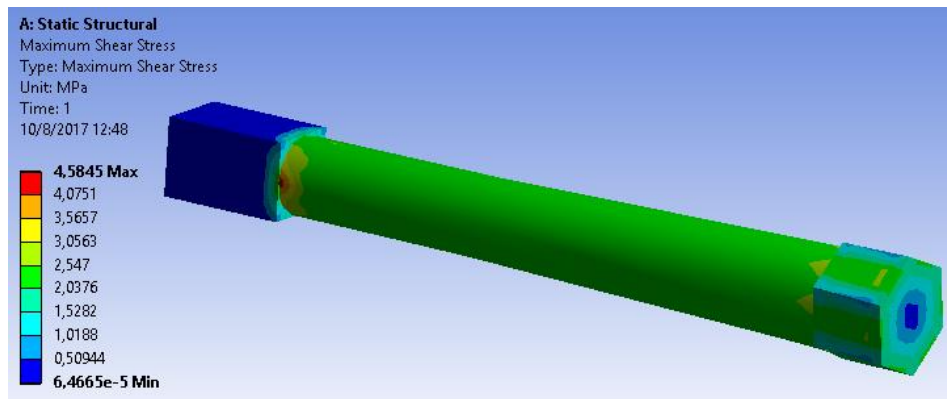


Figura 65 Resultados de esfuerzos cortantes en el cilindro a torsión, Material PLA

Como se observa en la figura 65, la barra circular va a tener un esfuerzo cortante máximo en el empotramiento de 4.13 [MPa]

- **Desplazamiento**

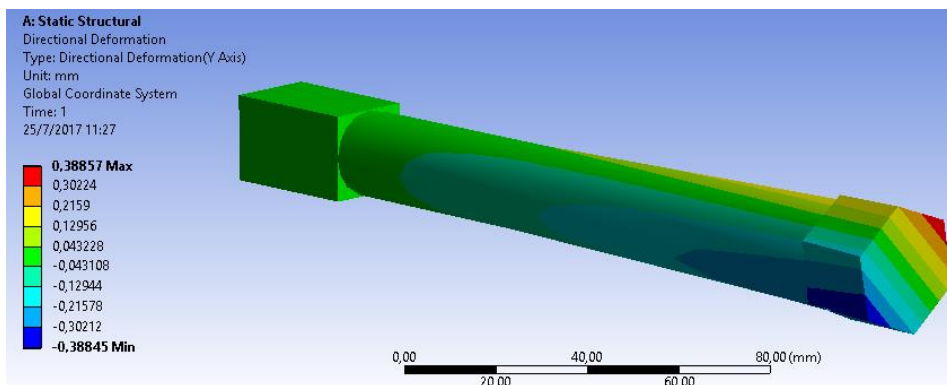


Figura 66 Resultados de desplazamiento en el cilindro a torsión, Material PLA

En la figura 66, se muestra los valores de desplazamiento que va a tener el sólido con un torque de 3200 [N mm], donde el desplazamiento vertical “y” en el extremo libre de la barra es de 0.386 [mm]. Al igual que en el material ABS, es necesario convertir el valor de desplazamiento “y” generado en la simulación a un valor de ángulo de torsión, es por ello, que se aplicó el mismo procedimiento para sacar el ángulo de torsión (θ).

$$\theta = \frac{0.386 \text{ [mm]}}{10.96} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 2.015^\circ$$

El valor del ángulo de torsión (θ) para el material PLA en el cilindro a torsión es de 2.015° .

3.4.3. Prisma cuadrado a Flexo Torsión

Como se realizó en los literales anteriores, de viga a flexión y de cilindro a torsión, para la simulación se debe insertar los materiales que se va a utilizar, donde se debe colocar el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (μ), que tienen los valores de $E = 1673.92$ [MPa] y $\mu = 0.3$ para el material ABS y de $E = 3096.97$ [MPa] y $\mu = 0.3$ para el material PLA, con el mismo procedimiento realizado anteriormente.

Al igual que en los otros literales, se exportó al programa el sólido del prisma a flexo torsión, el cual se muestra en la figura 67.

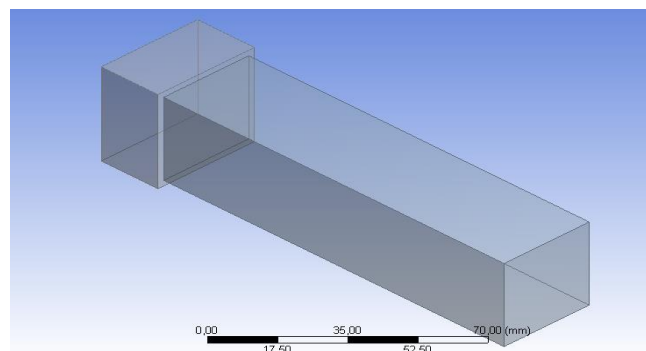


Figura 67 Sólido exportado del prisma a flexo torsión

Para obtener los resultados de la simulación, se debe colocar los apoyos y las cargas a aplicar. El prisma está empotrado en un extremo del sólido, por lo que en el software se colocó una sujeción fija en las dos caras del dado rectangular y se aplicó una fuerza vertical en la arista del otro extremo del prisma de 49.05 [N], como se muestra en la figura 68

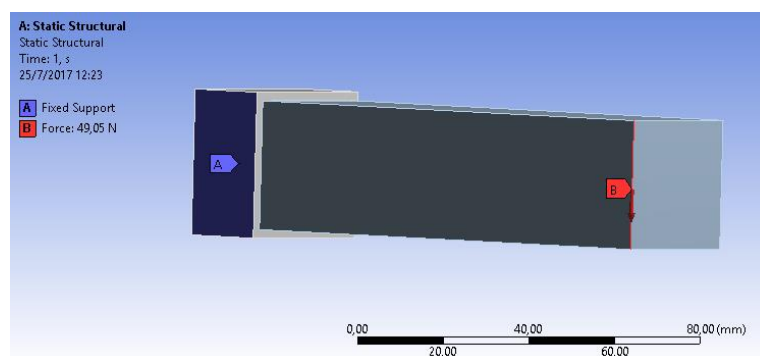


Figura 68 Apoyo y carga aplicada en el prisma

Se realizó el mismo procedimiento de viga a flexión y cilindro a torsión para realizar la simulación respectiva y obtener los resultados de esfuerzo, deformación unitaria y desplazamiento.

Los resultados obtenidos con un análisis de convergencia realizado del prisma rectangular a flexo torsión para el material ABS se encuentran a continuación:

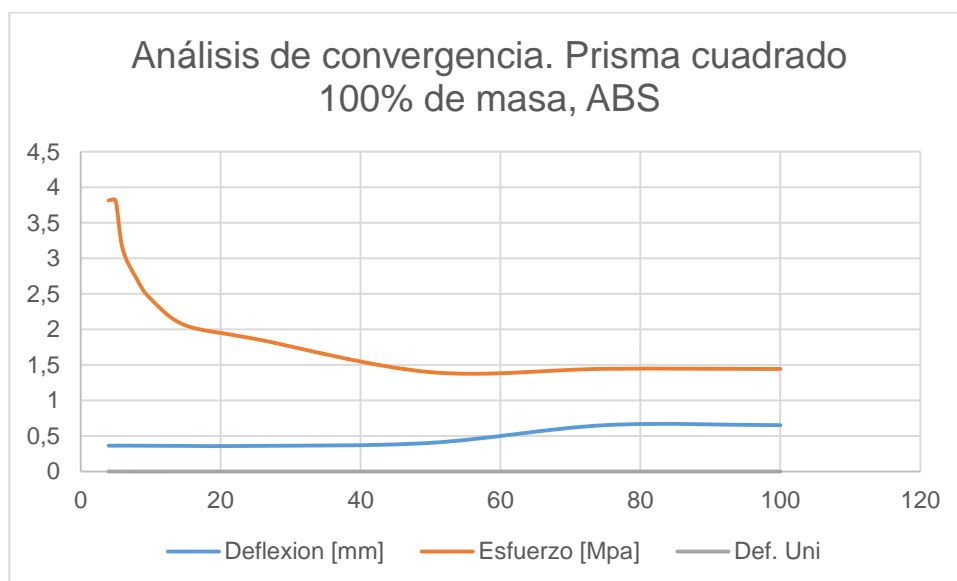


Figura 69 Diagrama de análisis de convergencia. Prisma cuadrado 100% de masa, ABS

- **Esfuerzo**

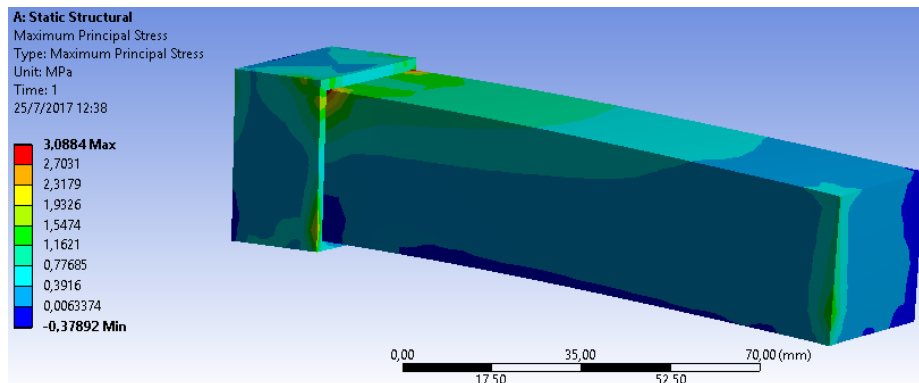


Figura 70 Resultados de esfuerzos en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material ABS

Se puede observar en la figura 70 que en el vértice superior izquierdo de la sección del empotramiento se tiene un esfuerzo máximo de tracción de 1.34 [MPa].

- **Deformación Unitaria**

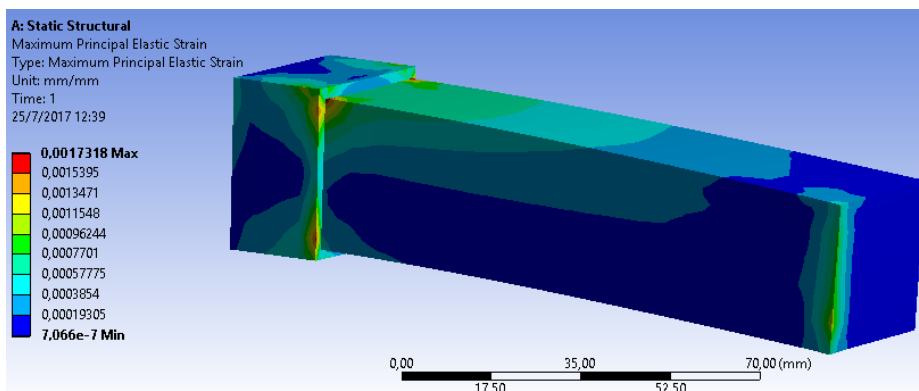


Figura 71 Resultados de deformación unitaria en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material ABS

En la figura 71 se observa que en el mismo punto donde se generó el esfuerzo principal máximo existe una deformación unitaria máxima de 0.000168.

- **Desplazamiento**

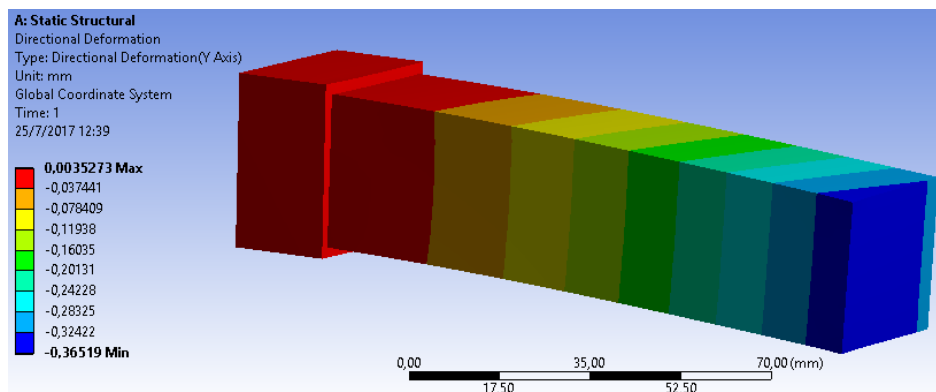


Figura 72 Resultados de desplazamientos en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material ABS

En la figura 72, se puede observar que el desplazamiento donde se aplicó la carga vertical de 49.05 [N] es de 0.364 [mm].

Para obtener los resultados de la simulación con un análisis de convergencia del prisma rectangular a flexo torsión con el material PLA se realizó el mismo procedimiento que con el material ABS, y estos fueron:

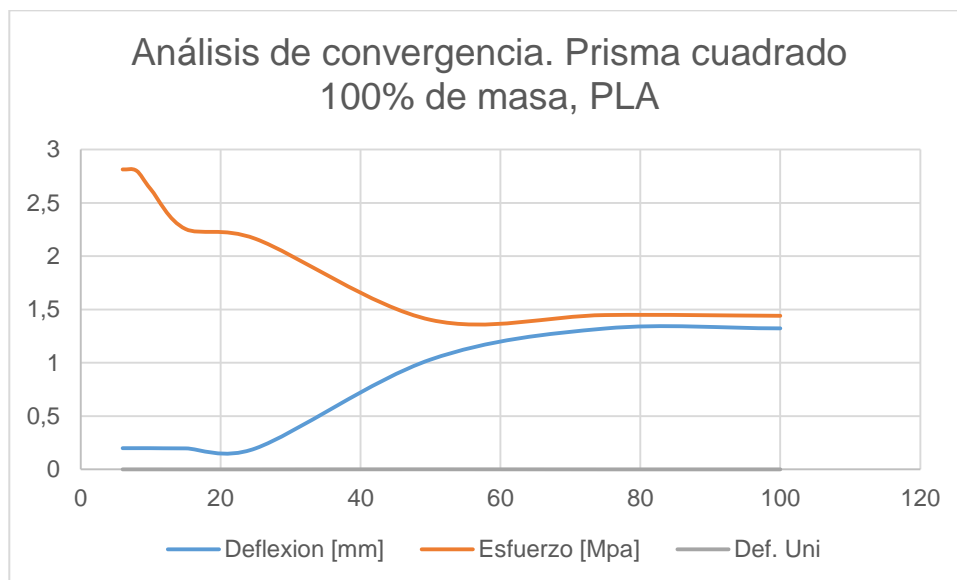


Figura 73 Diagrama de análisis de convergencia. Prisma cuadrado 100% de masa, PLA

- **Esfuerzo**

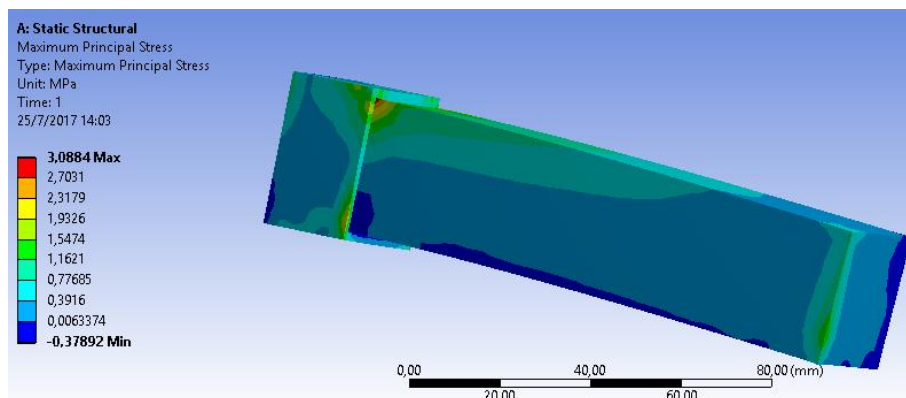


Figura 74 Resultados de esfuerzos en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material PLA

Se puede observar en la figura 74 que en el vértice superior izquierdo de la sección del empotramiento se tiene un esfuerzo máximo de tracción de 1.403 [MPa].

- **Deformación Unitaria**

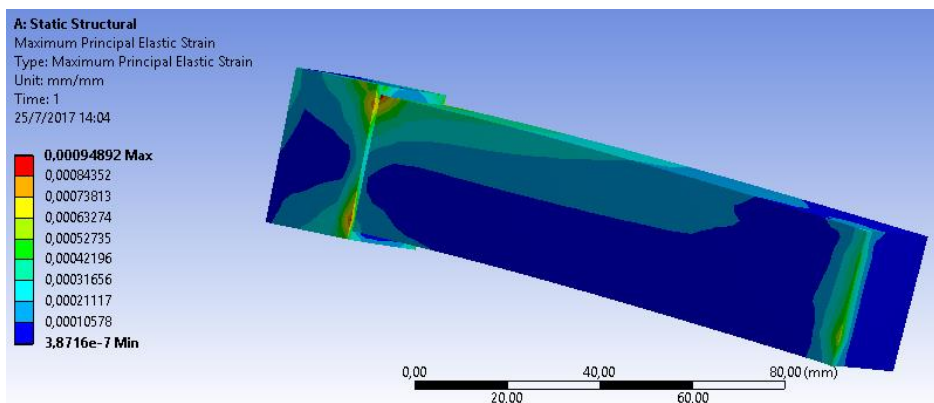


Figura 75 Resultados de deformación unitaria en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material PLA

En la figura 75 se observa que en el mismo punto donde se generó el esfuerzo principal máximo existe una deformación unitaria máxima de 9.2×10^{-4} .

- **Desplazamiento**

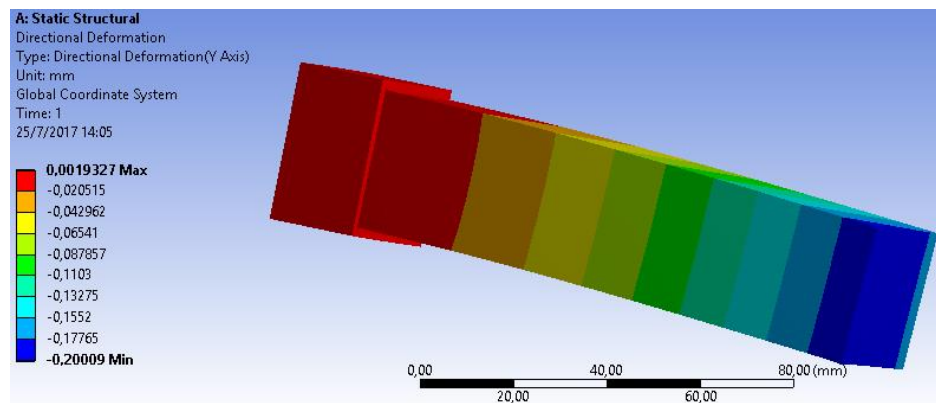


Figura 76 Resultados de desplazamientos en el prisma cuadrado a flexo torsión, Material PLA

En la figura 76 se puede observar que el desplazamiento donde se aplicó la carga vertical de 49.05 [N] es de 0.2 [mm].

CAPITULO IV

4. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

4.1. Modelado de elementos

Para realizar la optimización topológica de los elementos se realizó tres geometrías diferentes dependiendo de la disponibilidad del tamaño de impresión 3D y de los equipos para realizar los ensayos de tracción, flexión, torsión y flexo torsión. Cada geometría va a ser optimizada con dos materiales que son: ABS con un módulo de elasticidad (E) de 1673.92 [MPa] y Coeficiente de Poisson (μ) de 0.3; y PLA con un módulo de elasticidad (E) de 3096.9 [MPa] y Coeficiente de Poisson (μ) de 0.3.

Los elementos diseñados fueron una viga rectangular a flexión, cilindro a torsión y un prisma rectangular a flexo torsión.

4.1.1. Viga rectangular a flexión

La viga se encuentra simplemente apoyada con una carga aplicada en el centro de la misma. Tiene una longitud de 200 [mm] debido a que el accesorio del equipo de ensayos sobre vigas, donde van apoyadas las piezas, tiene esa longitud máxima entre apoyos. Las dimensiones de la sección transversal de la viga rectangular son de 10 [mm] x 20 [mm] para evitar el efecto del cortante.

En el diseño de la viga rectangular se agregaron tres bloques pequeños, los cuales ayudaron a que se aplique de una mejor manera las cargas y los apoyos en la misma, debido a que en los programas Inspire y programas CAD se selecciona una área para la aplicación de las cargas y los apoyos.

El diseño final de la viga rectangular para realizar la optimización topológica se encuentra en la figura 77.

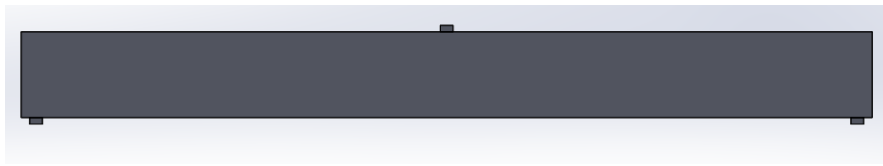


Figura 77 Viga rectangular a flexión

Por ensayos previamente realizados en las probetas de flexión, en la viga se aplicó una carga de 500 [N] en la mitad de la longitud para realizar la optimización topológica. La aplicación de la carga y los apoyos se observan en la figura 78, donde A y B son los apoyos y C es la carga.

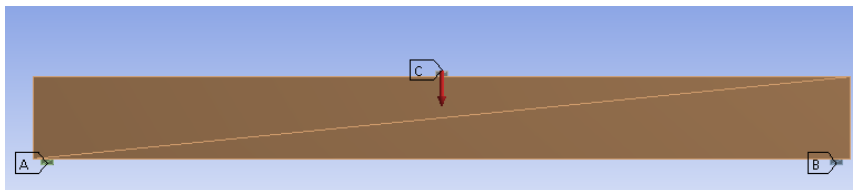


Figura 78 Apoyos y carga aplicados en la viga rectangular

4.1.2. Cilindro a torsión

El cilindro se encuentra sometido a torsión pura, en cada extremo del mismo se colocó un dado rectangular para considerar condiciones de empotramiento y un dado hexagonal para la aplicación del torque de 3200 Nmm. El diámetro del cilindro es de 19 [mm] y su longitud de 150 [mm]. El diseño final del cilindro se encuentra en la figura 79.

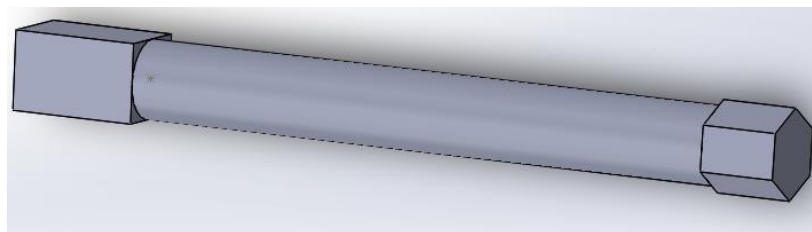


Figura 79 Cilindro a torsión

El torque aplicado de 3200 [N mm], fue escogido por medio de la ecuación básica de torsión vista en el capítulo anterior. El empotramiento y el torque aplicado en el cilindro, se encuentra en la figura 80, donde se muestra en A el soporte fijo y en B el torque.

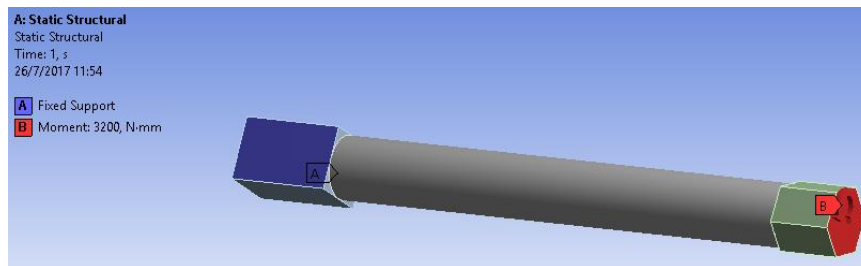


Figura 80 Apoyo y torque aplicado en el cilindro

4.1.3. Prisma cuadrado a flexo torsión

Las dimensiones del prisma cuadrado son de 30 x 30 x 120 [mm] para evitar el efecto del cortante y predomine la flexión. El prisma tendrá en un extremo un dado rectangular de 34 x 20 [mm] para la sujeción bajo consideración de empotramiento. El diseño final del prisma cuadrado se muestra en la figura 81.

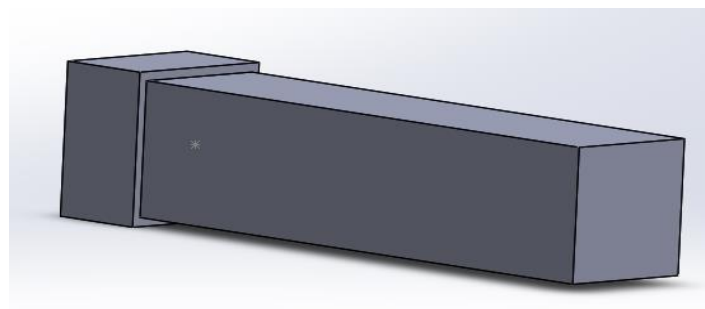


Figura 81 Prisma cuadrado a flexo torsión

En el prisma se aplicó una carga vertical de 49.05 [N] en la arista lateral extrema del prisma. Al dado rectangular que se encuentra empotrado, se le aplicó una sujeción fija como se muestra en la figura 82, donde A es la sujeción fija y B la carga aplicada.

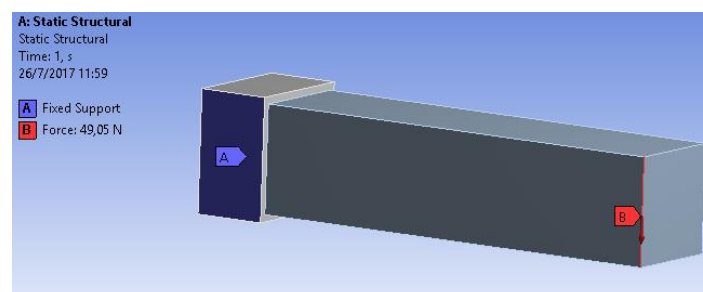


Figura 82 Apoyo y carga aplicado en el prisma cuadrado

4.2. Uso de Software Inspire 9.5

4.2.1. Software Inspire 9.5

Inspire 9.5 es una plataforma de dibujo y simulación en el cual se puede realizar diseños de elementos de todo tipo, usando las herramientas de CAD. Así mismo, se puede exportar geometrías guardadas en diferentes formatos que sean compatibles con el programa y realizar las diferentes operaciones que el mismo brinda. Una de las operaciones más importantes que realiza este software es la optimización topológica, que consiste en la reducción de masa del material de cualquier tipo de elemento, donde básicamente cambiará la inercia de los elementos mientras conserva el mismo esfuerzo en toda la pieza. (Altair, 2013)

4.2.2. Optimización topológica en la viga rectangular a flexión

Para realizar la optimización topológica primeramente se debe ingresar los materiales que se van a utilizar en las piezas optimizadas, para ello, se debe dar clic en el icono



Donde se agregó el módulo de elasticidad (E) en MPa, el Coeficiente de Poisson (μ), la densidad en $[t/mm^3]$ y el esfuerzo de fluencia en MPa, en este caso se colocó el esfuerzo último ya que los materiales son frágiles. (Altair, 2013)

 La imagen muestra una ventana de software con el título 'Partes y materiales'. Dentro, hay pestañas para 'Partes', 'Biblioteca de materiales' y 'Mis materiales'. Hay un botón con un signo más y un signo X. Abajo hay una tabla con las siguientes columnas: Material, E, Nu, Densidad, Tensión de fluencia y Coeficiente de dilatación térmica.

Material	E	Nu	Densidad	Tensión de fluencia	Coeficiente de dilatación térmica
ABS	1673 MPa	0.300	1E-009 t/mm ³	56.1 MPa	1.000E-06 /K
PLA	3096 MPa	0.300	1.247E-009 t/mm ³	99.3 MPa	1E-006 /K

Figura 83 Interfaz de ingreso de material en el programa Inspire 9.5

Una vez colocado el material se procedió a exportar el sólido de la viga realizado en el programa SSWW, el cual fue grabado con el formato Parasolid (.xt) ya que es compatible con el Inspire. Una vez exportado el sólido en la interfaz del Software se procedió a colocar las cargas y los apoyos respectivos, en el icono



Se seleccionó la opción de “Aplicar fuerza” y se colocó en el centro de la viga. Después se seleccionó la opción de “Aplicar soportes” para ser aplicados en los respectivos apoyos, fijos y tipo rodillo.

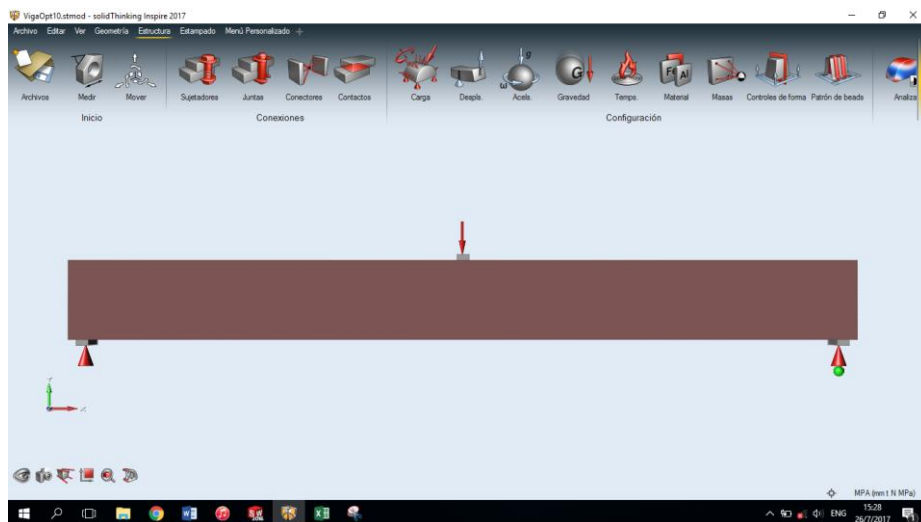


Figura 84 Aplicación de cargas y apoyos en la viga rectangular a flexión en el programa Inspire 9.5

Es necesario que en la aplicación de los soportes se especifique para que eje se encuentra permitido el movimiento, en el caso del apoyo tipo rodillo se permitió el movimiento en el eje “x” y “z”.

Una vez colocados los apoyos y cargas, se especifica el material que van a tener los elementos como se muestra en la figura 4.9, se dio clic derecho en la pieza y se seleccionó material; de la lista de materiales se escogió el ABS, agregado anteriormente.

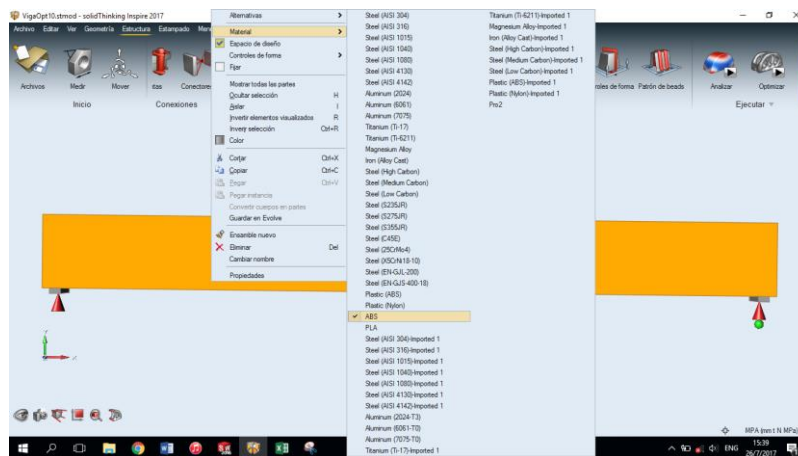


Figura 85 Selección del material de la viga a flexión

La selección del material se realizó tanto para la viga como para los bloques que soportan la carga y los apoyos.

Después se procedió a elegir el espacio de diseño que va a ser optimizado topológicamente, se dio clic derecho en la viga y se seleccionó "Espacio de diseño" como se muestra en la figura 86.

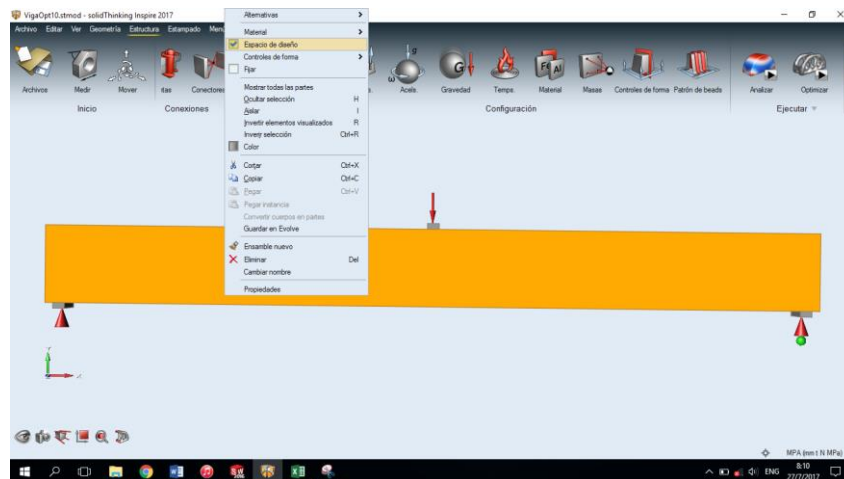


Figura 86 Selección de "Espacio de diseño" en la viga a flexión

Una vez identificado el espacio donde se va a realizar el diseño, se procede a realizar la optimización y nos vamos al icono de



Que se encuentra en la barra de herramientas. A continuación apareció una ventana de "Ejecutar optimización". El objetivo de la optimización topológica es obtener una pieza con la máxima rigidez (que produzca menores deformaciones longitudinales y angulares) mientras se disminuye los porcentajes de masa a ser utilizada, en este caso se seleccionó que la optimización trabaje con el 50%, 30 % y 20 % de la masa del elemento que es un rango que se consideró para el proyecto con respecto al programa que tiene porcentajes de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50. En vista de que se realizaron corridas preliminares de optimización se llegó a la conclusión que se trabaje como porcentaje mínimo de 20 ya que si se trabaja con un porcentaje de 15 el programa iba a quitar demasiado material y esto generaba conflicto al momento de realizar las impresiones 3D de la pieza y además la resistencia de la misma era bastante baja de tal forma que no iba a soportar ningún tipo de carga lo que hubiera representado pérdida de tiempo en los ensayos mecánicos y en los costos económicos en la impresión. El proyecto es analizado estáticamente por lo que no es necesario colocar una frecuencia en la pieza. Para el caso de la viga, el programa recomienda un espesor de 6.4392 mm para ejecutar la optimización, y también recomienda trabajar con mayor rapidez. No se aplicó gravedad ya que se desprecia el peso propio de los elementos y además en los ensayos se encerrarán los equipos sin considerar este peso.

En la figura 87 se muestra los parámetros escogidos para la optimización.

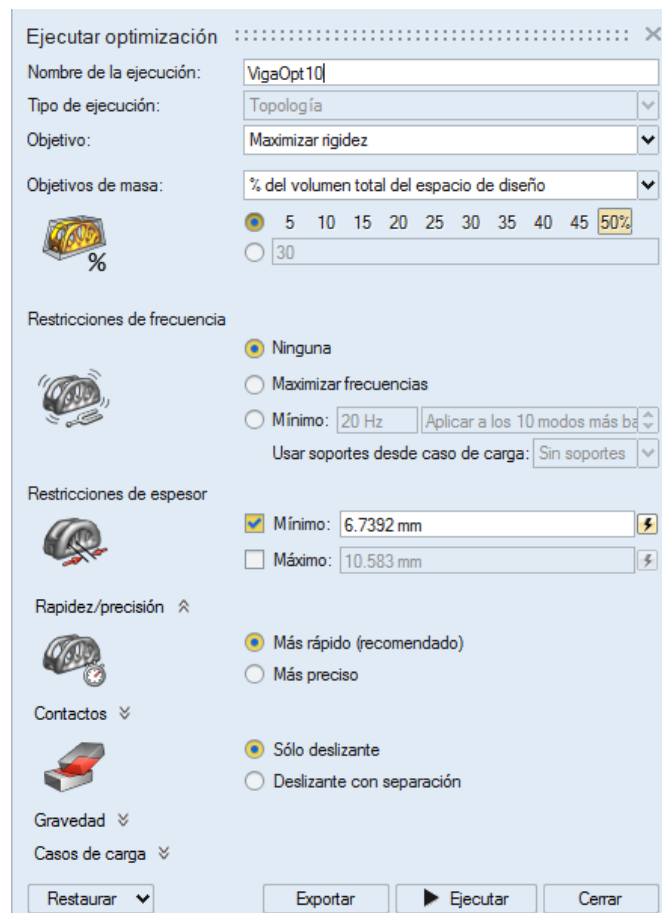


Figura 87 Interfaz de selección de parámetros para ejecutar la optimización

Seleccionamos 50% y seleccionamos la opción de “Ejecutar”. En la ventana de “Estado de ejecución” aparece el avance que va a teniendo la optimización del elemento.

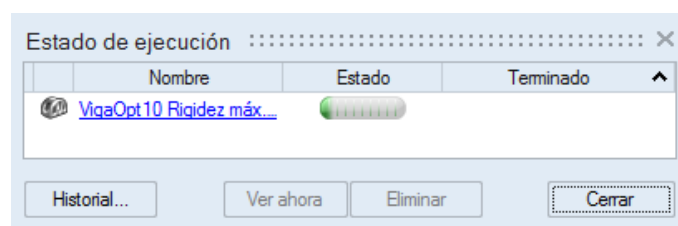
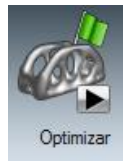


Figura 88 Interfaz del estado de ejecución de la optimización

Una vez terminada la optimización se da un clic en la bandera verde que aparece en el icono:



El cual proyecta el elemento optimizado al 50% como se ve en la figura 89.

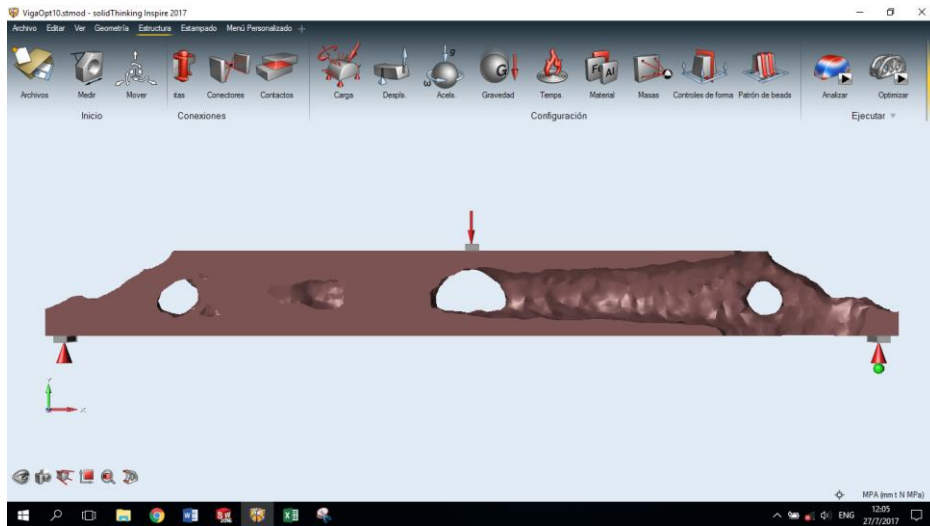


Figura 89 Viga a flexión optimizados al 50% de masa, Material ABS

La viga optimizada al 50% va a tener diferentes secciones transversales a lo largo de la misma, como se muestra en las figuras 90 y 91.

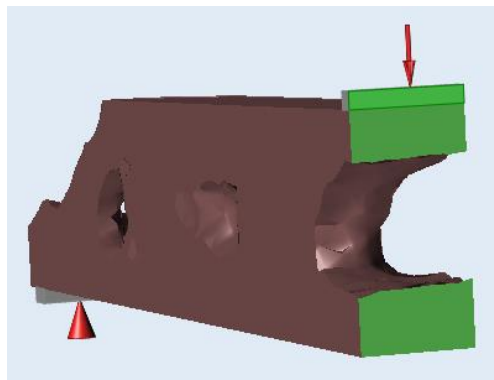


Figura 90 Corte transversal en el centro de la viga optimizada con el 50% de masa, Material ABS

En el centro de la de la viga se observa dos alas, una en la parte superior y la otra en la parte inferior.

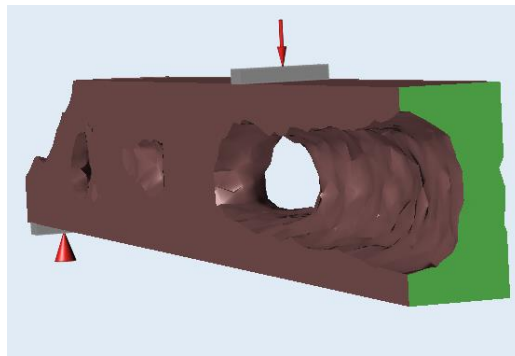


Figura 91 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 50% de masa, Material ABS

A una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga, se observa que va a existir una sección transversal en forma de C.

Para ejecutar la optimización topológica con el 30% y 20% de masa del elemento, hay que realizar el mismo procedimiento hecho para el 50% desde la opción de “Optimizar”. Los resultados obtenidos para el 30% de masa se muestra en la figura 92.

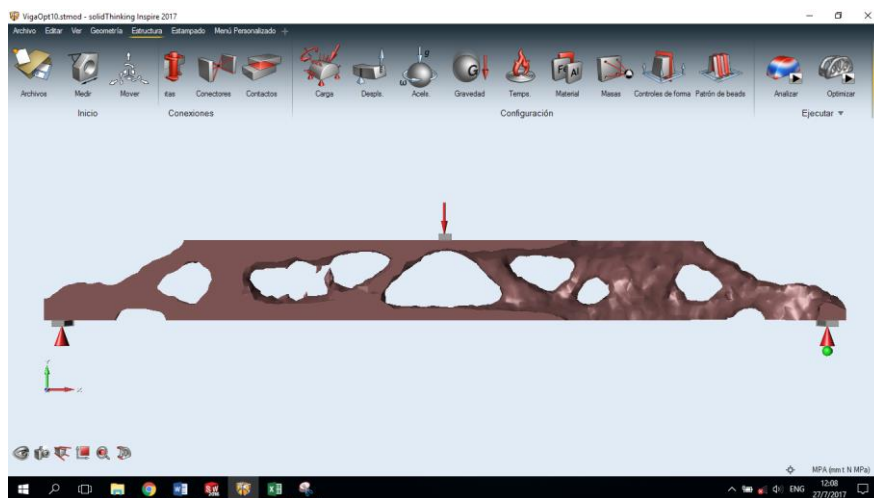


Figura 92 Viga a flexión optimizada con el 30% de masa, Material ABS

Las secciones transversales de la viga optimizada al 30% van cambiando desde el centro de la misma hasta los extremos. Como se puede observar en la figura 93, las alas generadas, superior e inferior, van a tener un menor espesor que en la viga optimizada al 50%.

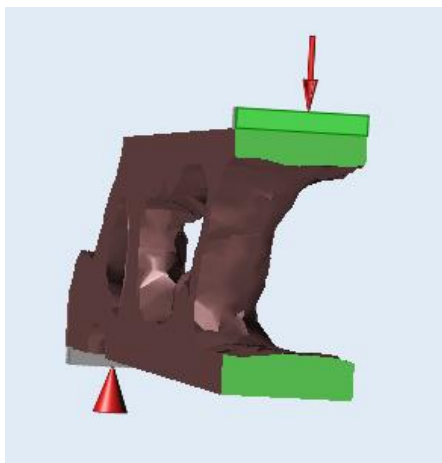


Figura 93 Corte transversal en el centro de la viga a flexión optimizada con el 30% de masa, Material ABS

En la figura 93 se observa que el programa extrae material de la sección rectangular, a 150 mm de longitud desde el extremo de la viga, a una sección transversal que se aproxima a la geometría de una C.

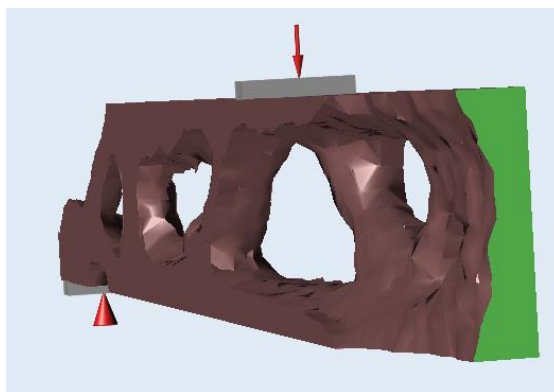


Figura 94 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 30% de masa, Material ABS

En la figura 95 se encuentra la viga optimizada con el 20% de masa, donde se observa que la viga es mucho más delgada que en los casos anteriores.

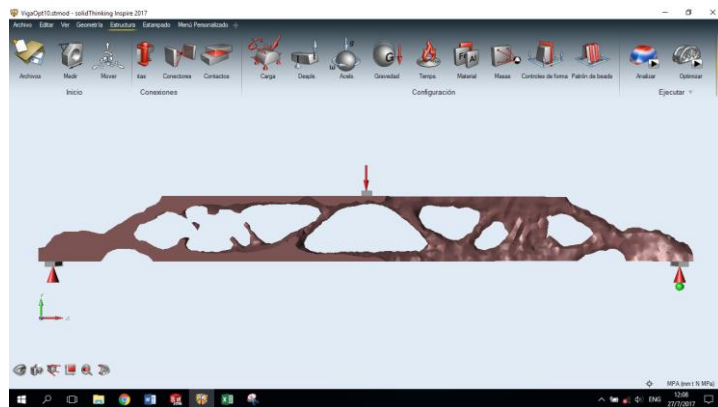


Figura 95 Viga a flexión optimizada con el 20% de masa, Material ABS

Al igual que en las optimizaciones ejecutadas anteriormente, la sección transversal tiene dos alas, una superior y otra inferior mostradas en la figura 96, sin embargo tienen un espesor más delgado que en los otros casos.

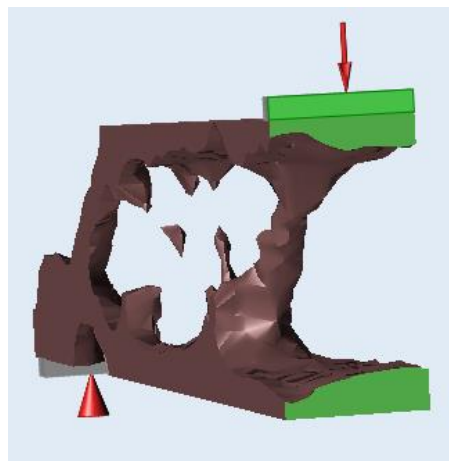


Figura 96 Corte transversal en el centro de la viga a flexión optimizada con el 20% de masa, Material ABS

En la figura 97, a 150 mm del extremo de la viga, el programa va a quitar material generando una sección transversal que se aproxima a una geometría en C, como en los casos anteriores pero con un espesor menor, en donde antes se encontraba una sección rectangular.

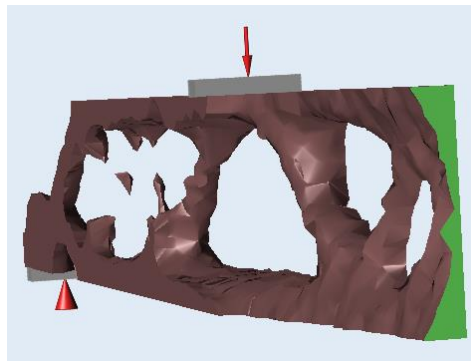


Figura 97 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 20% de masa, Material PLA

Para realizar la optimización al 50%, 30% y 20% de la masa de la pieza con el material PLA se siguió el mismo procedimiento dado anteriormente. Los parámetros para la ejecución de la optimización son los mismos que para el material ABS.

El resultado obtenido para la optimización al 50% de masa se muestra en la figura 98.

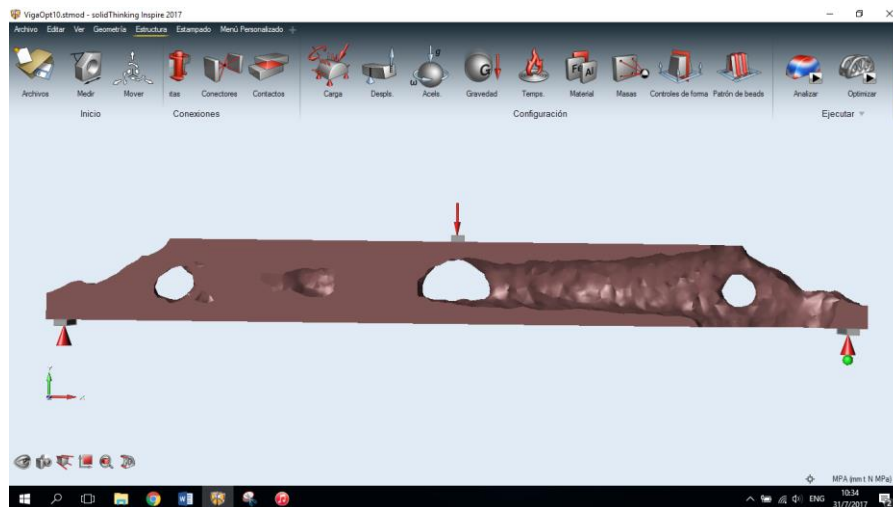


Figura 98 Viga a flexión optimizados al 50% de masa, Material PLA

La viga optimizada tiene la misma geometría que la obtenida con el material ABS y su sección transversal también tiene un ala superior y un ala inferior en el centro de la viga, como se muestra en la figura 99.

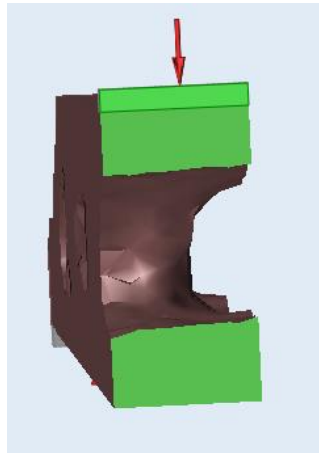


Figura 99 Corte transversal en el centro de la viga optimizada con el 50% de masa, Material PLA

Al igual que en el caso anterior con el material ABS, a 150 [mm], la viga tiene una sección transversal en forma de C mostrado en la figura 100.

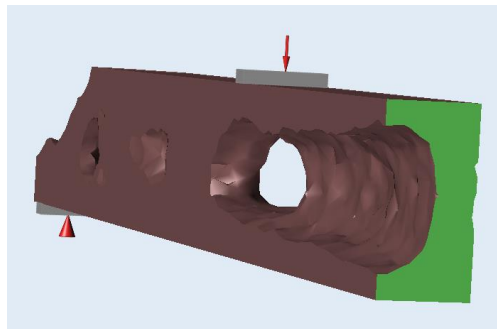


Figura 100 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 50% de masa, Material PLA

Los resultados obtenidos para la optimización con el 30% de masa de la viga se muestran en la siguiente figura 101.

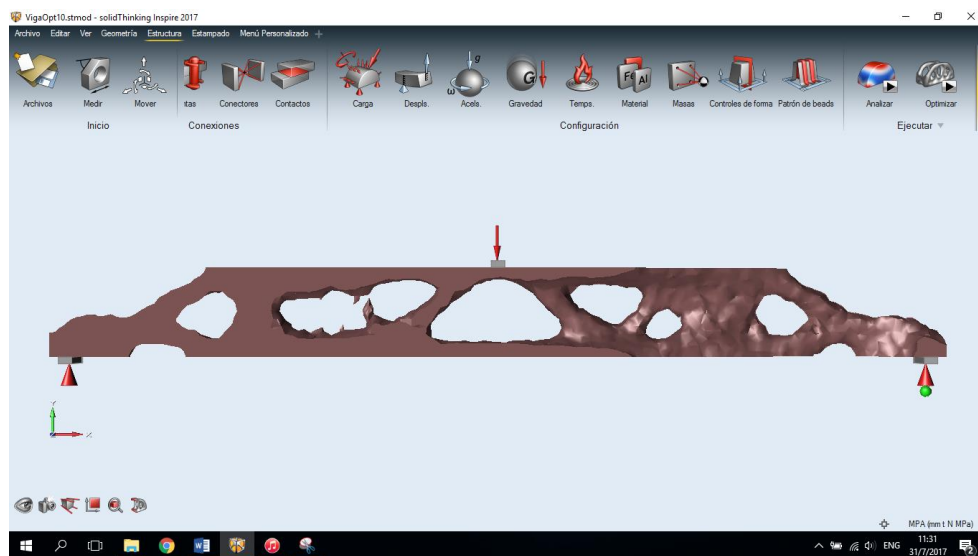


Figura 101 Viga a flexión optimizada con el 30% de masa, Material PLA

La viga optimizada tiene la misma forma que la optimización con el material ABS. Su sección transversal en el centro de la misma tiene un ala superior y una inferior pero con un menor espesor que en la optimización del 50% de masa. La sección transversal se muestra en la figura 102.

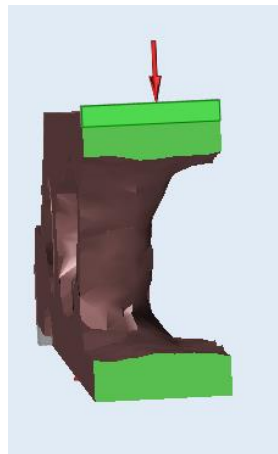


Figura 102 Corte transversal en el centro de la viga a flexión optimizada con el 30% de masa, Material PLA

Como se vio con el material ABS, la viga tiene una sección transversal en forma de C a los 150 [mm] de longitud desde el extremo y un espesor menor que en la optimización con el 50% de masa.

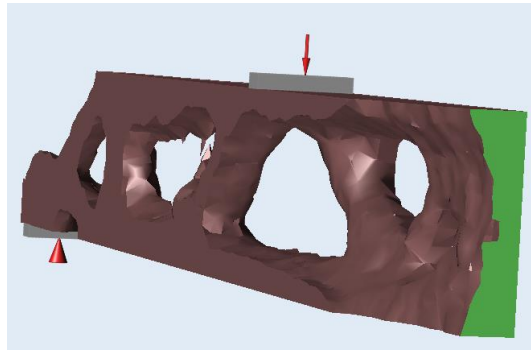


Figura 103 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 30% de masa, Material PLA

El resultado que se obtuvo en la optimización con el 20% de la masa de la viga con el material PLA se muestra en la figura 104.

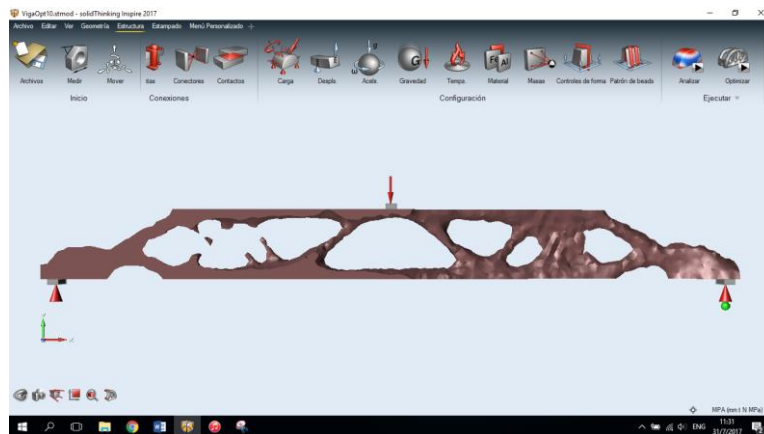


Figura 104 Viga a flexión optimizada con el 20% de masa, Material PLA

La sección transversal de la viga optimizada en el centro de la misma tiene dos alas, superior e inferior, como en las anteriores optimizaciones, sin embargo su espesor es menor como en la optimización al 20% con el ABS. Igualmente, a una longitud de 150 [mm] desde el extremo de la viga se observa que la sección transversal es en forma de C pero con un espesor más delgado. Las secciones transversales se muestran en las figuras 105 y 106.

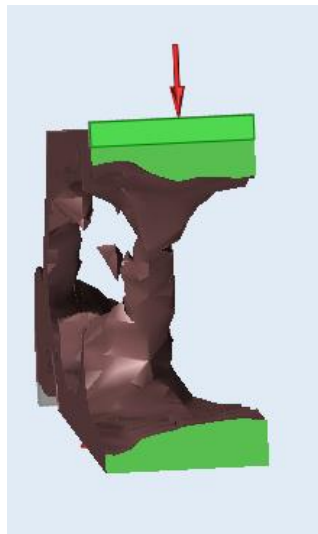


Figura 105 Corte transversal en el centro de la viga a flexión optimizada con el 20% de masa, Material PLA

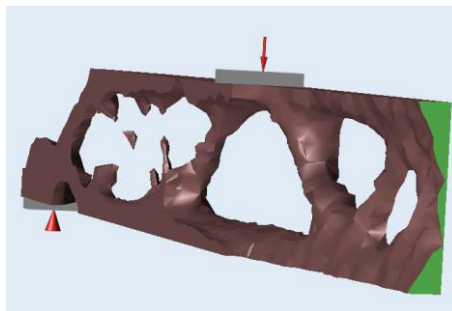


Figura 106 Corte transversal a una longitud de 150 mm desde el extremo de la viga a flexión optimizada al 20% de masa, Material PLA

4.2.3. Optimización topológica en el cilindro a torsión

El procedimiento que se realizó para la optimización topológica en el cilindro es el mismo que en el literal anterior de la viga a flexión.

Fue exportado el sólido con el formato Parasolid (.xt) y se seleccionó el material con el que se va a trabajar como se indicó anteriormente, en este caso es el material ABS. Se colocó en el dado rectangular el empotramiento y en el dado hexagonal un torque de 3200 [N mm], mostrados en la figura 107.

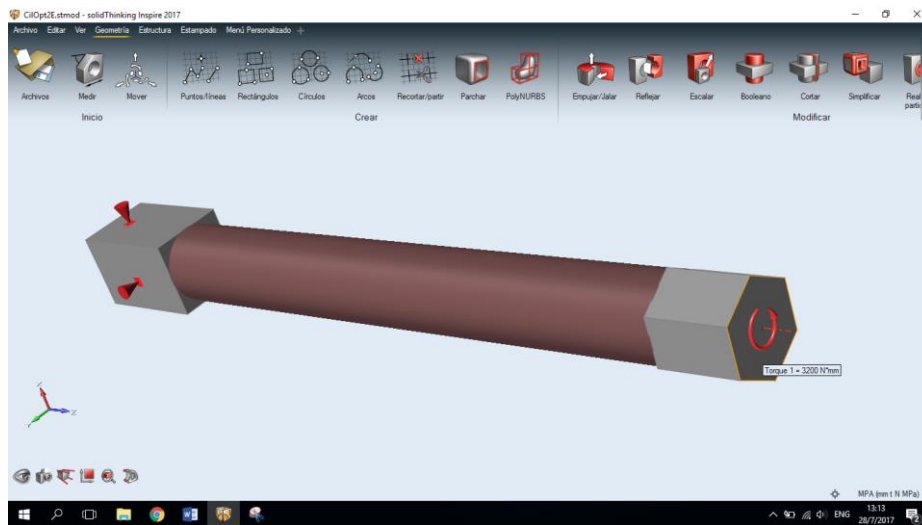


Figura 107 Aplicación de torque y apoyo en el cilindro a torsión en el programa Inspire 9.5

Se seleccionó únicamente al cilindro como espacio de diseño para realizar la optimización como se muestra en la figura 108.

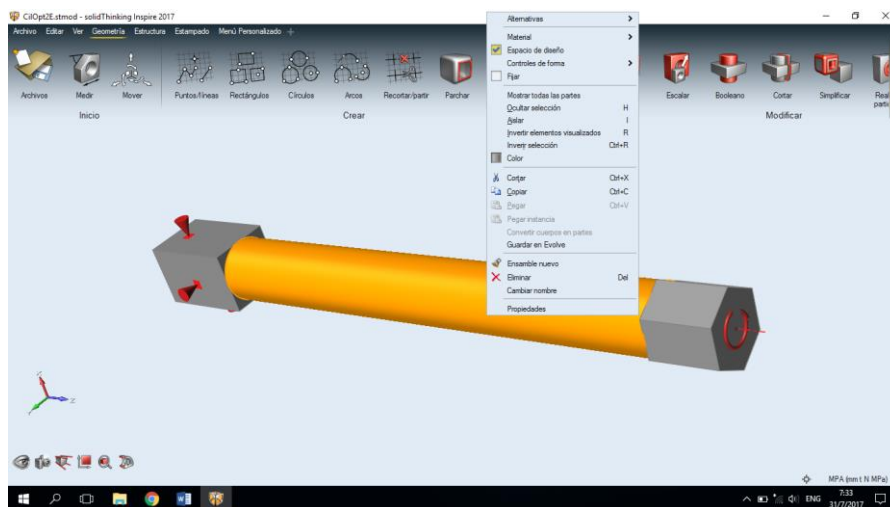


Figura 108 Selección de "Espacio de diseño" en el cilindro a torsión

Una vez colocadas las especificaciones necesarias para realizar la optimización, se procedió a optimizar el elemento. Se realizó el mismo procedimiento que en la viga a flexión, con una optimización de 50%, 30% y 20%. Para realizar la ejecución de la misma se cambió únicamente las restricciones del espesor, como medida mínima de 7.3488 [mm] por recomendación del programa.

Los resultados generados de optimización con el 50% de material se muestran en la figura 109.

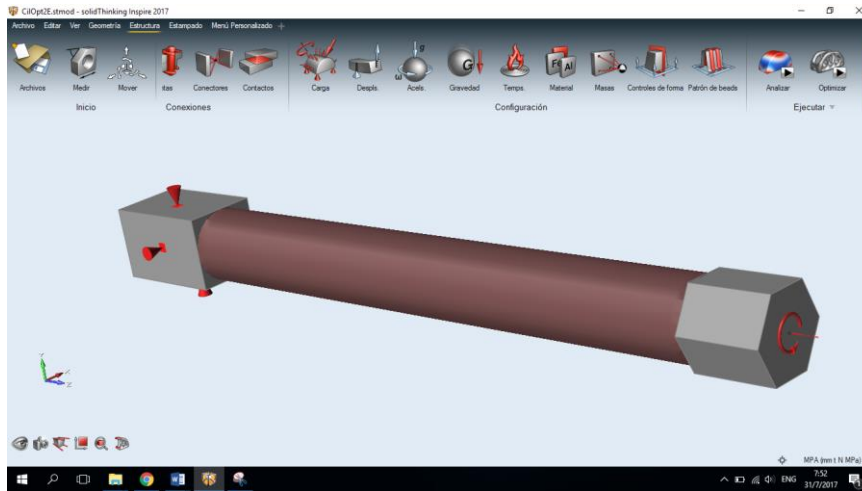


Figura 109 Cilindro a torsión optimizado al 50% de masa, Material ABS

El cilindro no muestra un cambio en su parte externa, sin embargo va a existir un cambio en su sección transversal ya que después de ser optimizado se generó un tubo con un espesor de 2.6 [mm] aproximadamente como se muestra en la figura 110.

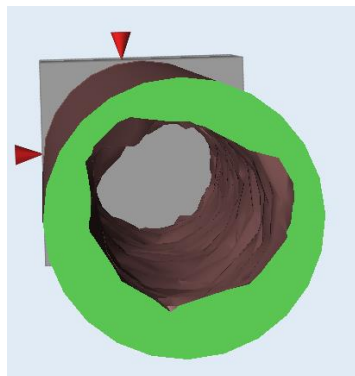


Figura 110 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 50% de masa, Material ABS

Para la optimización del 30% y 20% se colocaron los mismos parámetros en la ejecución de la misma.

El resultado obtenido en la optimización con el 30% de la masa de la pieza se encuentra en la figura 111.

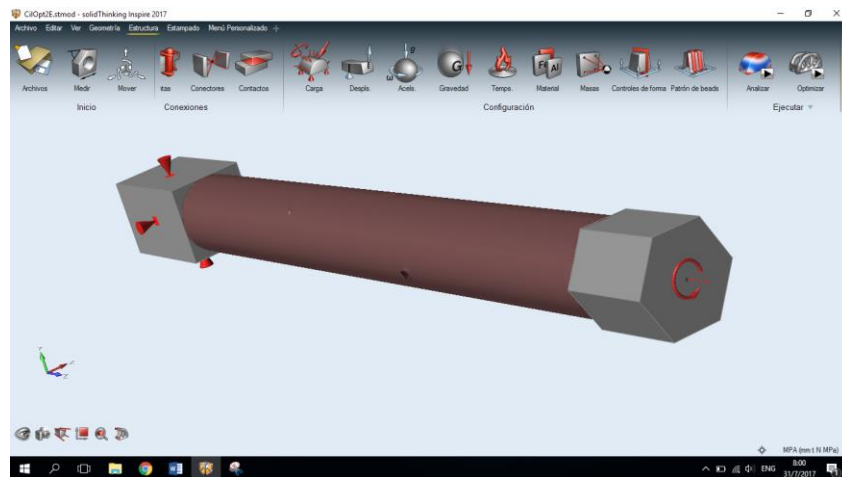


Figura 111 Cilindro a torsión optimizado al 30% de masa, Material ABS

En la parte exterior del cilindro se observa que se han generado pequeños agujeros y que la sección transversal se mantiene tubular como en la optimización anterior, sin embargo tiene un espesor menor espesor de 2 [mm] aproximadamente como se muestra en la figura 112.

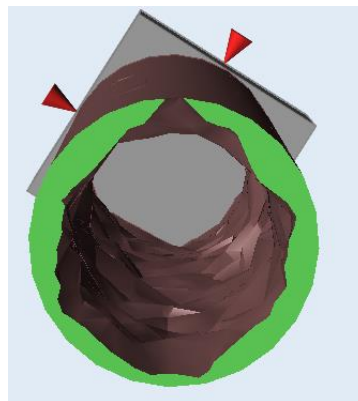


Figura 112 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 30% de masa, Material ABS

Los resultados obtenidos de la optimización con el 20% de la masa de la pieza se encuentran en la figura 113.

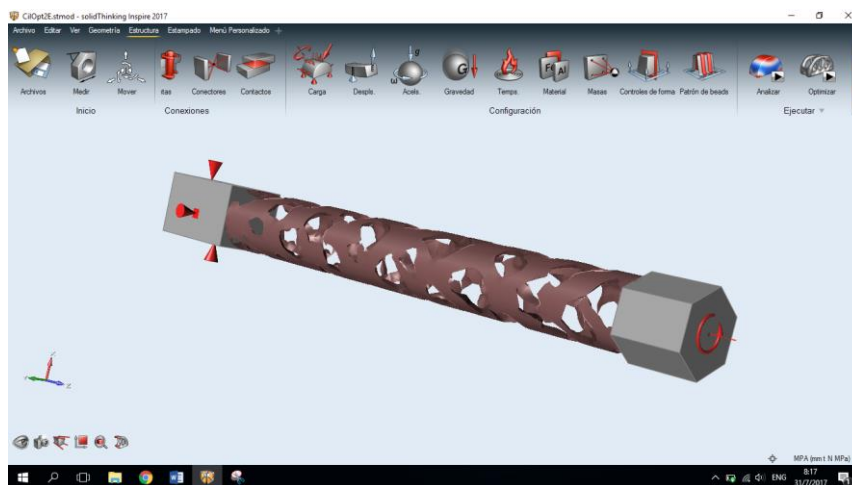


Figura 113 Cilindro a torsión optimizado al 20% de masa, Material ABS

El cilindro tiene una serie de agujeros formando una hélice como se muestra en la figura anterior, así mismo, su sección transversal es tubular con un espesor de 1.4 [mm] como se muestra en la figura 114.

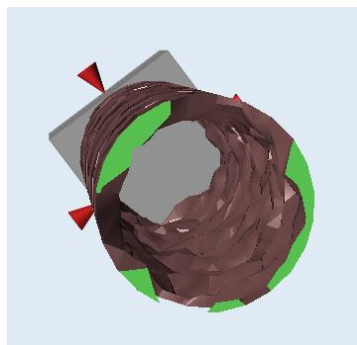


Figura 114 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 20% de masa, Material ABS

El mismo procedimiento se lo realizó para la optimización topológica con el material PLA. Los parámetros utilizados en la ejecución fueron los mismos que en el ABS. Igualmente se realizó la optimización con el 50%, 30% y 20% de la masa de la pieza.

El resultado obtenido optimizando la pieza con el 50% de la masa se muestra a continuación en la figura 115.

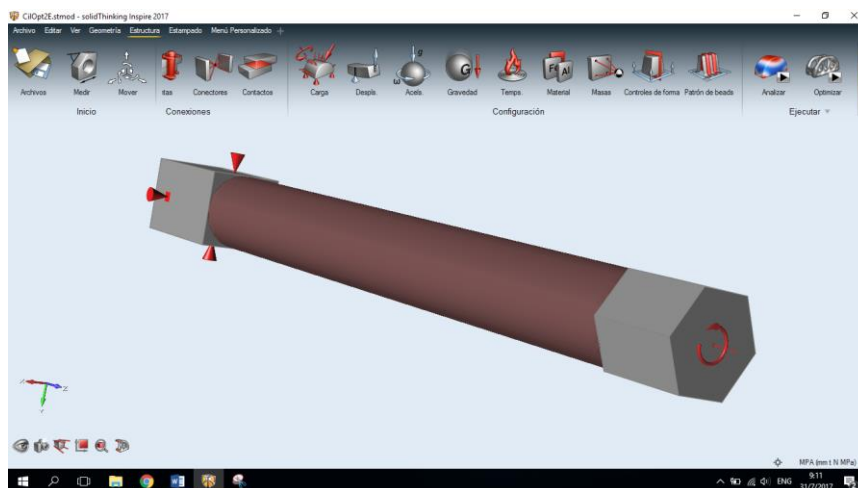


Figura 115 Cilindro a torsión optimizado al 50% de masa, Material PLA

Al igual que con el material ABS, no se muestra un cambio en el exterior de la pieza y la sección transversal de la misma es tubular con el mismo espesor obtenido anteriormente de 2.6 [mm] aproximadamente.

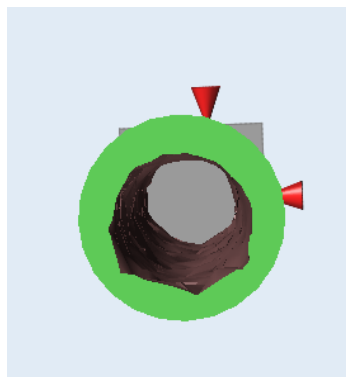


Figura 116 Figura 4. 34 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 50% de masa, Material PLA

El resultado de la optimización con el 30% de la masa de la pieza se muestra en la figura 117.

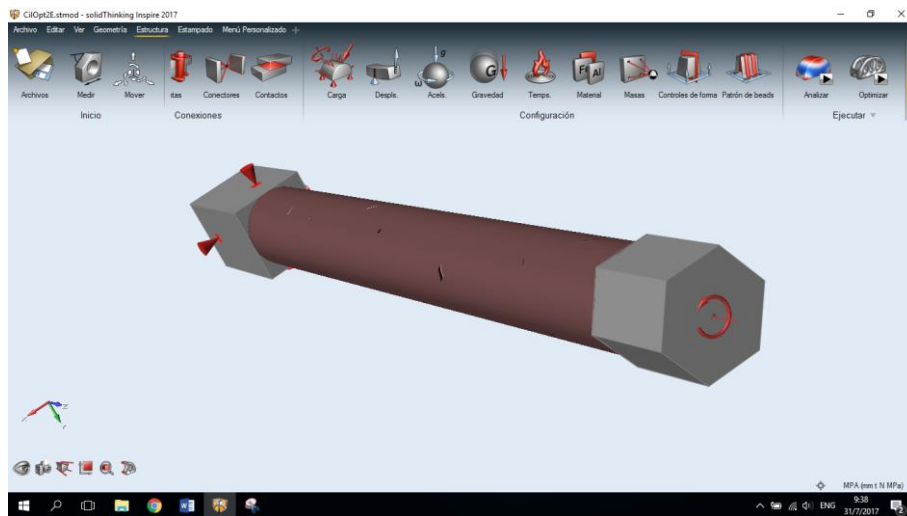


Figura 117 Cilindro a torsión optimizado al 30% de masa, Material PLA

Como se observa los resultados para la optimización con el 30% son parecidos a los obtenidos con el material ABS. En la parte exterior se forman pequeños agujeros, mientras que la sección transversal es tubular con un espesor de aproximadamente 2 [mm].

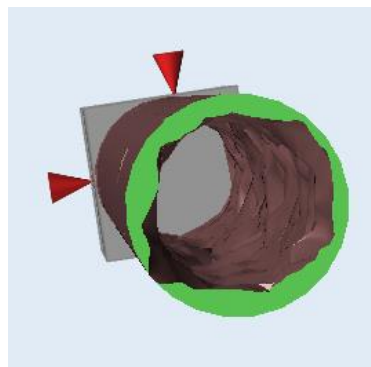


Figura 118 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 30% de masa, Material PLA

El resultado que se obtuvo de la optimización al 20% de masa de la pieza con el material PLA se muestra en la figura 119.

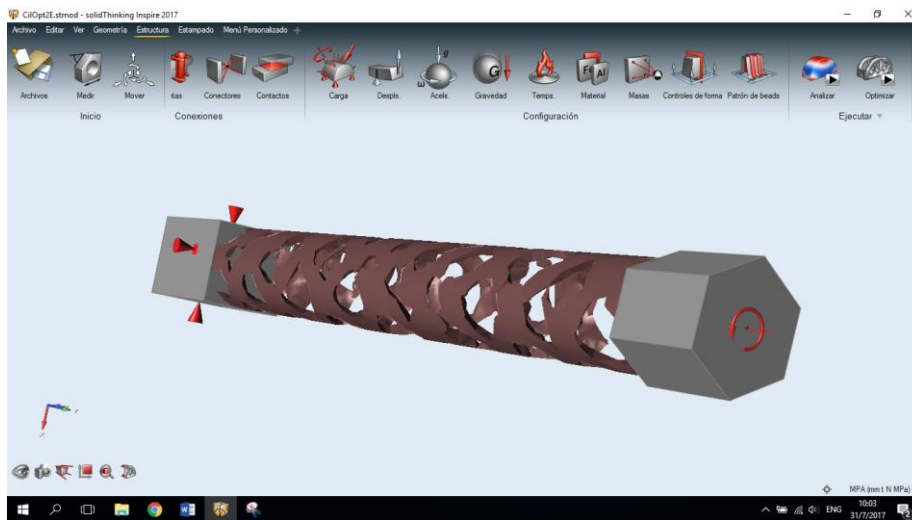


Figura 119 Cilindro a torsión optimizado al 20% de masa, Material PLA

Se observa que la geometría optimizada del cilindro no varía con respecto al material ABS, y tiene el mismo espesor de 1.4 [mm] aproximadamente.

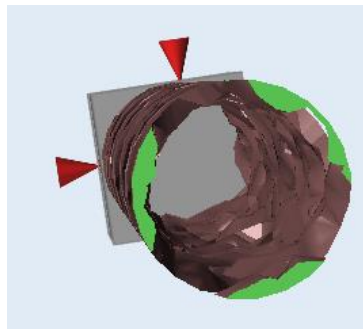


Figura 120 Corte transversal en el centro del cilindro optimizado con el 20% de masa, Material ABS

4.2.4. Optimización topológica en el prisma cuadrado a flexo torsión.

El estudio de optimización topológica en el prisma cuadrado se lo realizó con el mismo procedimiento que en la viga a flexión y el cilindro a torsión. Se exportó el sólido previamente guardado en el formato Parasolid (.xt) y se procedió a colocar el material a utilizar, las cargas y apoyos.

Primeramente se trabajó con el material ABS. En el dado rectangular del prisma se colocó el empotramiento y en la arista lateral extrema se colocó una carga de 50 [N] como se muestra en la figura 121. Se seleccionó como espacio de diseño al prisma cuadrado.

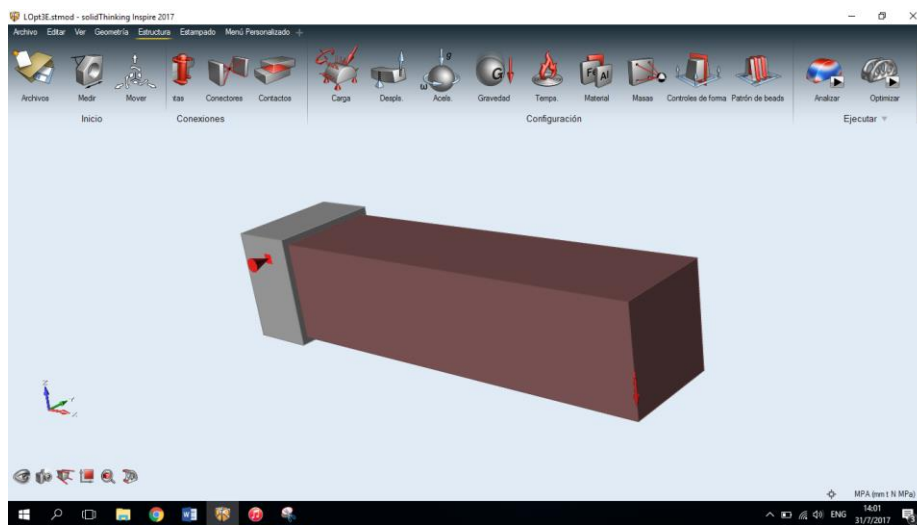


Figura 121 Aplicación de la carga y apoyo, y selección del “Espacio de diseño” en el prisma cuadrado a flexo torsión en el programa Inspire 9.5

Ya colocadas las especificaciones necesarias para realizar la optimización topológica se procedió a optimizar. Al igual que en las geometrías anteriores, los parámetros para la ejecución de la optimización son los mismos, excepto en la restricción de espesor que para este caso es de 9.5546 [mm].

La optimización ejecutada al 50% de la masa de la pieza se muestra en las figuras 122 y 123.

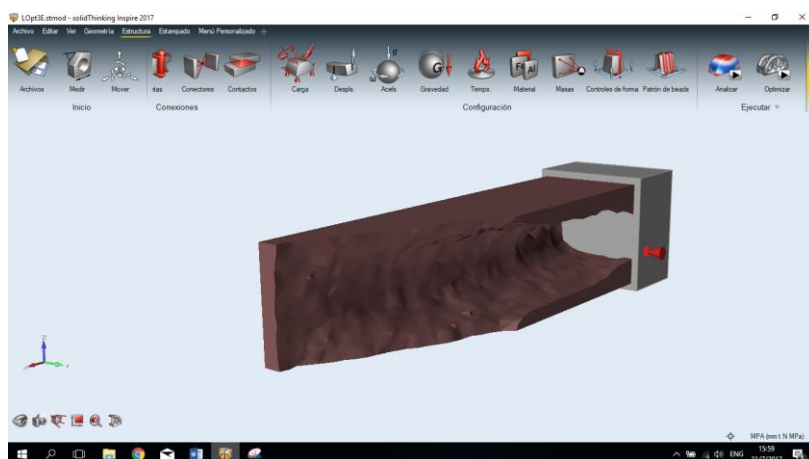


Figura 122 Vista trasera del prisma cuadrado al 50% de masa, Material ABS

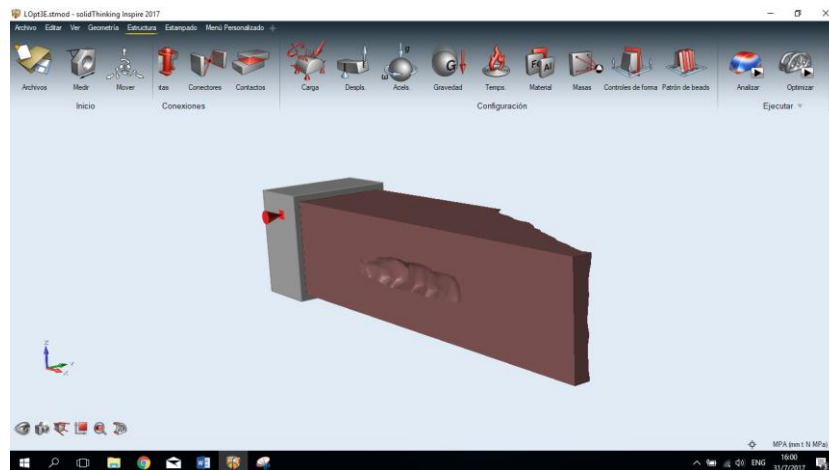


Figura 123 Vista delantera del prisma cuadrado al 50% de masa, Material ABS

Se observa que la optimización topológica genera un vacío en el interior del prisma con una sección transversal en un extremo en forma de C y en el otro extremo en forma rectangular. También se observa que se generó una socavadura en la parte externa del prisma optimizado.

En la optimización con el 30% de la masa de la pieza se obtuvo la siguiente geometría optimizada que se muestra en las figuras 124 y 125.

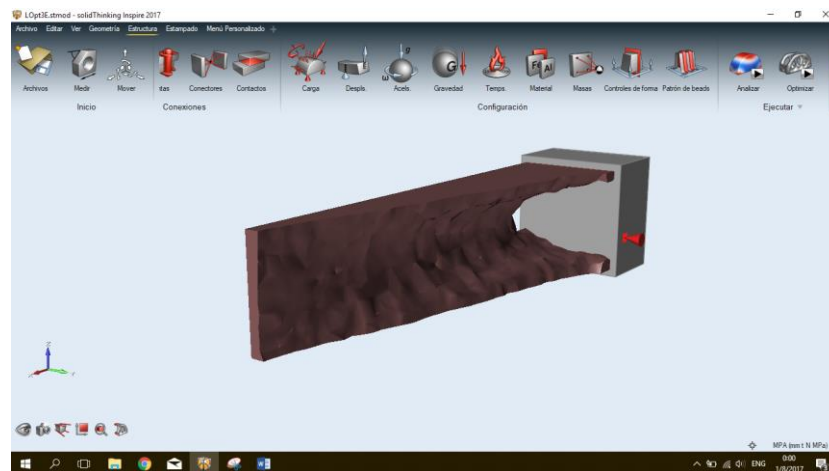


Figura 124 Vista trasera del prisma cuadrado al 30% de masa, Material ABS

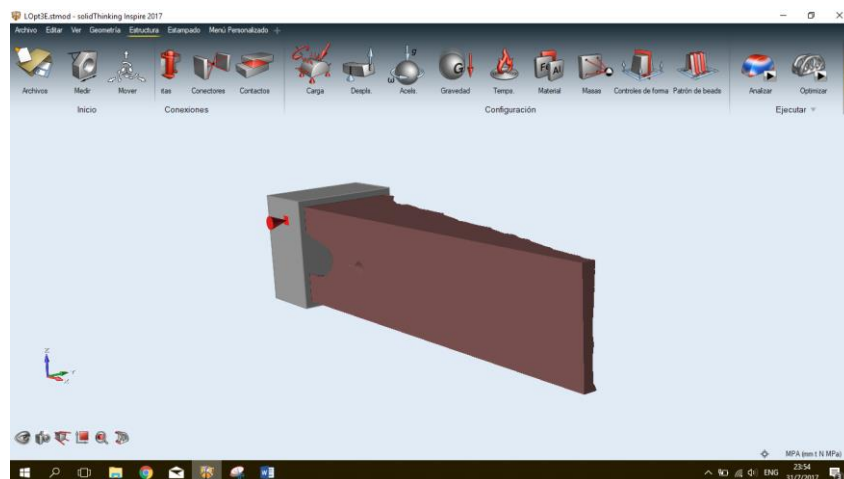


Figura 125 Vista delantera del prisma cuadrado al 30% de masa, Material ABS

En el extremo del prisma se observa que la sección transversal tiene dos alas, una superior y una inferior. A medida que se avanza al centro del mismo se va generando una sección transversal en forma de C y en el otro extremo, donde se encuentra aplicada la carga, se tiene una sección transversal rectangular.

Para la optimización al 20% de la masa, se puede observar el resultado obtenido en las figuras 126 y 127.

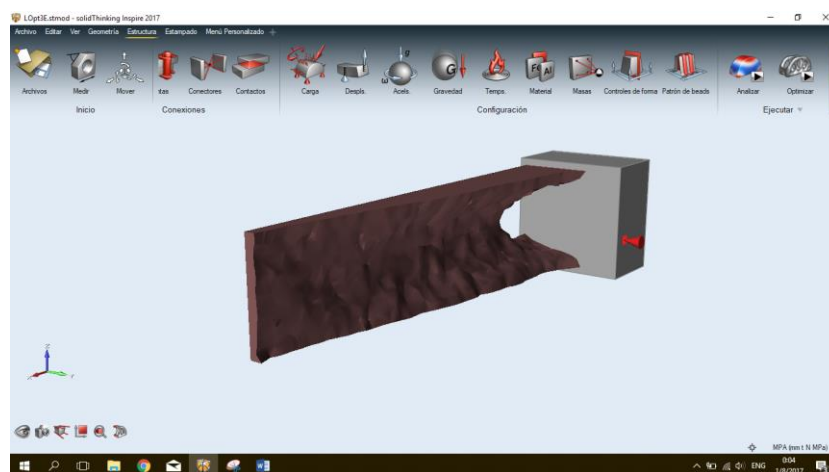


Figura 126 Vista trasera del prisma cuadrado al 20% de masa, Material ABS

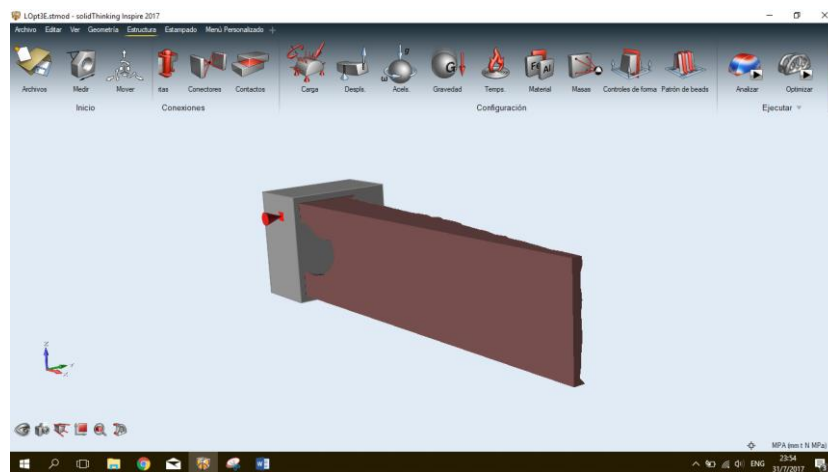


Figura 127 Vista delantera del prisma cuadrado al 20% de masa, Material ABS

Se observa que este porcentaje de optimización tiene una geometría parecida a la obtenida con el 30%, pero con un espesor menor.

Para ejecutar la optimización topológica con el material PLA, se siguen los pasos anteriormente realizados con el ABS y se colocan los mismos parámetros recomendados por el programa para la ejecución de la misma.

El resultado que se obtuvo al momento de realizar la optimización con el 50% de masa de la pieza se muestran en las figuras 128 y 129.

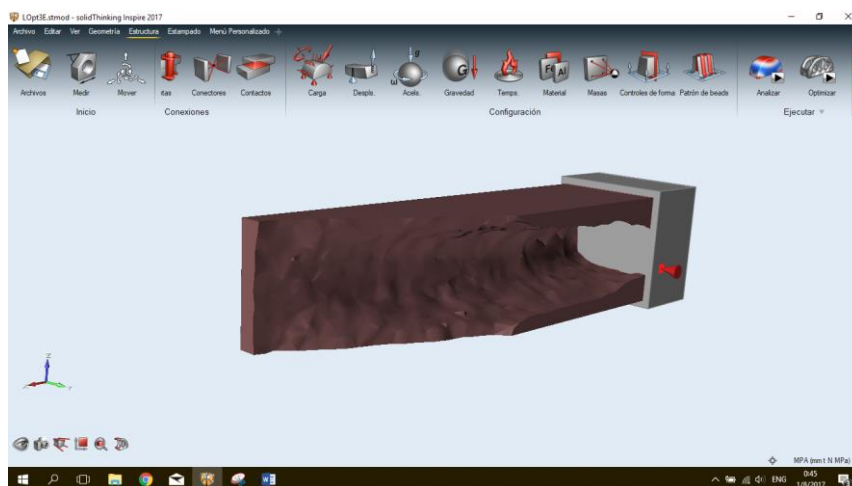


Figura 128 Vista trasera del prisma cuadrado al 50% de masa, Material PLA

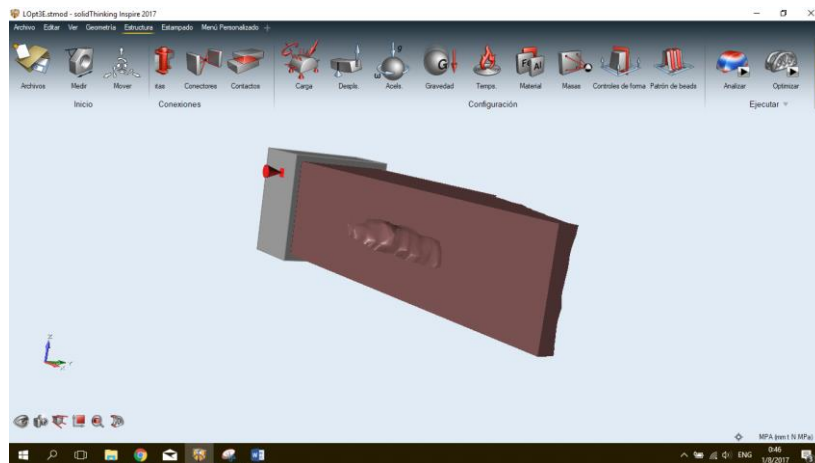


Figura 129 Vista delantera del prisma cuadrado al 50% de masa, Material PLA

El prisma optimizado al 50% de masa con material PLA tiene la misma geometría vista en la optimización con el material ABS.

Una vez realizada la optimización anterior, se procedió a optimizar el prisma con el 30% de masa del elemento, el resultado se muestran en las figuras 130 y 131.

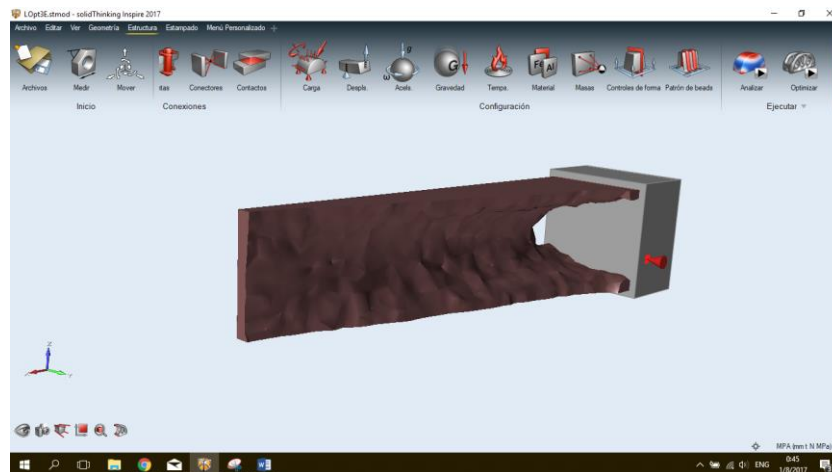


Figura 130 Vista trasera del prisma cuadrado al 30% de masa, Material PLA

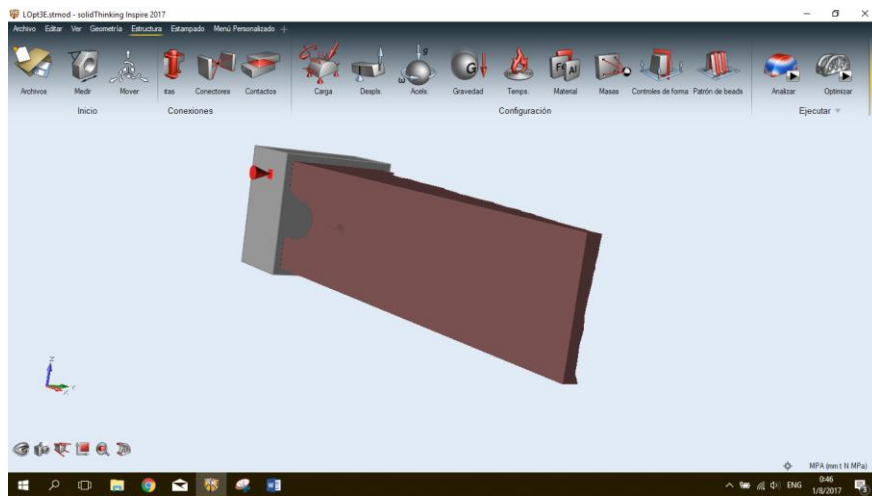


Figura 131 Vista delantera del prisma cuadrado al 30% de masa, Material PLA

Al igual que en el caso anterior, la geometría optimizada es parecida en su totalidad a la obtenida con el material ABS.

Se realiza la optimización con el 20% de masa del elemento, y el resultado obtenido al momento de optimizar se encuentra en las figuras 132 y 133.

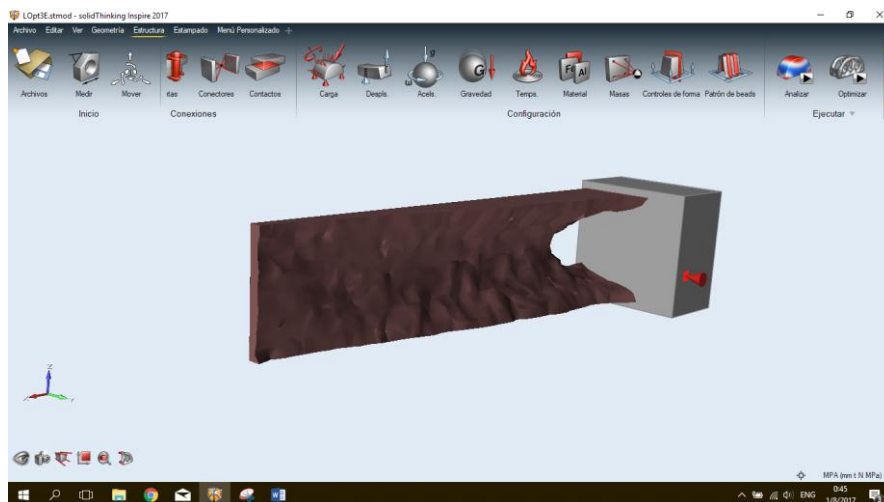


Figura 132 Vista trasera del prisma cuadrado al 20% de masa, Material PLA

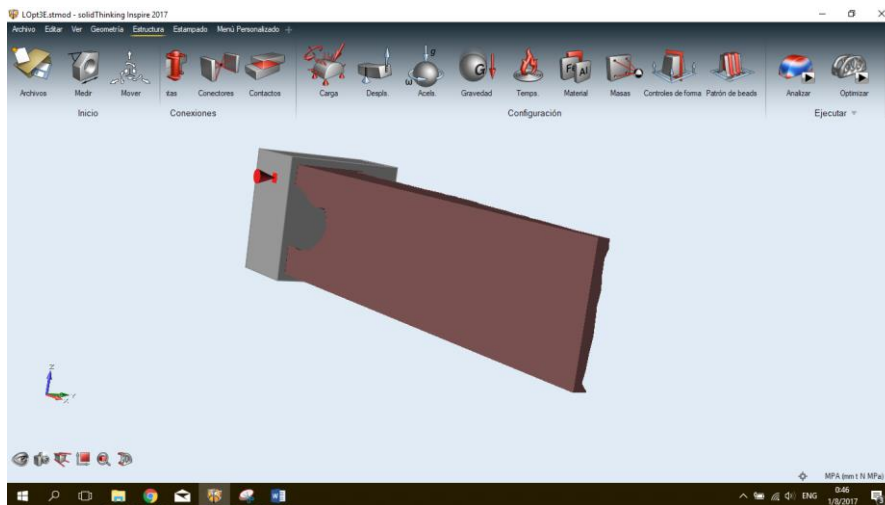


Figura 133 Vista delantera del prisma cuadrado al 20% de masa, Material PLA

Se observa que la geometría optimizada no ha cambiado en nada a la generada con el material ABS. Su espesor como su forma son totalmente parecidas.

4.3. Análisis del resultado obtenido en la utilización del Software

Todas las geometrías generadas por la optimización topológicamente al 50%, 30% y 20% han sido simuladas en el programa AAWW para conocer su comportamiento mecánico que tienen cada una de las piezas según las cargas que se le apliquen.

Cada una de las optimizaciones resultantes ha sido guardada en el formato “STL” para poder ser abierta en el programa SSWW y posteriormente ser guardado en el formato Parasolid (.xt). Como la geometría optimizada de los elementos es muy compleja para realizar el mallado, se ha optado por utilizar para la simulación el programa AAWW. Cada simulación se lo realizó con el material ABS y PLA.

4.3.1. Simulación en elementos optimizados topológicamente de la viga rectangular a flexión

Las vigas rectangulares optimizadas se encuentran simplemente apoyadas y con una carga aplicada en el centro de la misma.

4.3.1.1. Viga rectangular optimizada al 50% de la masa del elemento

La carga aplicada en la viga optimizada al 50% de la masa es de 500 [N] como se lo realizó en la viga con el 100% de masa.

Material ABS

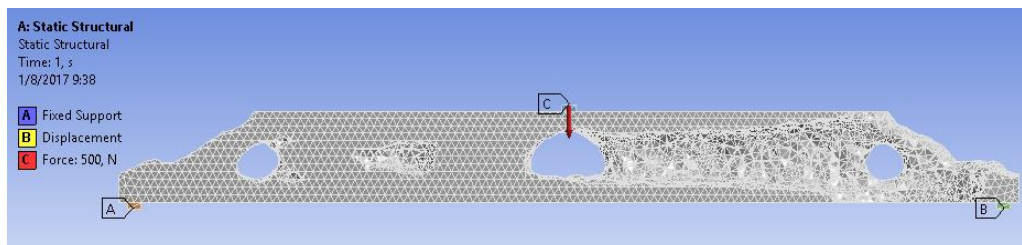


Figura 134 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 50% de masa

Se analizó los resultados obtenidos del esfuerzo [MPa], deformación unitaria y deflexión [mm] por medio de un análisis de convergencia en la viga al 50% de masa.

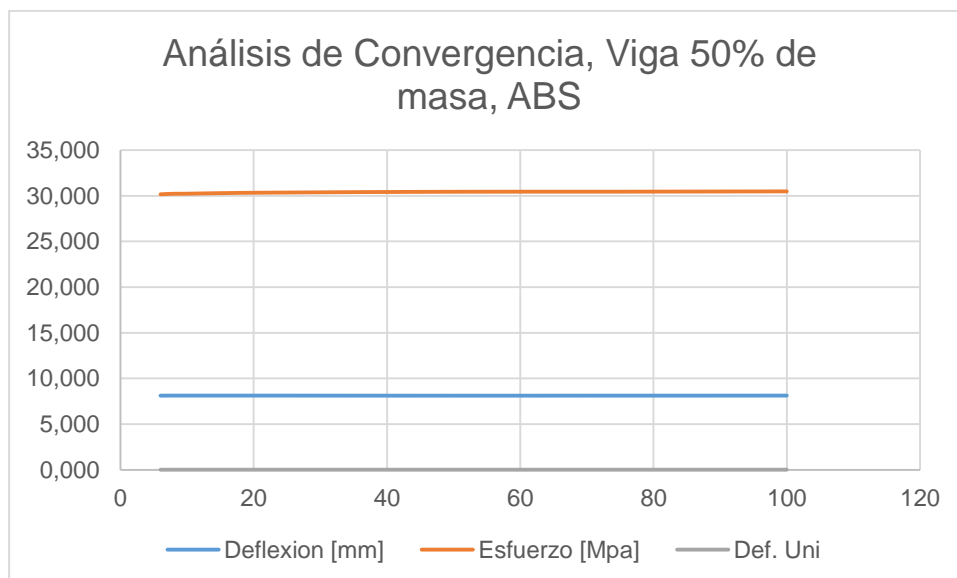


Figura 135 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 50% de masa, ABS

- **Esfuerzo**

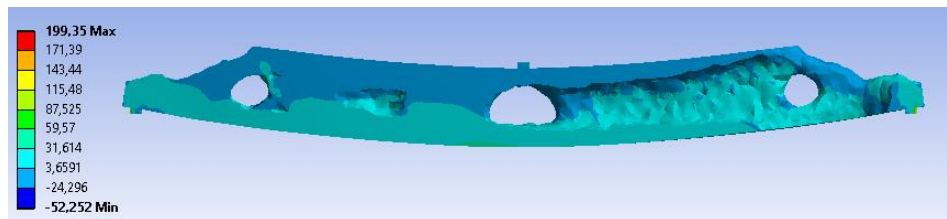


Figura 136 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 50% de masa, Material ABS

En la figura 136 se observa que la viga optimizada tiene un esfuerzo principal máximo aproximado de 30.16 [MPa] en el centro de la misma. En los extremos de la viga el valor es de 16.033 [MPa] aproximadamente.

- **Deformación Unitaria**

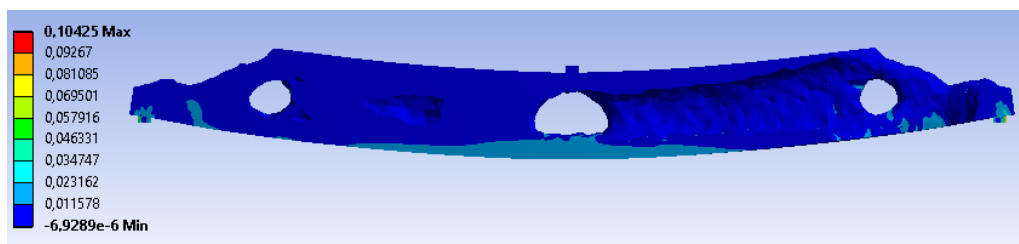


Figura 137 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 50% de masa, Material ABS

La deformación unitaria máxima en el centro de la viga observada en la figura 137 tiene un valor de 0.0182, mientras que en los extremos, izquierdo y derecho, el valor se encuentra entre 0.0115 y 6.9289×10^{-6} .

- **Deflexión**

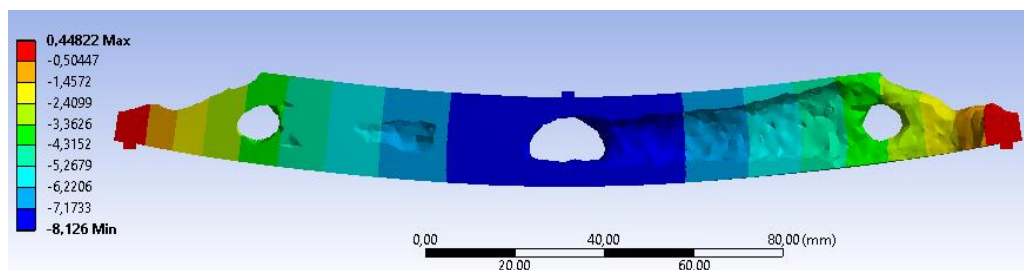


Figura 138 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 50% de masa, Material ABS

Se observa en la figura 138 que la deflexión máxima en el centro de la viga optimizada es de 8.124 [mm], mientras en los extremos donde se encuentran los apoyos el valor es de 0.4482 [mm].

Material PLA

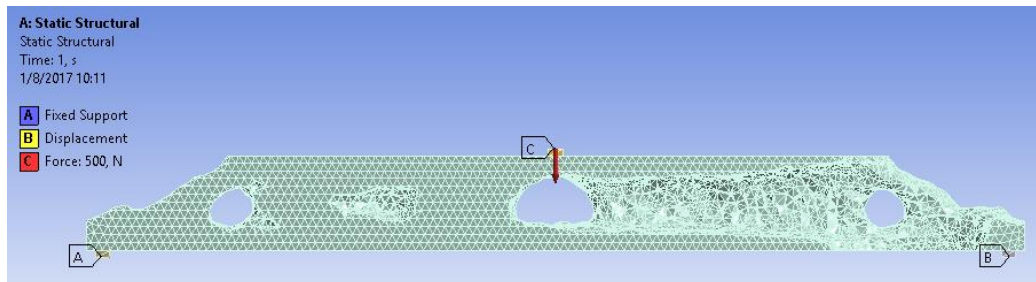


Figura 139 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 50% de masa, Material PLA

Los resultados de esfuerzo, deformación unitaria y deflexión en la viga optimizada con el 50% de la masa con un análisis de convergencia, se muestran a continuación:

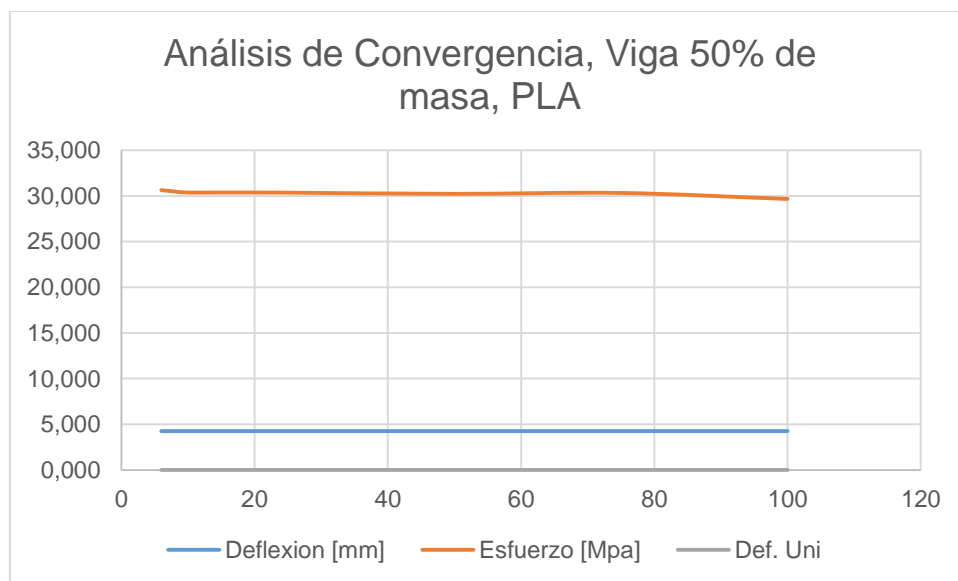


Figura 140 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 50% de masa, PLA

- **Esfuerzo**

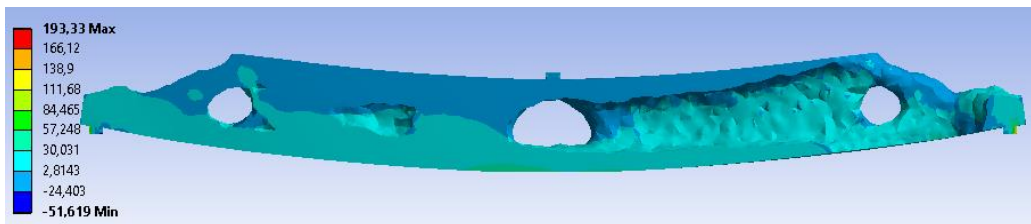


Figura 141 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 50% de masa, Material PLA

El resultado máximo del esfuerzo principal en el centro del viga es de 30.64 [MPa], como se observa en la figura 141, mientras que en los extremos el valor es de 2.8143 [MPa] aproximadamente.

- **Deformación Unitaria**

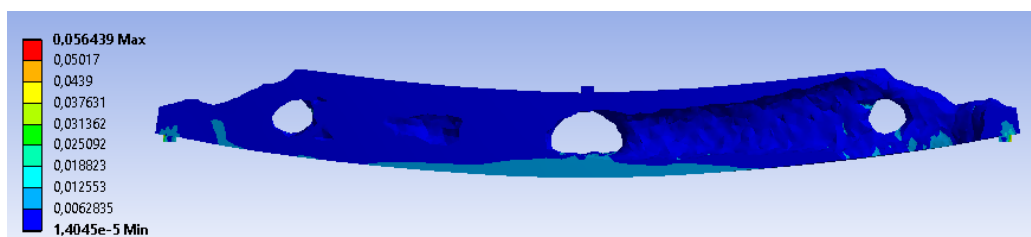


Figura 142 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 50% de masa, Material PLA

La deformación unitaria máxima en el centro de la viga que se muestra en la figura 142 se encuentra en el valor de 0.0098. En los extremos la deformación unitaria es de 1.405×10^{-5} .

- **Deflexión**

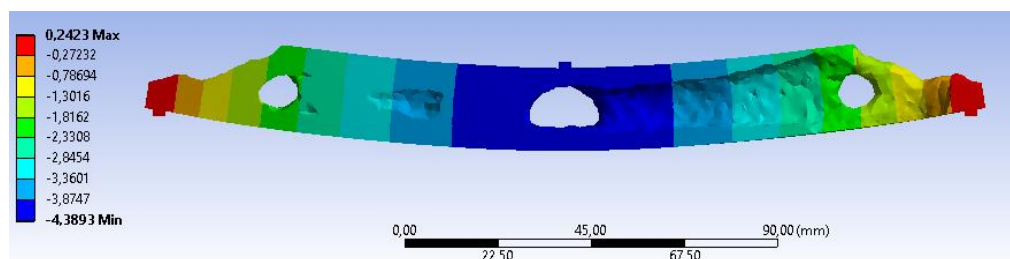


Figura 143 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 50% de masa, Material PLA

La deflexión máxima en el centro de la viga donde fue aplicada la carga es de 4.26 [mm] mostrada en la figura 143 y en los extremos tiene una deflexión de 0.243 [mm].

4.3.1.2. Viga rectangular optimizada al 30% de la masa del elemento Material ABS

Por pruebas preliminares realizadas en la viga optimizada con el 30% de la masa y material ABS, se consideró aplicar en la simulación una carga de 100 [N].

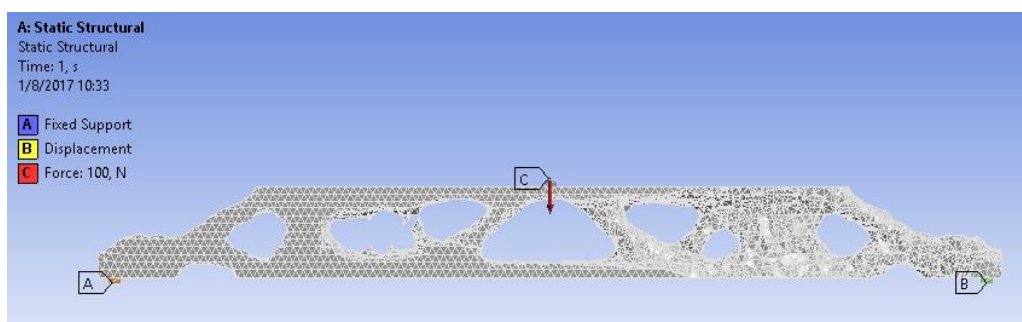


Figura 144 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 30% de masa

Los resultados que se obtuvieron en la simulación con la viga optimizada al 30% de la masa con un análisis de convergencia se muestran a continuación:

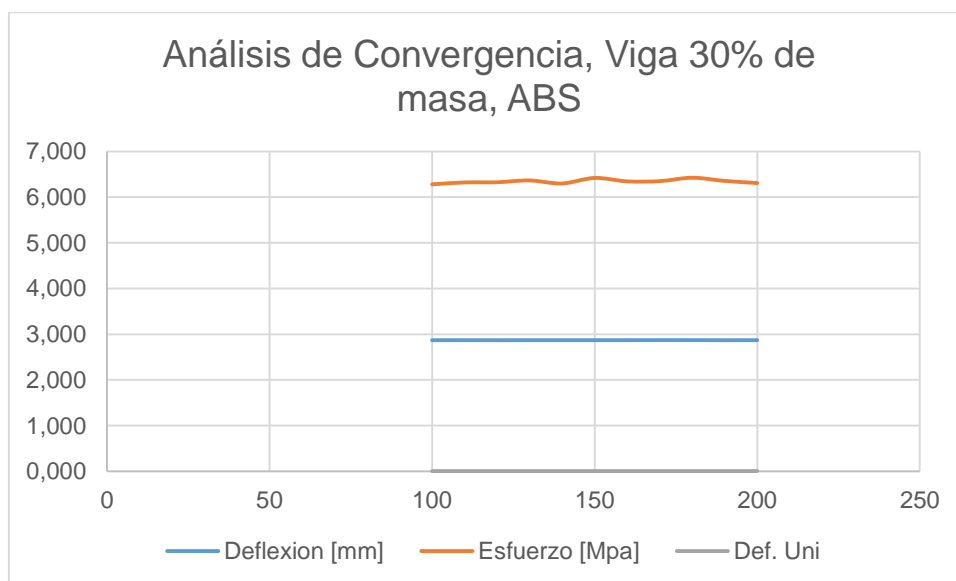


Figura 145 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 30% de masa, ABS

- **Esfuerzo**

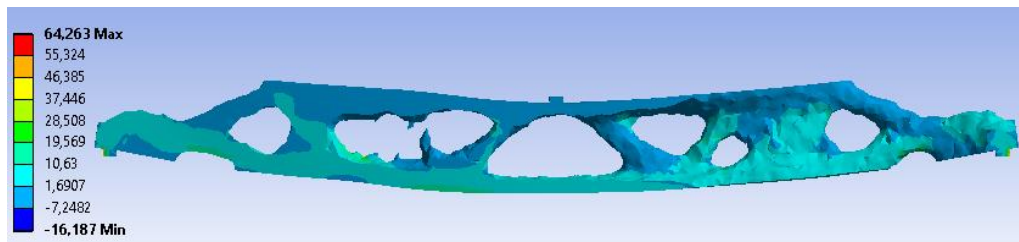


Figura 146 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 30% de masa, Material ABS

En la figura 146 se observa que en el centro de la viga se tiene un esfuerzo principal máximo de 6.28 [MPa]. En los extremos de la misma el esfuerzo se encuentra entre los valores de 10.63 y -7.2482 [MPa].

- **Deformación Unitaria**

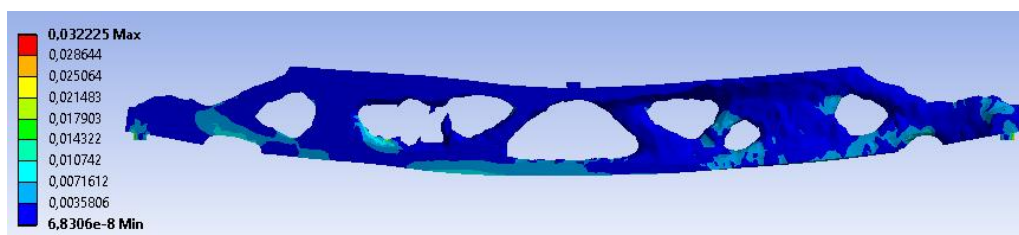


Figura 147 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 30% de masa, Material ABS

La deformación unitaria máxima en el centro de la viga que se muestra en la figura 147 es de 0.0038, y en los extremos de la misma es de 6.8306×10^{-8} .

- **Deflexión**

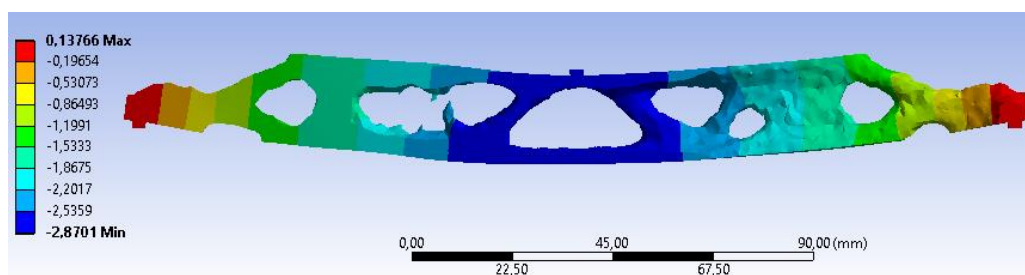


Figura 148 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 30% de masa, Material ABS

La deflexión máxima obtenida en la simulación en el centro de la viga, se muestra en la figura 148 donde se observa que el valor es de 2.87 [mm], y la

deflexión en los extremos de la viga, donde se aplican los apoyos, es de 0.13766 [mm].

Material PLA

Al igual que en el ABS, en la viga optimizada con el 30% de la masa y material PLA se consideró aplicar en la simulación una carga de 151 [N] ya que se realizaron pruebas preliminares en la misma.

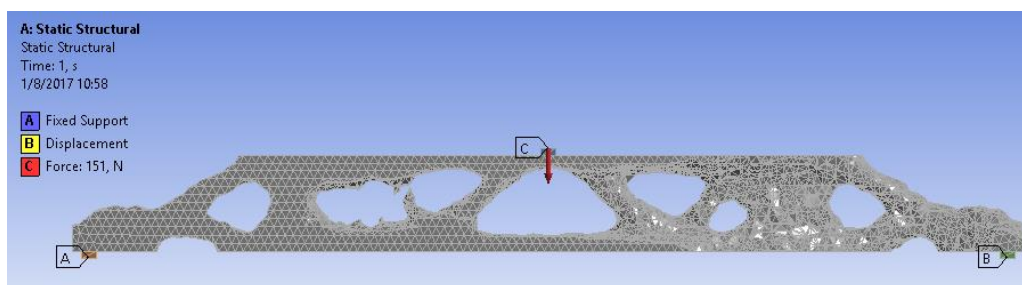


Figura 149 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 30% de masa, Material PLA

Los resultados obtenidos en la simulación de la viga optimizada realizando un análisis de convergencia se encuentran a continuación:

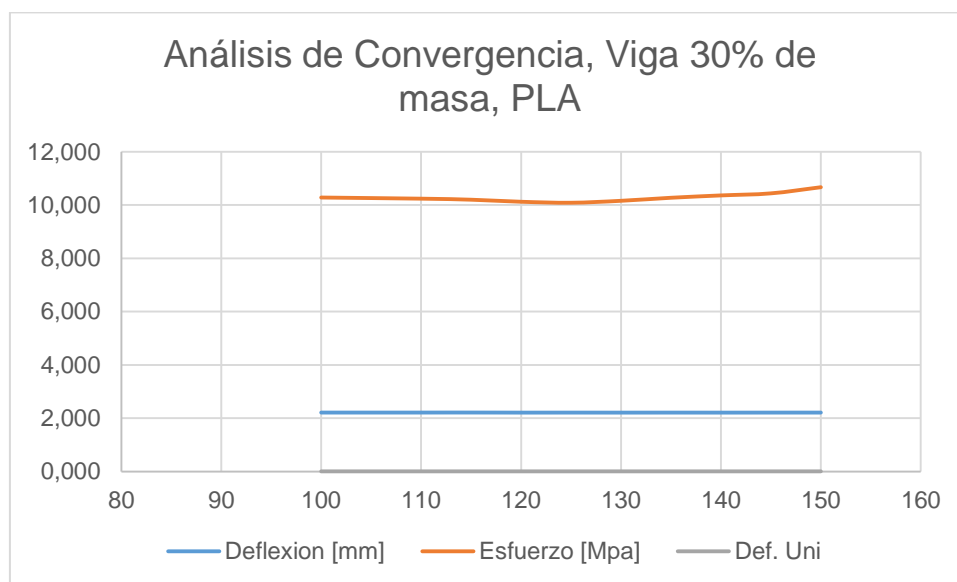


Figura 150 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 30% de masa, PLA

- **Esfuerzo**

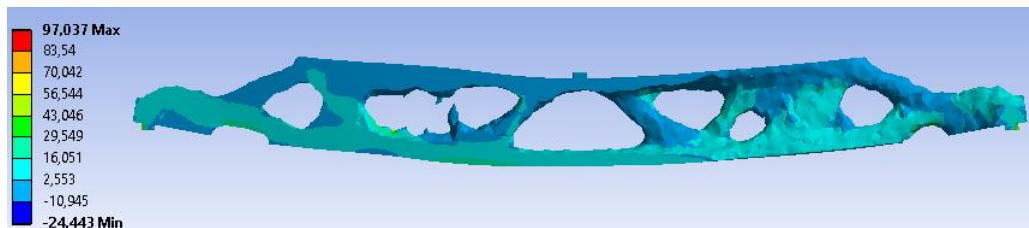


Figura 151 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA

El esfuerzo máximo en el centro de la viga que se generó en la simulación tiene el valor de 10.28 [MPa] como se muestra en la figura 151. Mientras que en los extremos se tienen valores entre 16.051 y -10.945 [MPa].

- **Deformación Unitaria**

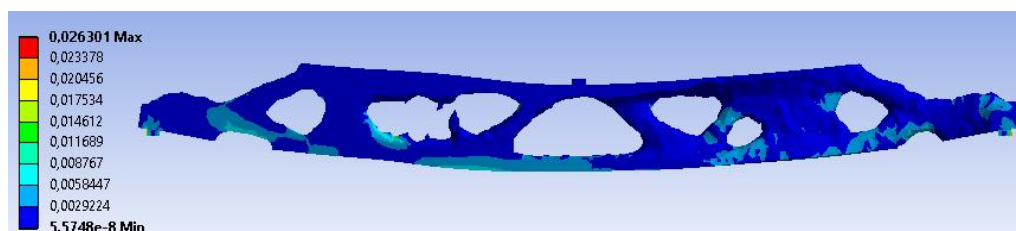


Figura 152 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA

En la figura 152 se muestra que la deformación unitaria máxima en el centro de la viga tiene un valor de 0.0034 y en los extremos de la misma se tiene un valor entre 0.00292 y 5.5748×10^{-8} .

- **Deflexión**

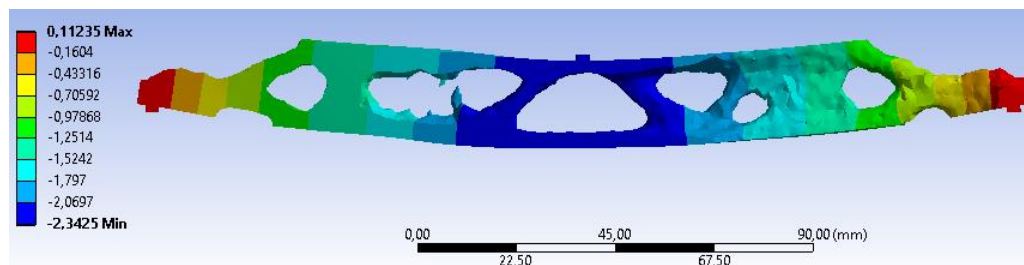


Figura 153 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA

La deflexión máxima que tiene la viga optimizada al 30% de masa es de 2.21 [mm] en el centro como se muestra en la figura 153. En los extremos, donde se encuentran los apoyos, la deflexión es de 0.11235 [mm].

4.3.1.3. Viga rectangular optimizada al 20% de la masa del elemento Material ABS

Para la simulación de la viga optimizada al 20% con el material ABS se consideró aplicar una carga de 20 [N], ya que se realizaron pruebas preliminares aplicadas en la viga.

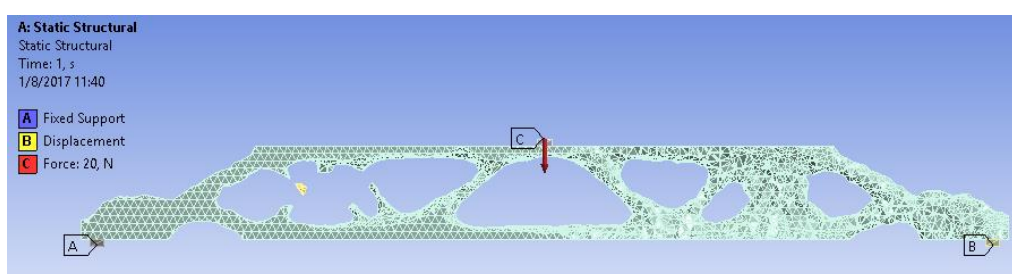


Figura 154 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 20% de masa

Una vez realizada la simulación se obtuvo los resultados mostrados a continuación con un análisis de convergencia realizado:

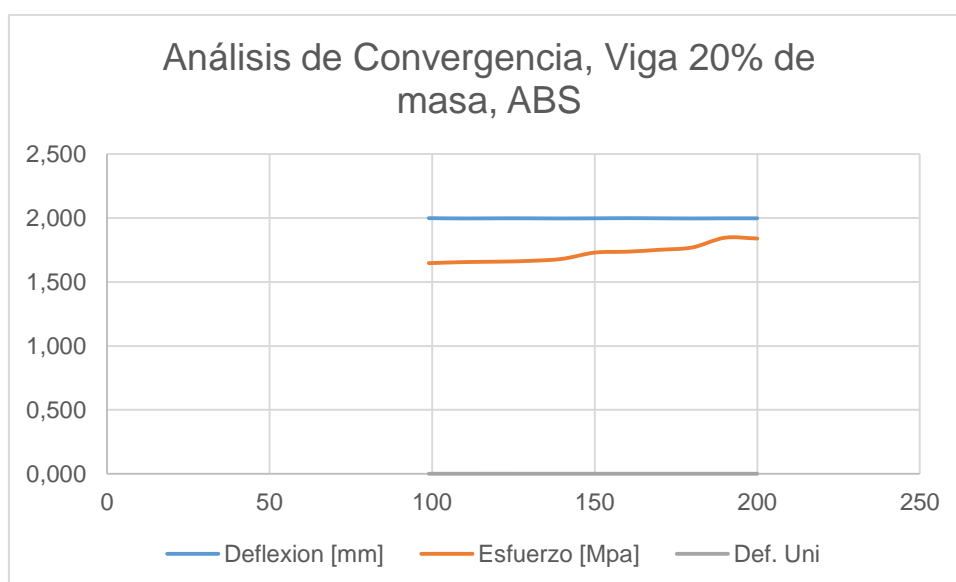


Figura 155 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 20% de masa, ABS

- **Esfuerzo**

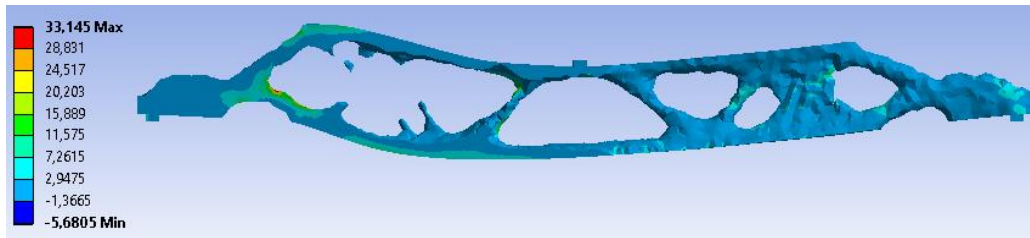


Figura 156 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 20% de masa, Material ABS

En la figura 156 se observa que el esfuerzo máximo generado es de 33.145 [MPa] y se encuentra en el extremo izquierdo de la viga. Mientras que en el centro el esfuerzo el valor es de 1.648 [MPa]

- **Deformación Unitaria**

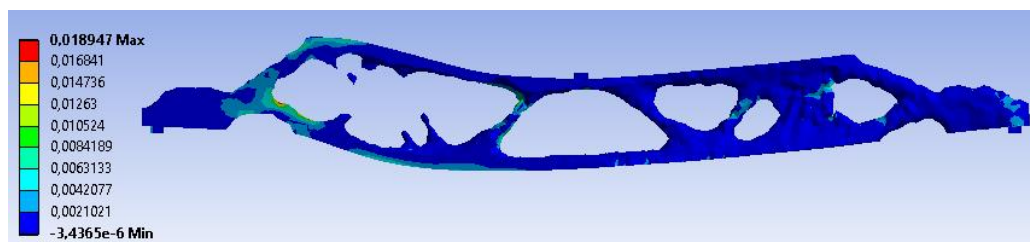


Figura 157 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 20% de masa, Material ABS

La deformación unitaria máxima se encuentra en el extremo izquierdo de la viga, mostrada en la figura 157, y tiene un valor de 0.00107. En el centro de la misma se obtuvo una deformación unitaria de 1.2079×10^{-3} .

- **Deflexión**

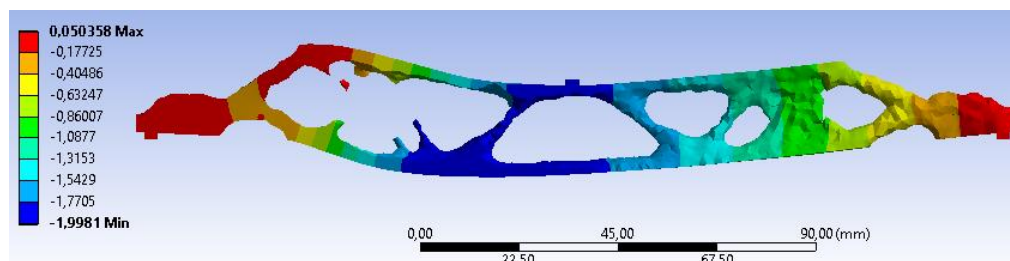


Figura 158 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 20% de masa, Material ABS

En la figura 158 se muestra que existe una deflexión máxima hacia abajo en el centro de la viga con un valor de 1.999 [mm] y en el extremo superior

izquierdo y en los extremos donde se encuentran los apoyos existe una deflexión hacia arriba de 0.005035 [mm].

Material PLA

Para la simulación de la viga optimizada al 20% de la masa con el material PLA se colocó una carga de 30 [N], ya que se realizaron pruebas preliminares en la viga.

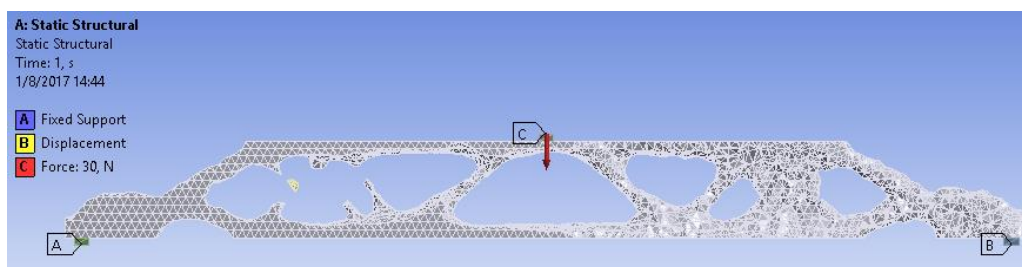


Figura 159 Aplicación de soportes y cargas en la viga optimizada con el 20% de masa, Material PLA

Los resultados generados por la simulación con un análisis de convergencia se observan en las figuras dadas a continuación:

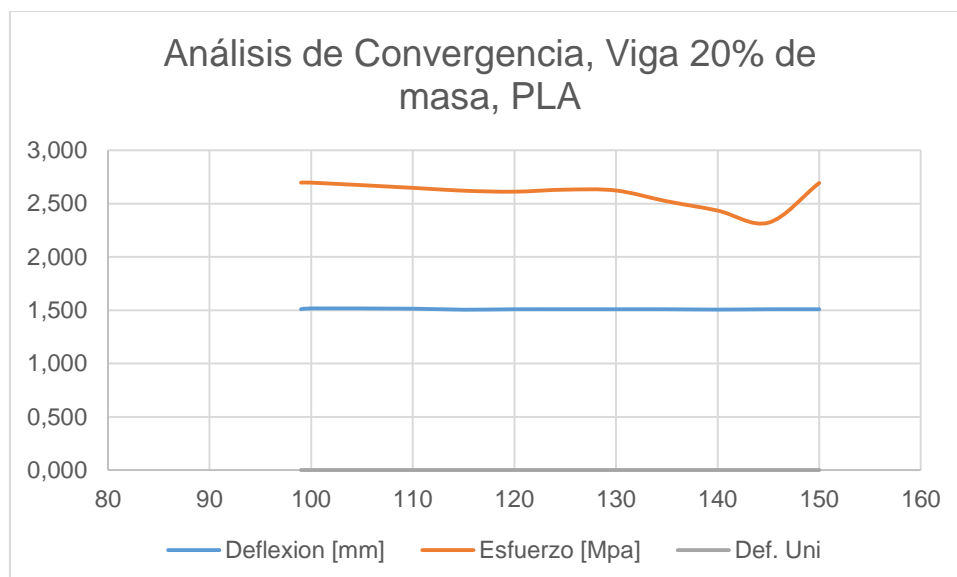


Figura 160 Diagrama de análisis de Convergencia, Viga 20% de masa, PLA

- **Esfuerzos**

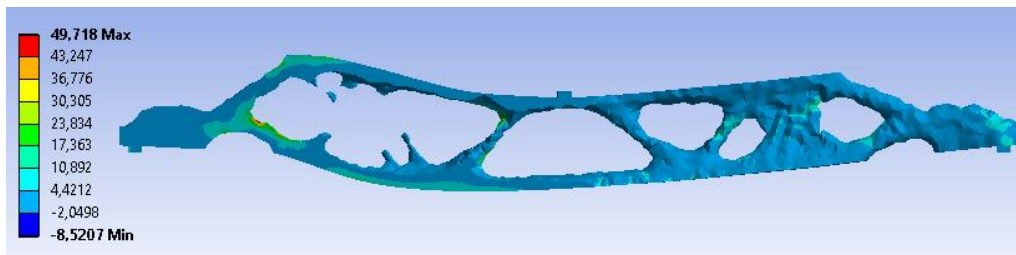


Figura 161 Resultado de esfuerzo en la viga optimizada al 20% de masa, Material PLA

En la figura 161 se observa que el esfuerzo máximo se encuentra en el extremo izquierdo de la viga y su valor es de 49.718 [MPa]. En el centro se observa que el esfuerzo tiene un valor de 2.69 [MPa].

- **Deformación unitaria**

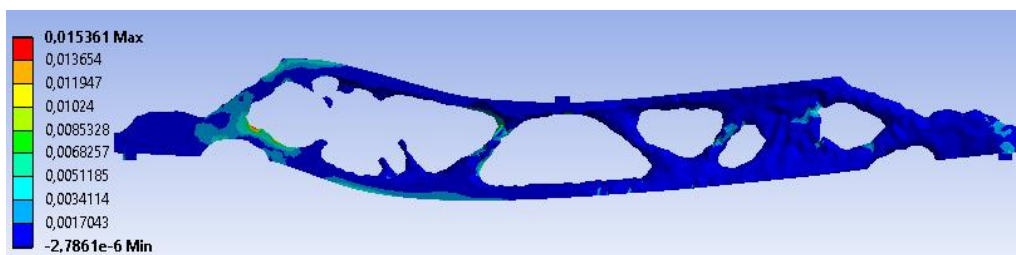


Figura 162 Resultado de deformación unitaria en la viga optimizada al 20% de masa, Material PLA

La deformación unitaria máxima mostrada en la figura 162 se encuentra en el extremo izquierdo de la viga con un valor de 0.01536 y en el centro de la misma se obtuvo una deformación unitaria de 8.3×10^{-4} .

- **Deflexión**

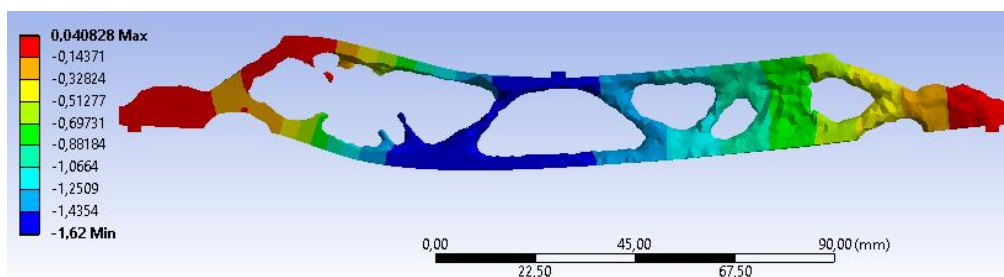


Figura 163 Resultado de deflexión en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA

En la figura 163 se muestra que existe una deflexión máxima hacia abajo en el centro de la viga con un valor de 1.51 [mm] y en el extremo superior izquierdo y en los extremos donde se encuentran los apoyos existe una deflexión hacia arriba de 0.04082 [mm].

4.3.2. Simulación en elementos optimizados topológicamente del cilindro a torsión

Al momento de realizar la simulación en el programa, los cilindros optimizados se encuentran en un extremo, dado rectangular, empotrados y en el otro extremo, dado hexagonal, se aplicó un torque.

4.3.2.1. Cilindro optimizado al 50% de la masa del elemento

En la simulación del cilindro optimizado al 50% de la masa se colocó un torque de 3200 [N mm] como se lo realizó en el cilindro al 100% de masa.

Material ABS

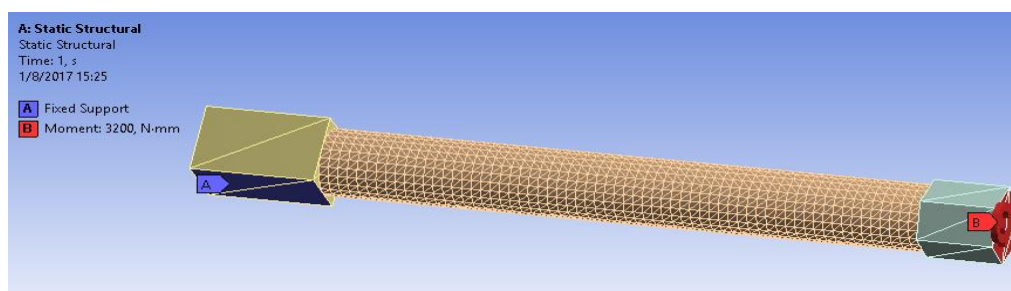


Figura 164 Aplicación de torque y soporte en la viga optimizada al 50% de masa, Material ABS

De la simulación con un análisis de convergencia se obtuvieron los resultados de esfuerzo cortante [MPa] y los desplazamientos [mm], los cuales son mostrados a continuación:

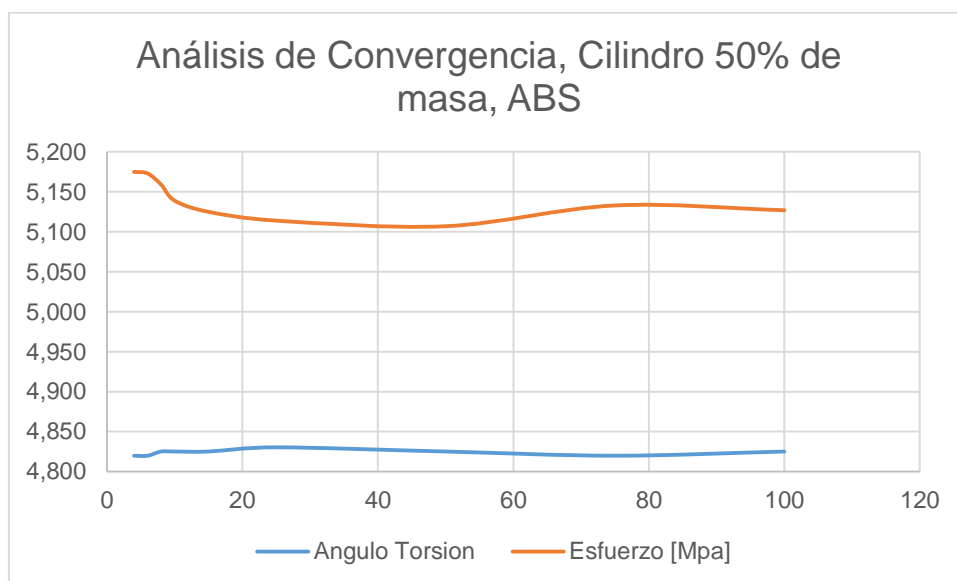


Figura 165 Diagrama de análisis de Convergencia, Cilindro 50% de masa, ABS

- **Esfuerzo cortante**

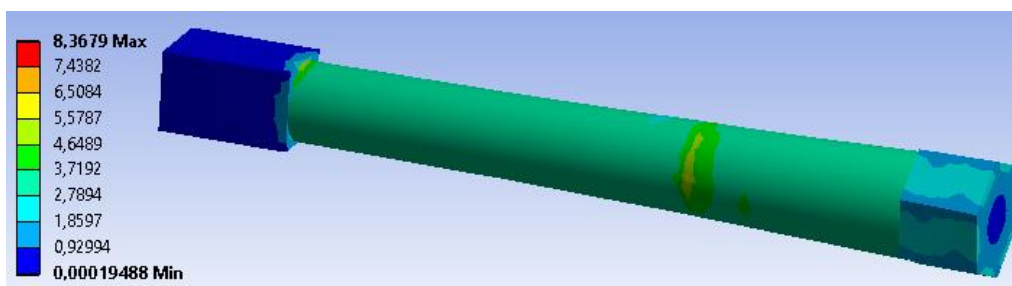


Figura 166 Resultado de esfuerzo cortante en el cilindro optimizado al 50% de masa, Material ABS

Como se observa en la figura 166, el esfuerzo cortante máximo en el cilindro es de 5.114 [MPa] y se encuentra en el empotramiento del mismo.

- **Desplazamiento**

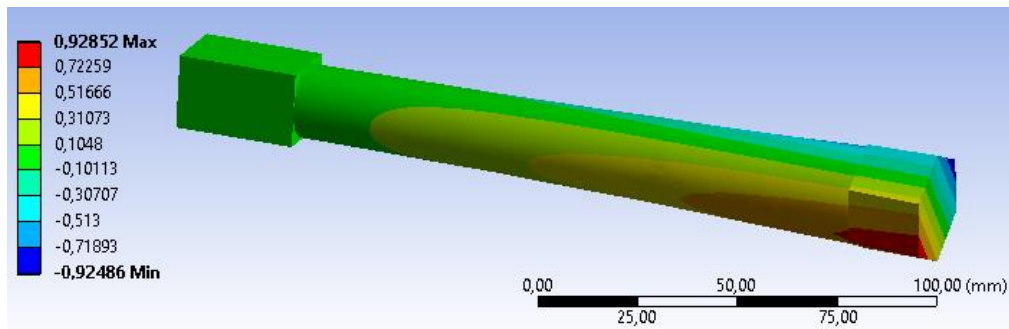


Figura 167 Resultado de desplazamiento en el cilindro optimizado al 50% de masa, Material ABS

El desplazamiento máximo que se observa en la figura 167 del cilindro optimizado al 50% es de 0.924 [mm], por lo tanto el valor del ángulo de torsión se lo va a obtener de la siguiente manera:

El ángulo de torsión (θ) en grados viene dado por la ecuación:

$$\theta = \frac{y \text{ [mm]}}{r} \times \frac{180}{\pi}$$

Donde:

θ = Ángulo de torsión [grados]

r = radio del hexágono [mm]

y = desplazamiento [mm]

$$\theta = \frac{0,92486 \text{ [mm]}}{10,96} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 4,830^\circ$$

El ángulo máximo de torsión generado en el cilindro optimizado con el 50% de masa con material ABS es de 4.830°.

Material PLA

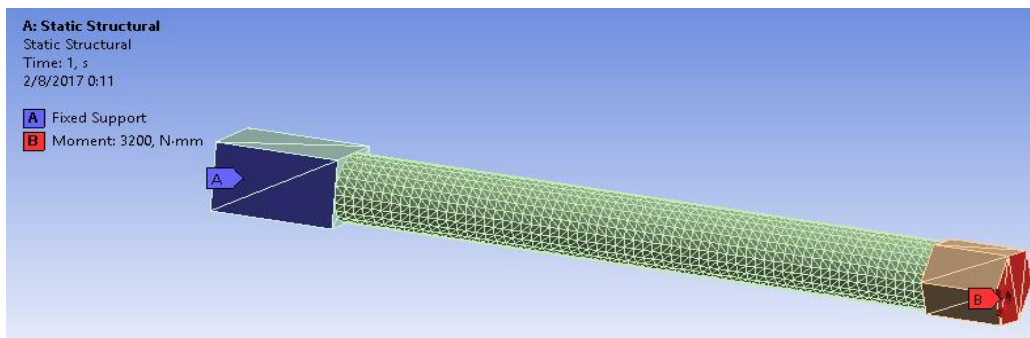


Figura 168 Aplicación de torque y soporte en la viga optimizada al 50% de masa, Material PLA

Los resultados obtenidos con un análisis de convergencia de esfuerzo cortante y desplazamiento en el cilindro optimizado se encuentran a continuación:

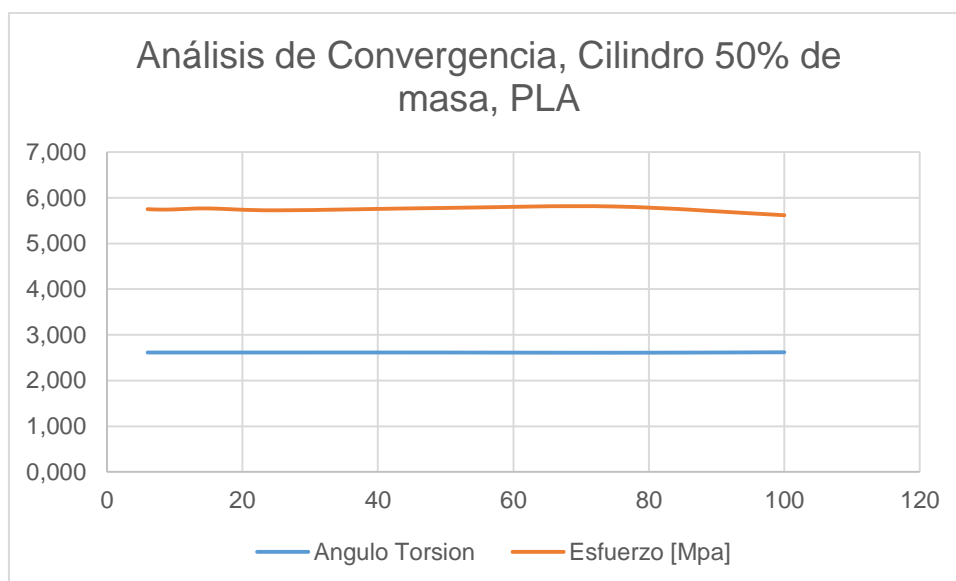


Figura 169 Diagrama de análisis de Convergencia, Cilindro 50% de masa, PLA

- **Esfuerzo cortante**

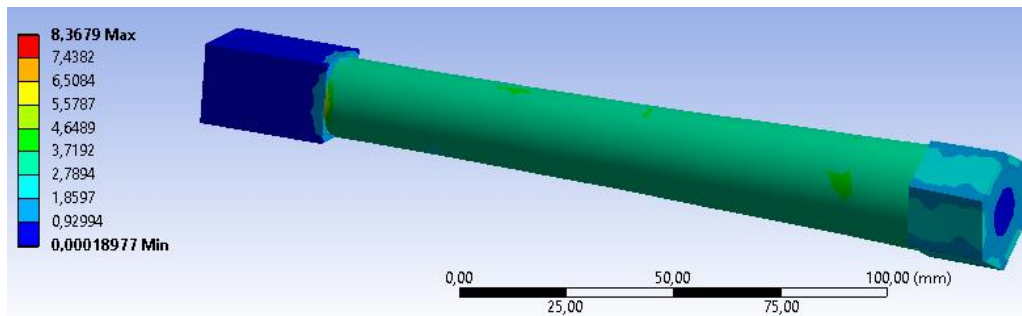


Figura 170 Resultado de esfuerzo cortante en el cilindro optimizado al 50% de masa, Material PLA

En la figura 170 se observa que el esfuerzo cortante máximo se encuentra en el empotramiento del cilindro y su valor es de 5.752 [MPa] aproximadamente.

- **Desplazamiento**

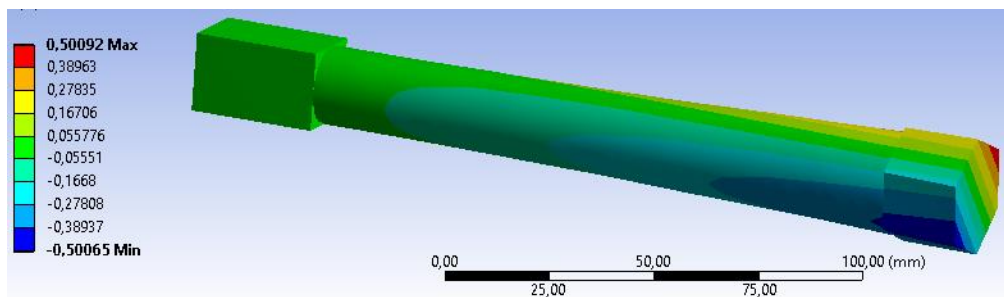


Figura 171 Resultado de desplazamiento en el cilindro optimizado al 50% de masa, Material PLA

El desplazamiento máximo observado en la figura 171 del cilindro optimizado al 50% es de 0.500 [mm], por lo tanto el valor del ángulo de torsión se lo va a obtener de la siguiente manera:

El ángulo de torsión (θ) en grados viene dado por la ecuación:

$$\theta = \frac{y \text{ [mm]}}{r} \times \frac{180}{\pi}$$

Donde:

θ = Ángulo de torsión [grados]

r= radio del hexágono [mm]

y= desplazamiento [mm]

$$\theta = \frac{0.50065 \text{ [mm]}}{10.96} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 2.614^\circ$$

En ángulo máximo de torsión generado en el cilindro optimizado al 50% de masa con material PLA es de 2.614° .

4.3.2.2. Cilindro optimizado al 30% de la masa del elemento

Material ABS

Al igual que en el caso anterior, por pruebas preliminares realizadas en el cilindro se consideró colocar un torque de 2400 [N mm] en la simulación.

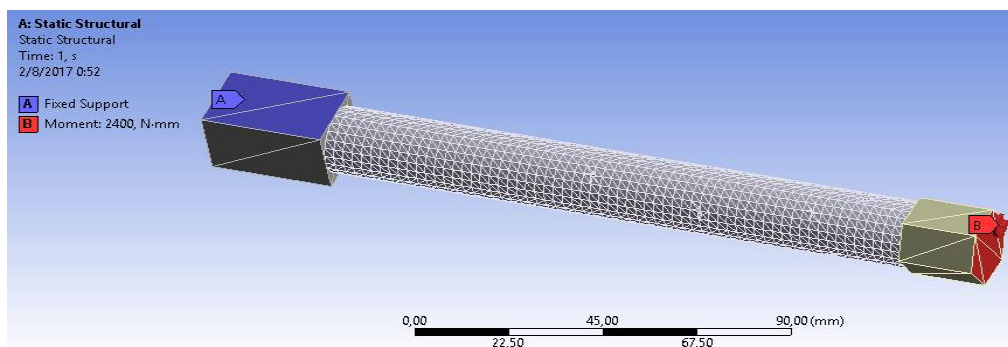


Figura 172 Aplicación de torque y soporte en la viga optimizada al 30% de masa, Material ABS

Los resultados de esfuerzo cortante y desplazamiento obtenidos con un análisis de convergencia en la simulación del cilindro optimizado al 30% se muestran a continuación:

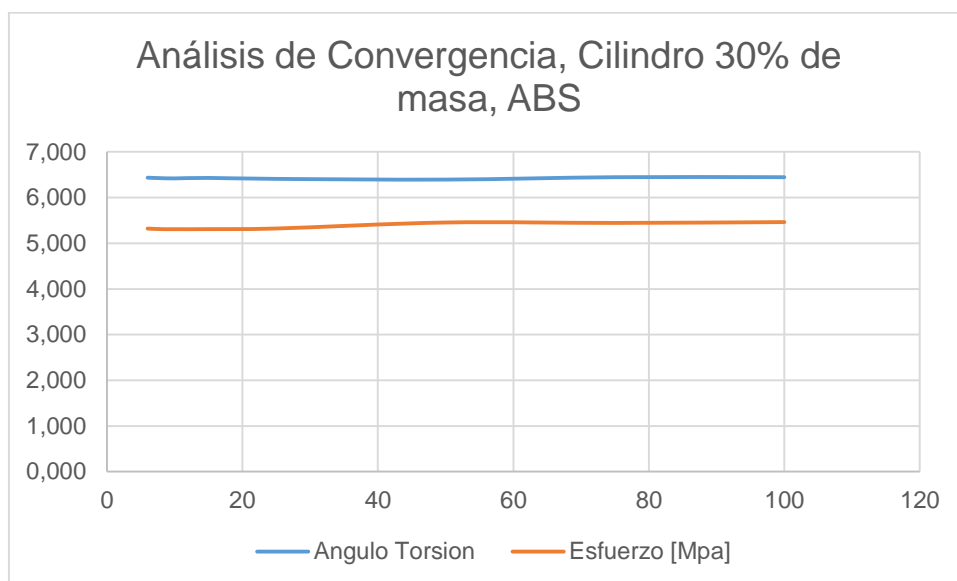


Figura 173 Diagrama de análisis de Convergencia, Cilindro 30% de masa, ABS

- **Esfuerzo cortante**

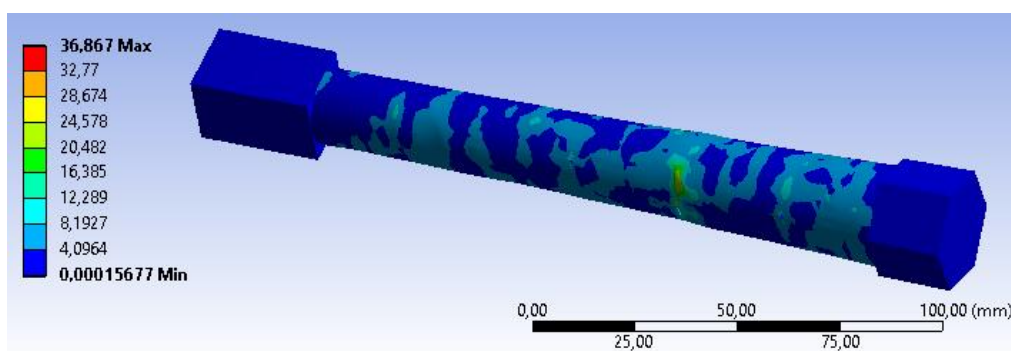


Figura 174 Resultado de esfuerzo cortante en el cilindro optimizado al 30% de masa, Material ABS

En la figura 174 se observa que el esfuerzo cortante en el cilindro va a ser diferente con respecto al caso anterior y el valor es de 5.321 [MPa].

- **Desplazamiento**

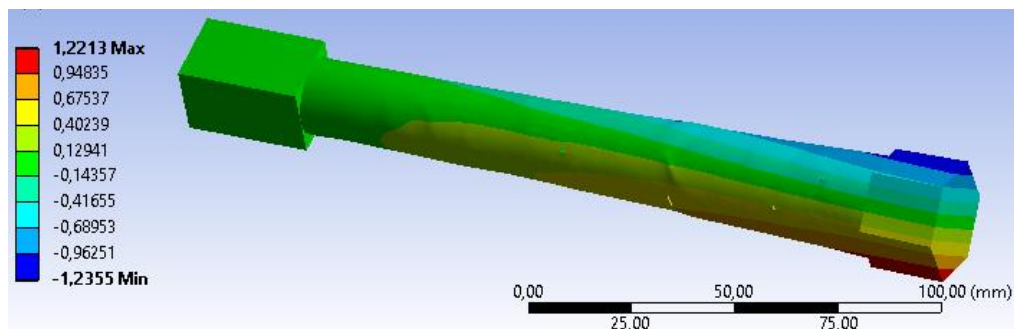


Figura 175 Resultado de desplazamiento en el cilindro optimizado al 30% de masa, Material ABS

El desplazamiento máximo en cilindro optimizado al 30% que se observa en la figura 17 es de 1.231 [mm]. El ángulo máximo de torsión generado en el cilindro optimizado al 30% de masa con material ABS es de 6.435 °.

Material PLA

Se realizó pruebas preliminares en la viga optimizada al 30% con el material PLA y se consideró colocar un torque de 3200 [N mm] para la realización de la simulación.

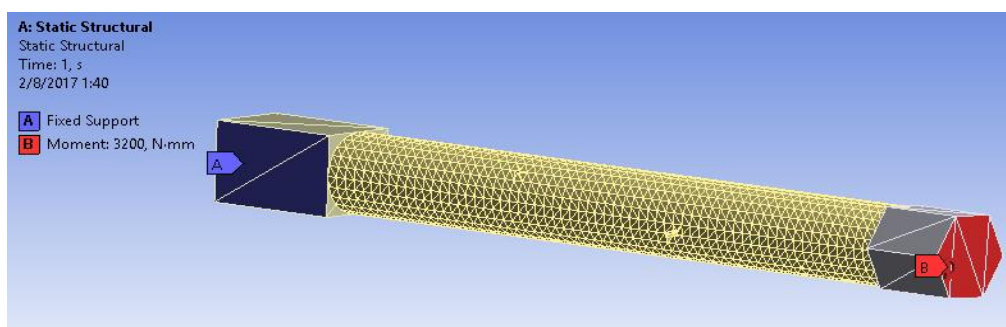


Figura 176 Aplicación de torque y soporte en la viga optimizada al 30% de masa, Material PLA

A continuación se muestra los resultados obtenidos de la simulación realizando un análisis de convergencia con el cilindro optimizado al 30% de la masa.

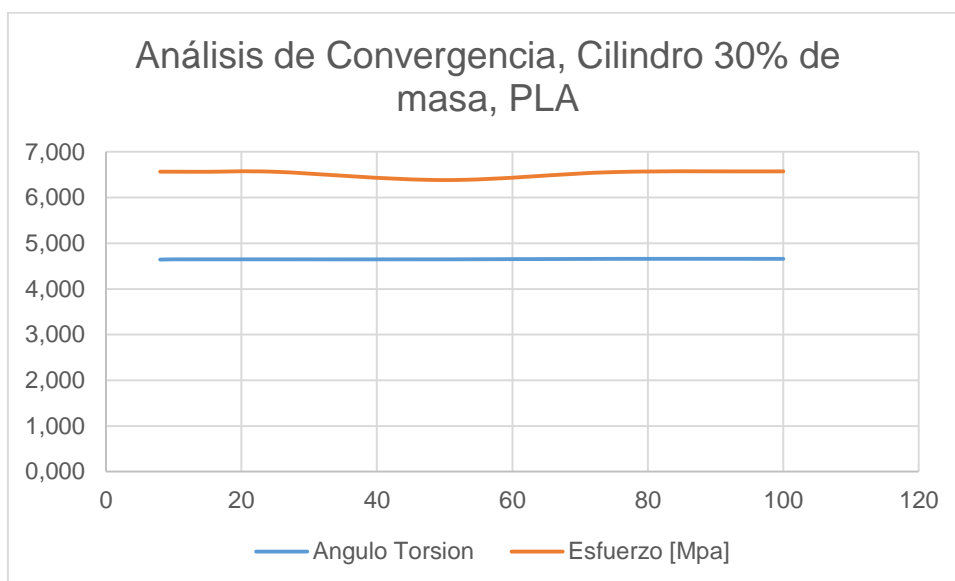


Figura 177 Diagrama de análisis de Convergencia, Cilindro 30% de masa, PLA

- **Esfuerzo cortante**

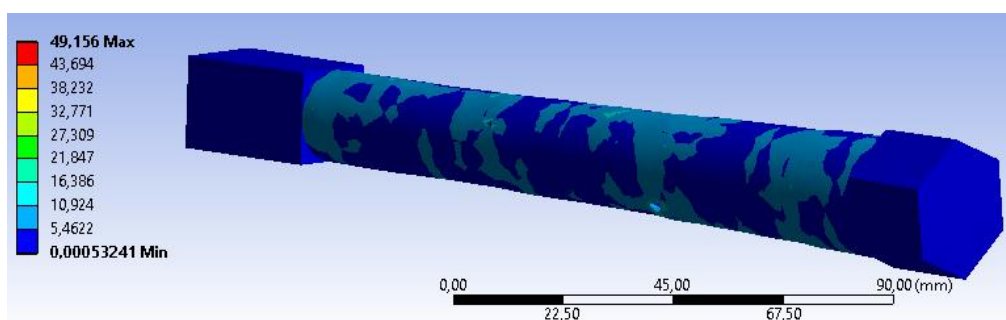


Figura 178 Resultado de esfuerzo cortante en el cilindro optimizado al 30% de masa, Material PLA

En la figura 178 se observa que el esfuerzo cortante máximo está en el empotramiento y tiene un valor de 6.566 [MPa].

- **Desplazamiento**

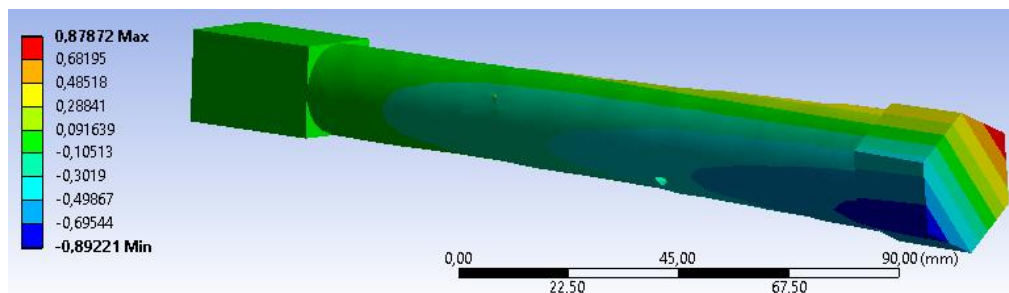


Figura 179 Resultado de desplazamiento en el cilindro optimizado al 30% de masa, Material PLA

El desplazamiento máximo que se observa en la figura 179 del cilindro optimizado al 30% de la masa es de 0.888 [mm], por lo tanto el valor del ángulo de torsión se lo va a obtener de la siguiente manera. El ángulo máximo de torsión generado en el cilindro optimizado al 30% de masa con material PLA es de 4.642 °.

4.3.2.3. Cilindro optimizado al 20% de la masa del elemento

No se pudo realizar la simulación para los cilindros optimizados al 20% porque existe un problema al momento de generar el mallado de los elementos ya que tiene una geometría muy compleja y esto se debe a que el programa Inspire le quitó mucho material obteniendo como resultado una menor resistencia.

4.3.3. Simulación en elementos optimizados topológicamente del prisma cuadrado a flexo torsión.

Para realizar la simulación en los elementos optimizados del prisma cuadrado se colocó en el dado rectangular el empotramiento y en una arista lateral extrema una carga de 5 [Kg] (49.05 [N])

4.3.3.1. Prisma cuadrado optimizado al 50% de la masa del elemento

Material ABS

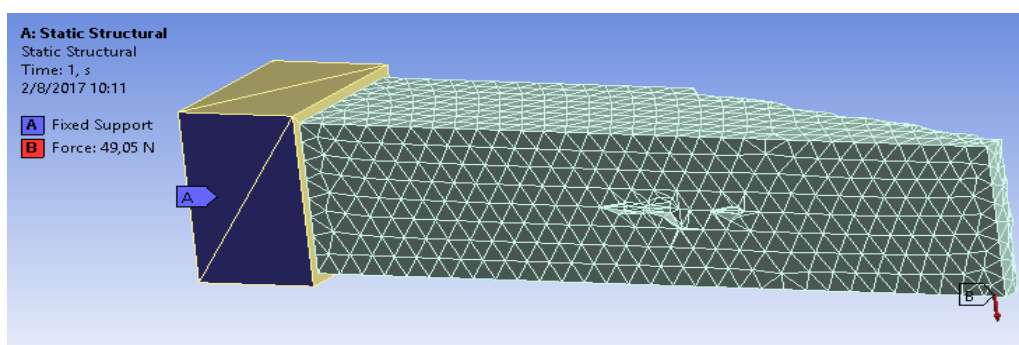


Figura 180 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material ABS

De la simulación se obtuvo como resultado el esfuerzo principal, la deformación unitaria y el desplazamiento con un análisis de convergencia, como se muestra a continuación:

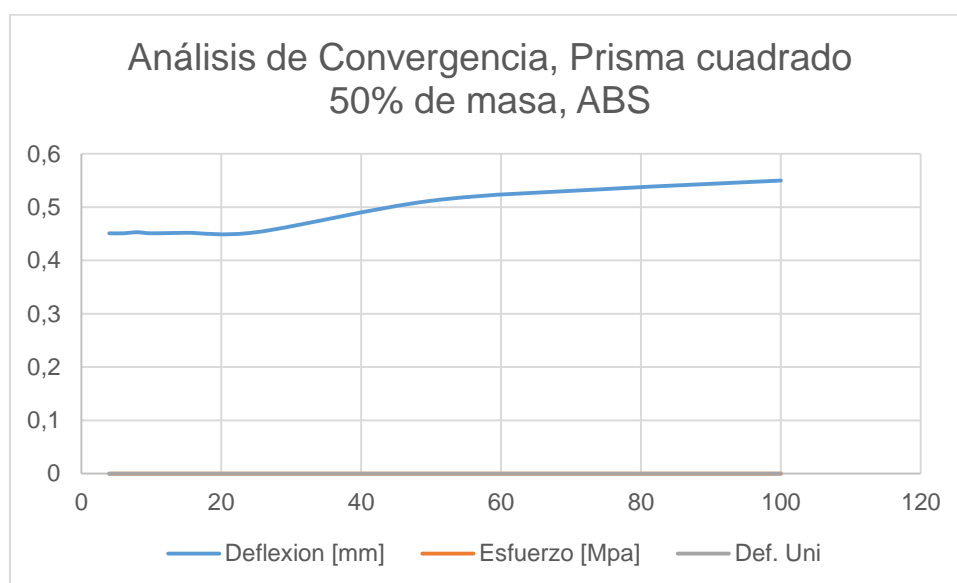


Figura 181 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 50% de masa, ABS

- **Esfuerzo**

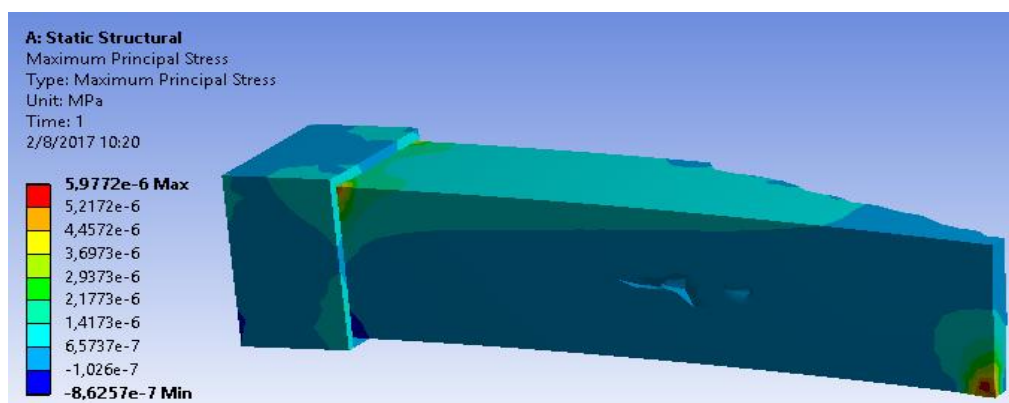


Figura 182 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material ABS

En la figura 182 se observa que el máximo esfuerzo se genera en la parte superior del empotramiento, y su valor es de 5.3×10^{-6} [MPa].

- **Deformación Unitaria**

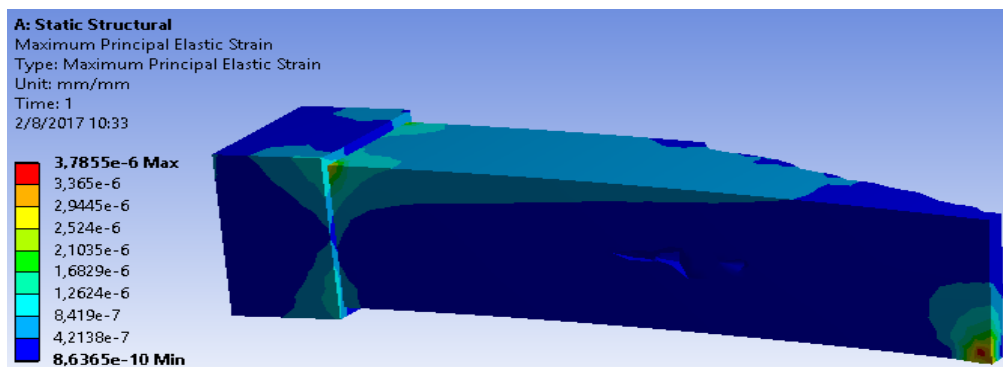


Figura 183 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material ABS

Como se observa en la figura 183 la deformación unitaria máxima se encuentra en la parte donde fue aplicada la carga, tiene un valor de 4.1×10^{-6} .

- **Desplazamiento**

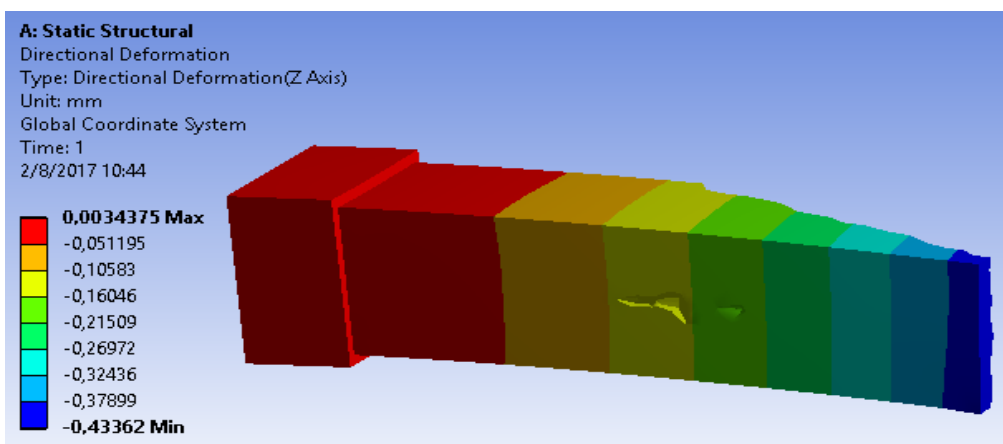


Figura 184 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material ABS

El prisma optimizado al 50% de la masa tiene un desplazamiento máximo de 0.451 [mm] en el extremo del prisma.

Material PLA

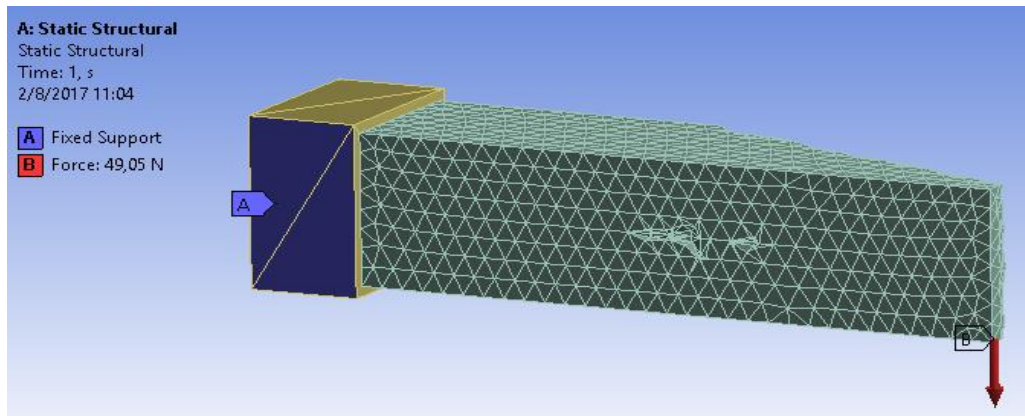


Figura 185 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material PLA

De la simulación del prisma optimizado obtuvo como resultado el esfuerzo principal, la deformación unitaria y el desplazamiento con un análisis de convergencia, como se muestra a continuación:

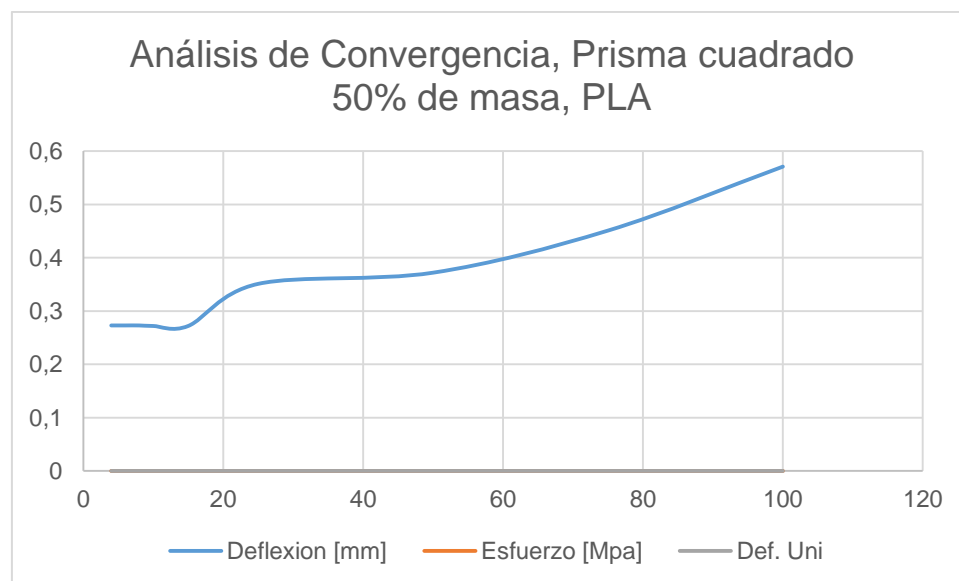


Figura 186 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 50% de masa, PLA

- **Esfuerzo**

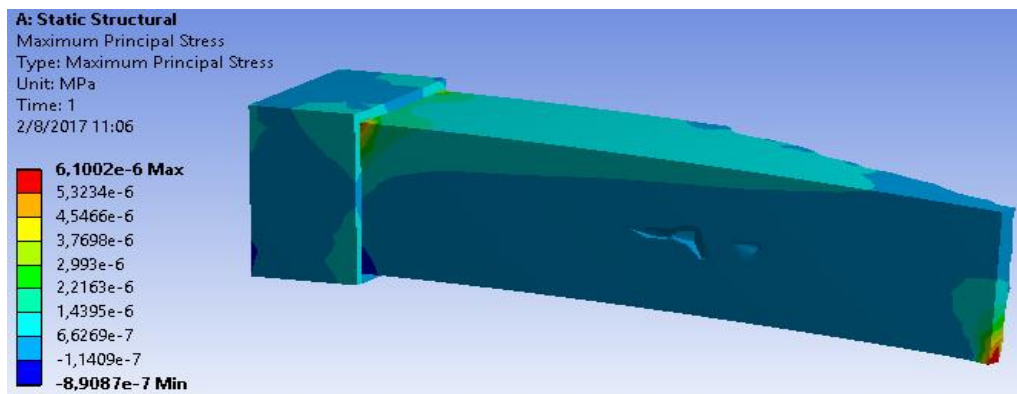


Figura 187 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material PLA

En la figura 187 se observa que el máximo esfuerzo en la parte superior izquierda del empotramiento tiene un valor es de 5.3×10^{-6} [MPa].

- **Deformación Unitaria**

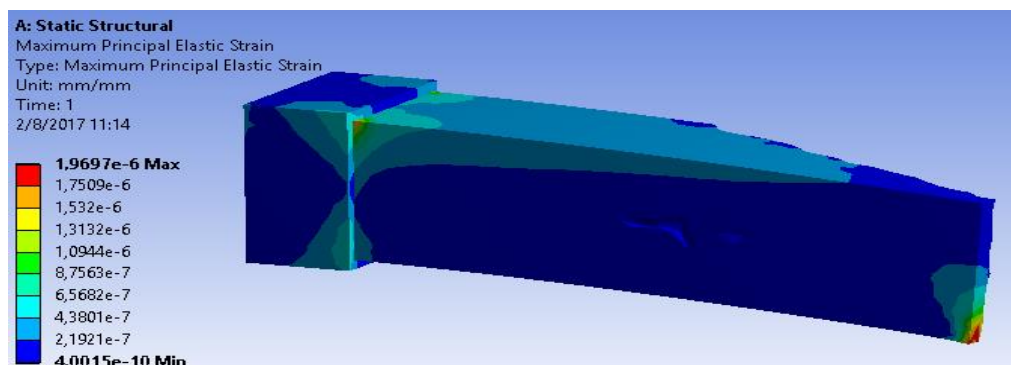


Figura 188 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material PLA

Como se observa en la figura 188, la deformación unitaria máxima en el empotramiento tiene un valor de 1.4×10^{-6} .

- **Desplazamiento**

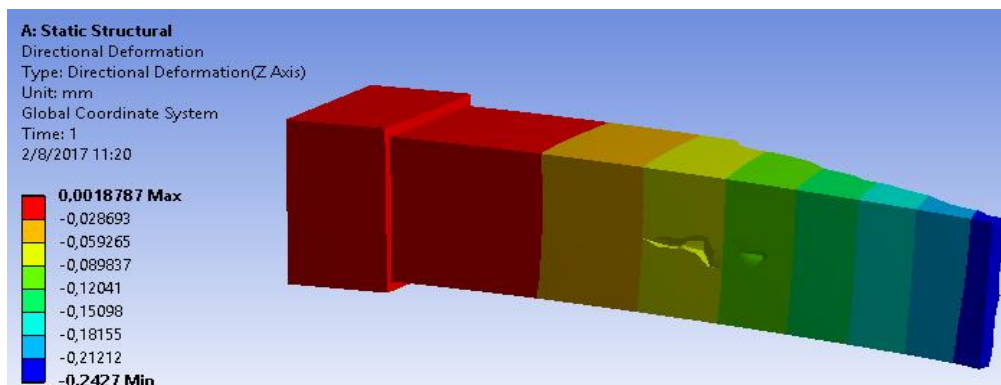


Figura 189 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 50% de masa, Material PLA

En la figura 189 se observa que el prisma optimizado al 50% de la masa tiene un desplazamiento máximo de 0.273 [mm].

4.3.3.2. Prisma cuadrado optimizado al 30% de la masa del elemento

Material ABS

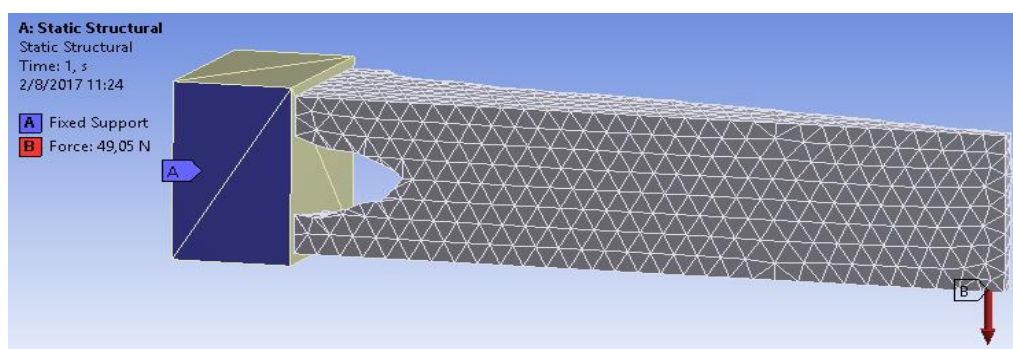


Figura 190 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material ABS

Los resultados obtenidos para la simulación con un análisis de convergencia del prisma optimizado con el 30% de masa, se encuentran a continuación:

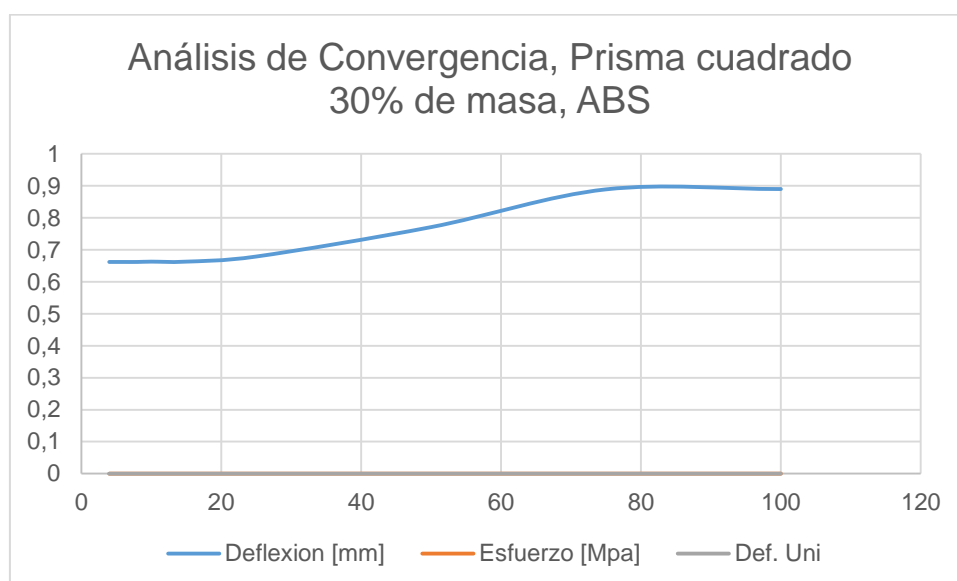


Figura 191 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 30% de masa, ABS

- **Esfuerzo**

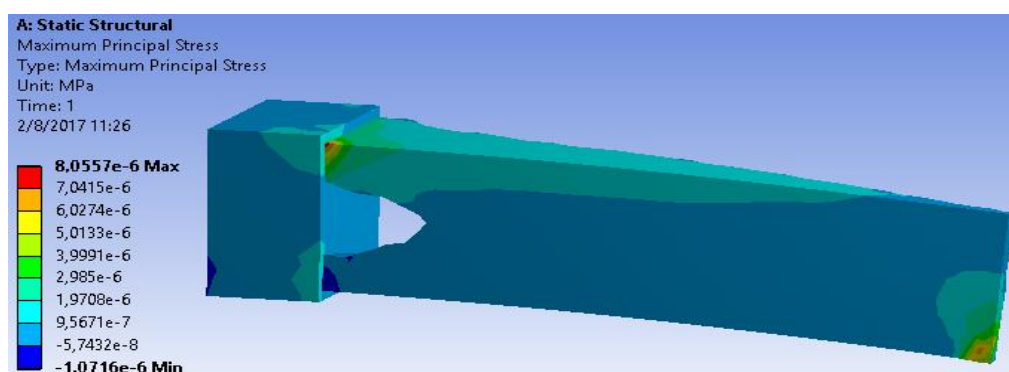


Figura 192 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material ABS

En la figura 192 se observa que el máximo esfuerzo se encuentra en el extremo superior donde se encuentra el empotramiento, y tiene un valor es de 7.3×10^{-6} [MPa].

- **Deformación Unitaria**

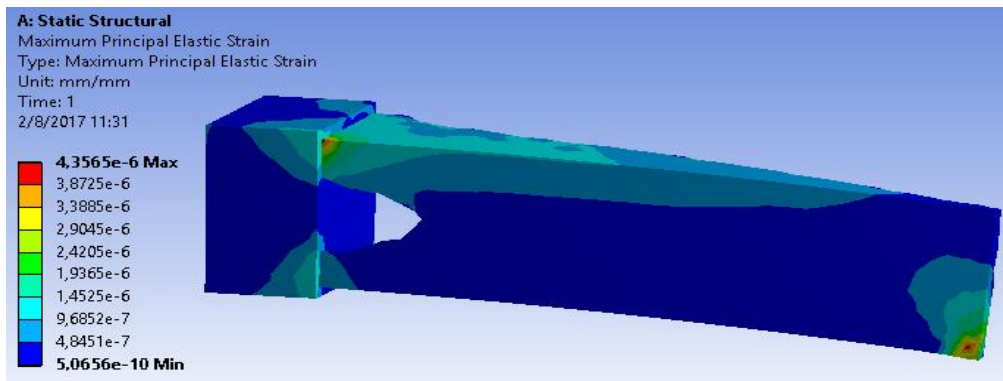


Figura 193 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material ABS

Al igual que en el esfuerzo, la deformación unitaria máxima se encuentra en la parte superior del empotramiento, como se observa en la figura 193, y tiene un valor de 4.2×10^{-6} .

- **Desplazamiento**

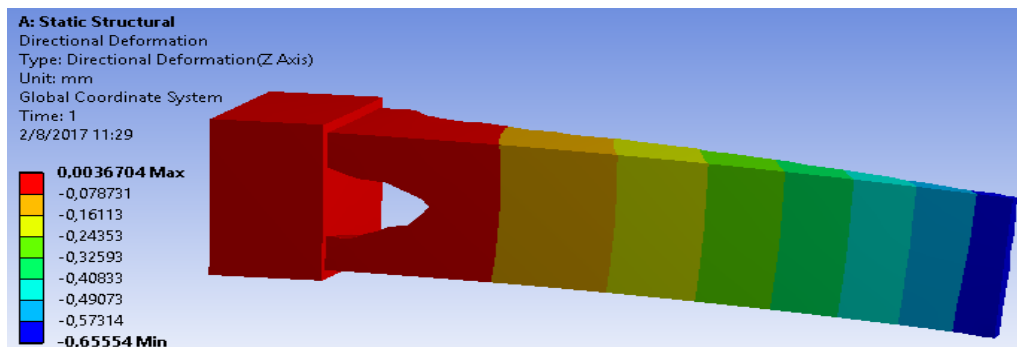


Figura 194 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material ABS

En la figura 194 se observa los desplazamientos que tiene el prisma optimizado al 30% de la masa, su desplazamiento máximo es de 0.662 [mm].

Material PLA

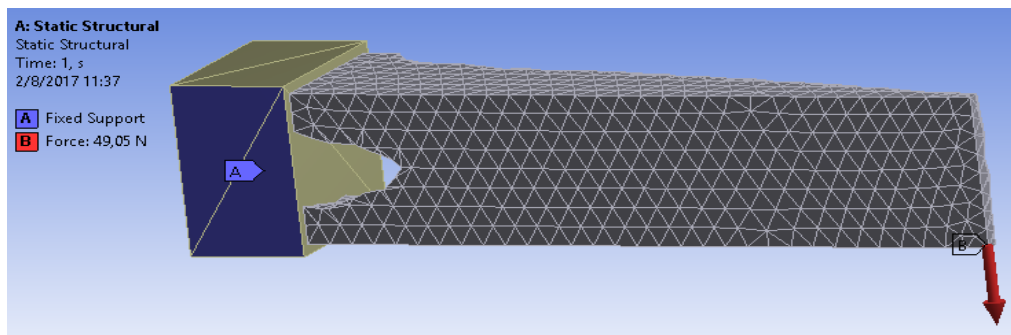


Figura 195 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material PLA

Los resultados obtenidos para la simulación con un análisis de convergencia del prisma optimizado con el 30% de masa, se encuentran a continuación:

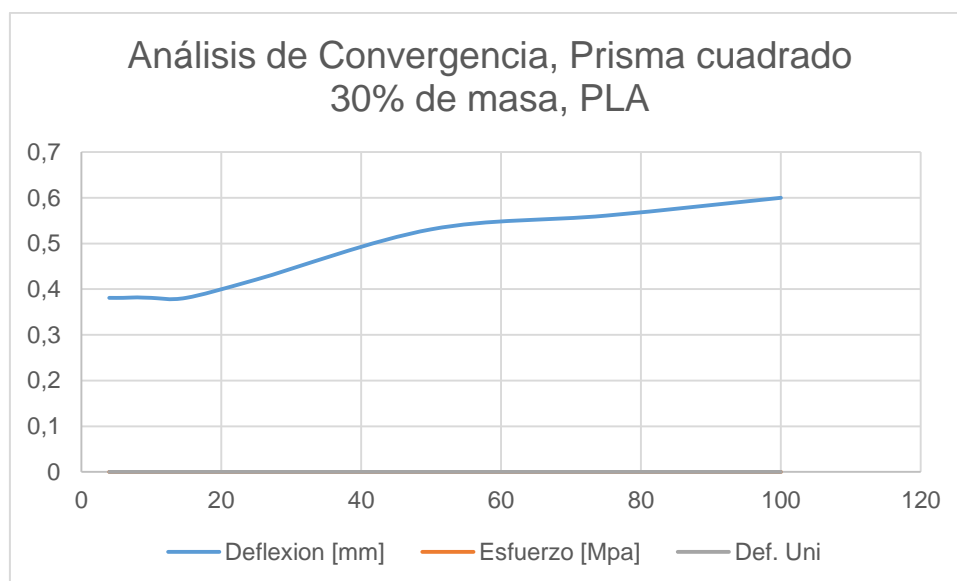


Figura 196 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 30% de masa, PLA

- **Esfuerzo**

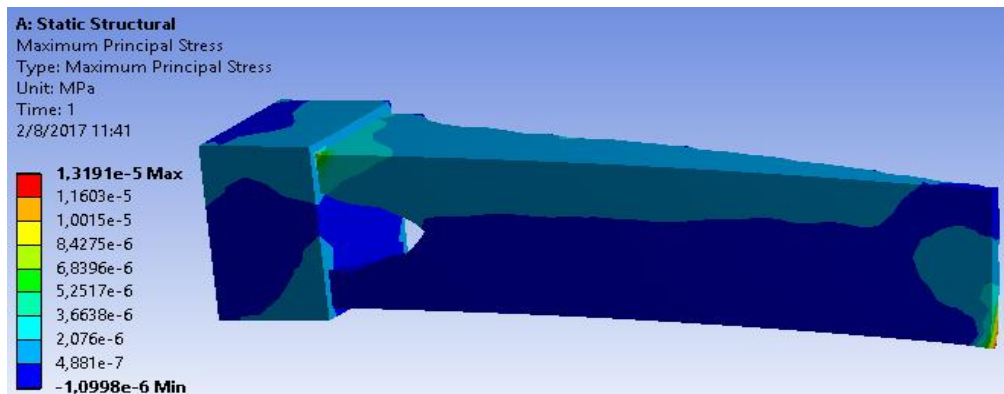


Figura 197 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material PLA

En la figura 197 se observa que el máximo esfuerzo en el empotramiento, en el extremo superior izquierdo, tiene un valor es de 7.4×10^{-6} [MPa].

- **Deformación Unitaria**

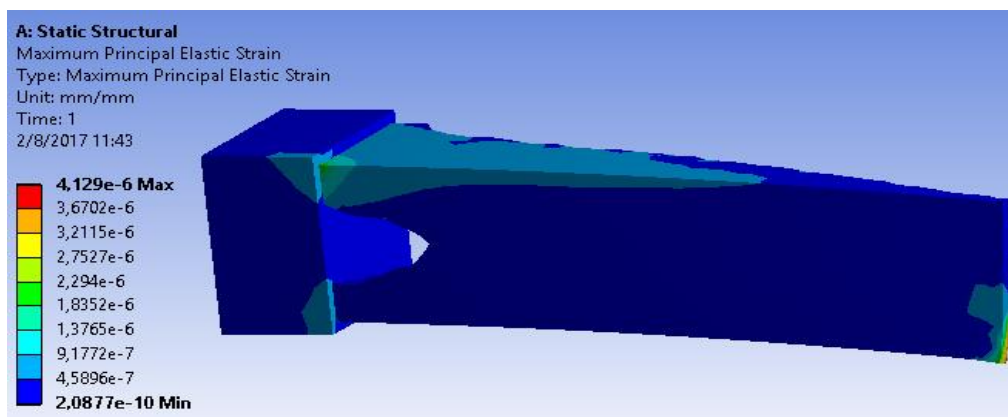


Figura 198 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material PLA

Al igual que en el esfuerzo, la deformación unitaria máxima en el empotramiento, como se observa en la figura 198, tiene un valor de 2.4×10^{-6} .

- **Desplazamiento**

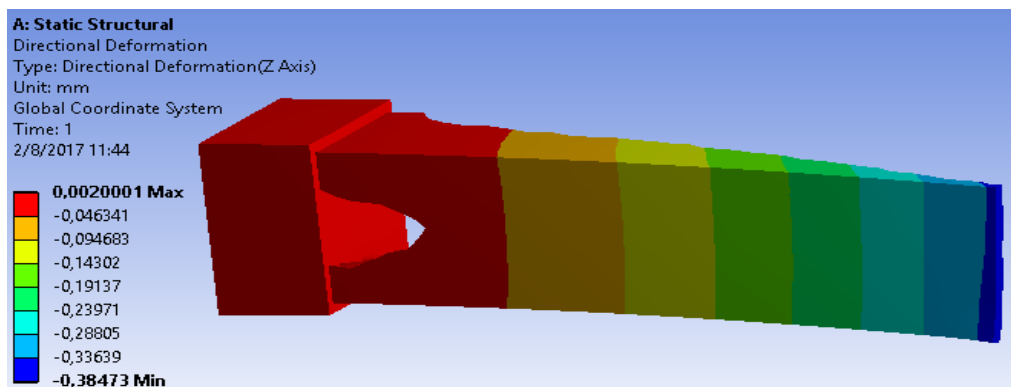


Figura 199 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 30% de masa, Material PLA

En la figura 199 se observa los desplazamientos que tiene el prisma optimizado al 30% de la masa con el material PLA, su desplazamiento máximo es de 0.381 [mm].

4.3.3.3. Prisma cuadrado optimizado al 20% de la masa del elemento Material ABS

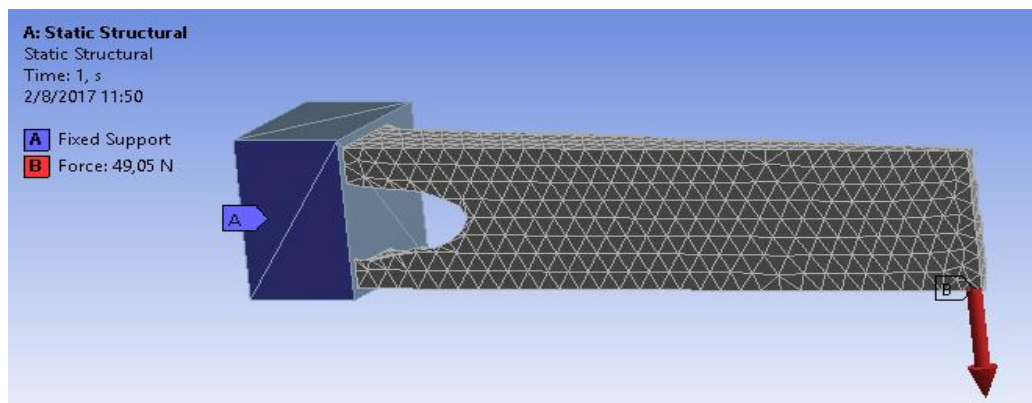


Figura 200 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material ABS

Los resultados obtenidos para la simulación con un análisis de convergencia del prisma optimizado con el 20% de masa, se encuentran a continuación:

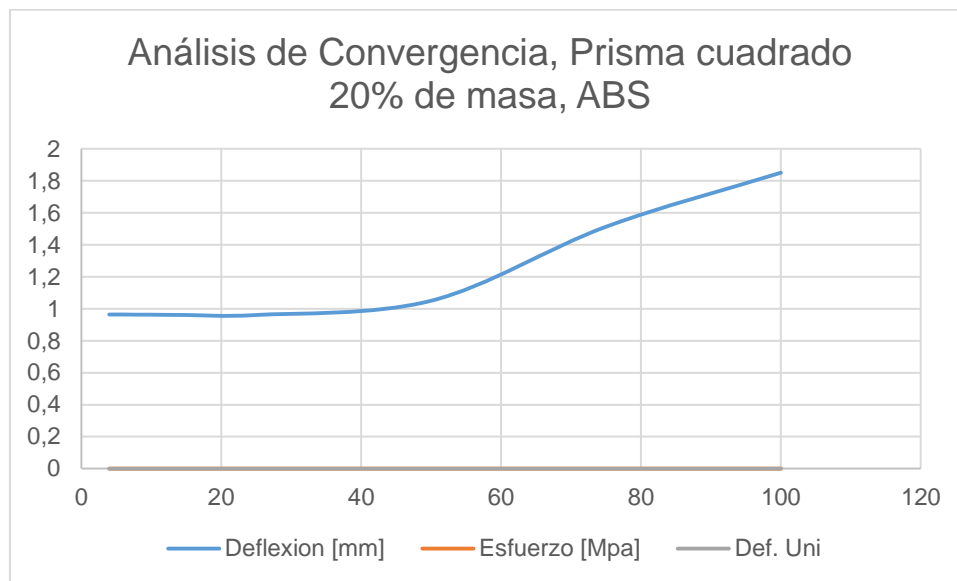


Figura 201 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 20% de masa, ABS

- **Esfuerzo**

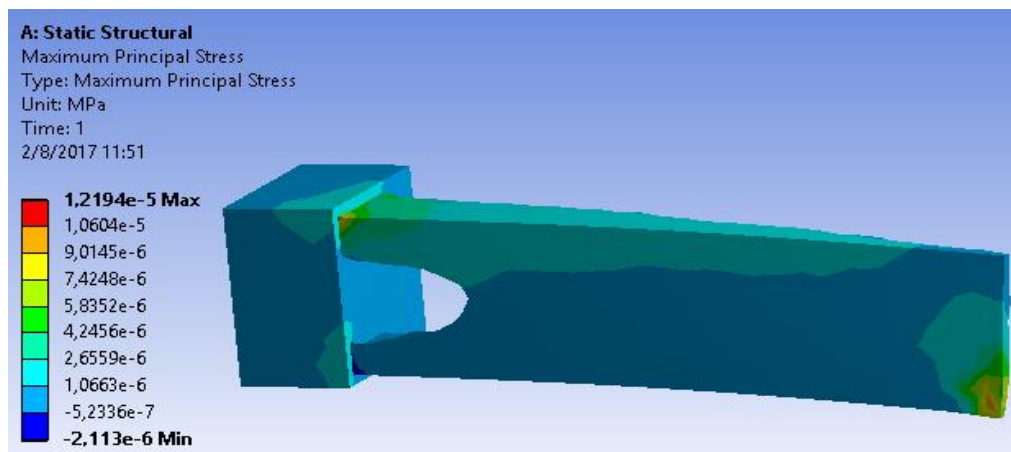


Figura 202 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material ABS

En la figura 202 se observa que el máximo esfuerzo se encuentra en el valor de 9.6×10^{-6} [MPa] en la parte superior donde se encuentra empotrado el prisma.

- **Deformación Unitaria**

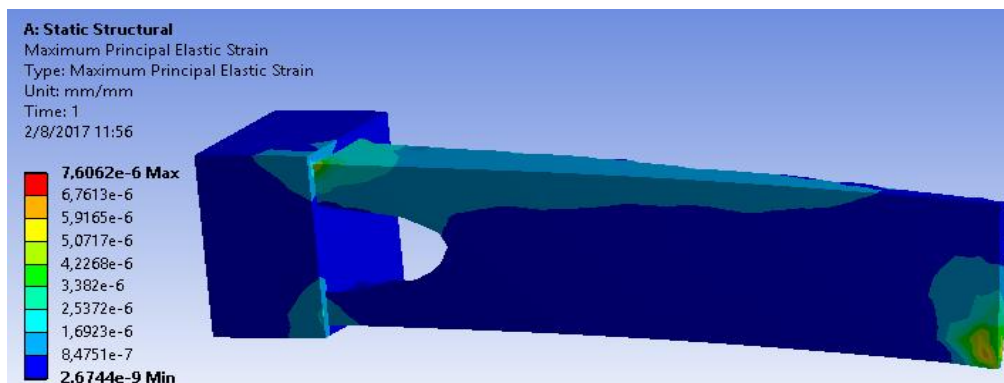


Figura 203 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material ABS

La deformación unitaria máxima se encuentra en los mismos puntos que en el esfuerzo, como se observa en la figura 203, y tiene el valor de 9.27×10^{-6} .

- **Desplazamiento**

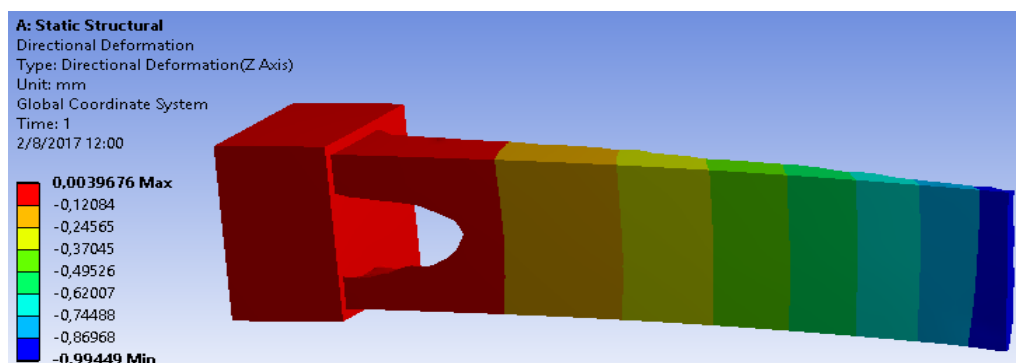


Figura 204 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material ABS

En la figura 204 se observa los desplazamientos que tiene el prisma optimizado al 20% de la masa con el material ABS. Su desplazamiento máximo es de 0.964 [mm].

Material PLA

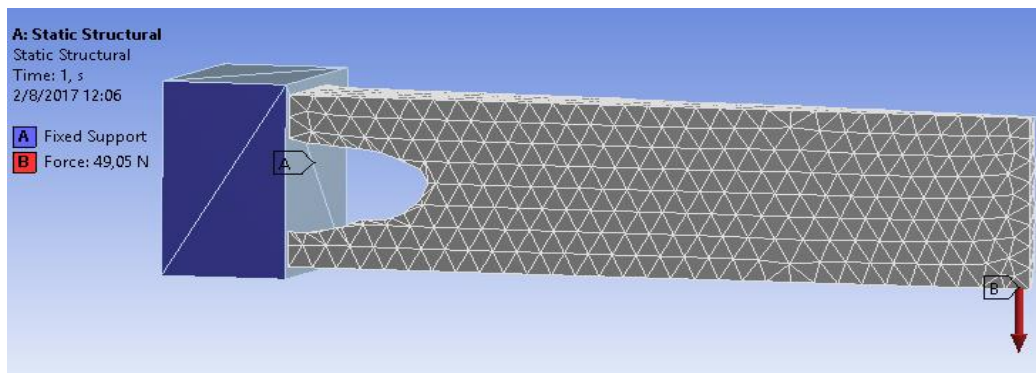


Figura 205 Aplicación de carga y soporte en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material PLA

Los resultados obtenidos para la simulación con un análisis de convergencia del prisma optimizado con el 20% de masa con material PLA, se encuentran a continuación:

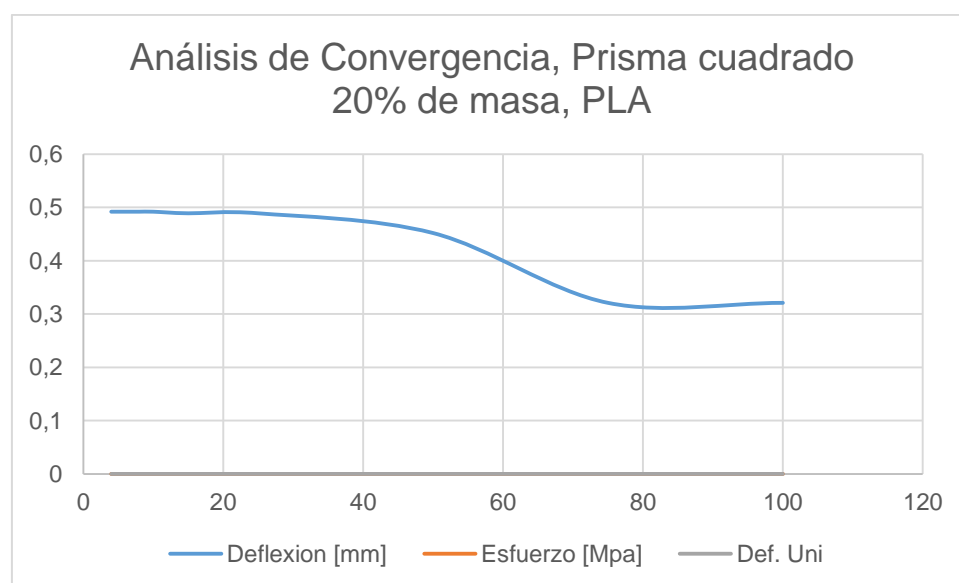


Figura 206 Diagrama de análisis de Convergencia, Prisma cuadrado 20% de masa, PLA

- **Esfuerzo**

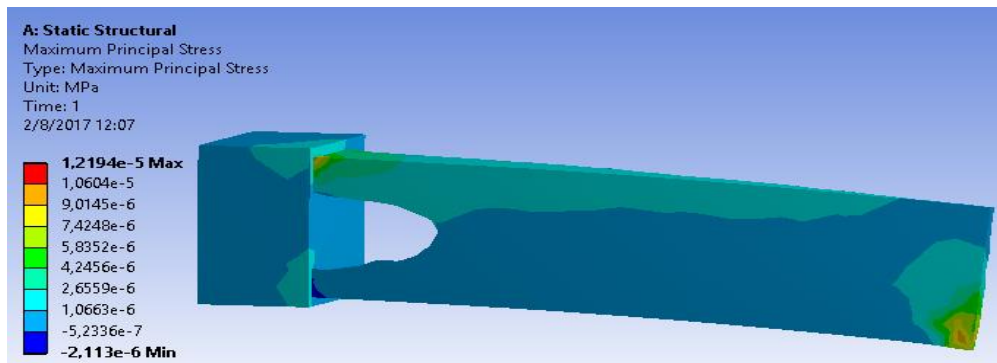


Figura 207 Resultado de esfuerzo en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material PLA

En la figura 207 se observa que en la parte superior izquierda del empotramiento el máximo esfuerzo es de 9.31×10^{-6} [MPa].

- **Deformación Unitaria**

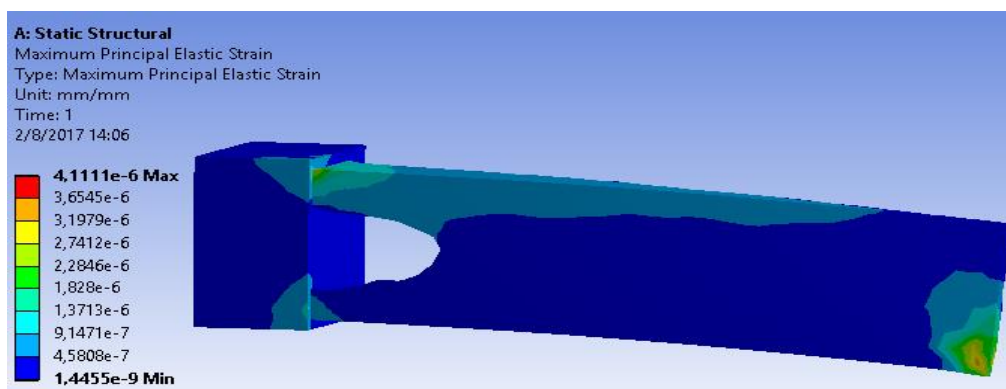


Figura 208 Resultado de deformación unitaria en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material PLA

La deformación unitaria máxima se encuentra en los mismos puntos que en el esfuerzo visto anteriormente, figura 208, y su valor es de 2.41×10^{-6}

- **Desplazamiento**

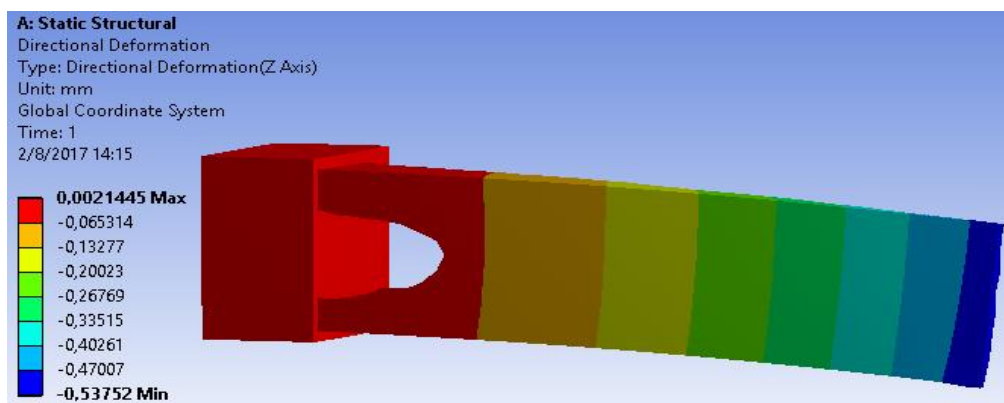


Figura 209 Resultado de desplazamiento en el prisma cuadrado optimizado al 20% de masa, Material PLA

En la figura 209 se observa los desplazamientos que tiene el prisma optimizado al 20% de la masa con el material PLA. Su desplazamiento máximo se encuentra en el extremo del mismo y su valor es de 0.492 [mm].

4.4. Modelado final de prototipos

Para el diseño final de los elementos optimizados se tomó en cuenta los resultados obtenidos en las simulaciones para cada porcentaje de optimización topológica generado por el programa Inspire, y la facilidad para manufacturar los elementos con diferentes materiales.

Se observó que los elementos optimizados al 50% de masa, tanto para ABS como PLA, tienen una resistencia parecida a los elementos con el 100% de la masa, sin embargo, esto no ocurre con los porcentajes de 30 y 20 ya que la resistencia va disminuyendo. Es por ello que se consideró realizar el diseño final de los elementos con las geometrías obtenidas con la optimización topológica al 50% de la masa del elemento, así se obtiene una resistencia igual al elemento con 100% de masa pero con un peso menor y esto genera reducción de material como reducción de costos en la fabricación de la pieza.

Los diseños finales para la viga rectangular a flexión, el cilindro a torsión y el prisma cuadrado se encuentran en las figuras 210, 211 y 212, respectivamente.

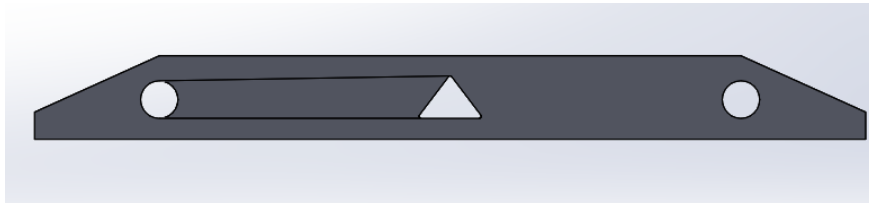


Figura 210 Diseño final de la viga a flexión optimizada con el 50% de la masa

El diseño final de la viga optimizada con el 50% de la masa se basó en la obtenida por el programa Inspire. Se observa en la figura 210 que en los extremos de la viga se generó dos socavaduras de forma circular, aproximadamente, los cuales fueron representados por dos agujeros circulares con el menor diámetro medido y en el centro se representó la geometría obtenida por medio de un triángulo el cual tiene vértices redondeados para evitar concentradores de esfuerzo. En la geometría optimizada se formaron socavaduras que quitaron parte de masa en un extremo de las dos caras, es por ello que se retiró la masa entre un agujero circular y el agujero triangular de cada cara de la viga al momento de realizar el diseño, por lo tanto, esto genera una disminución de peso de la misma.

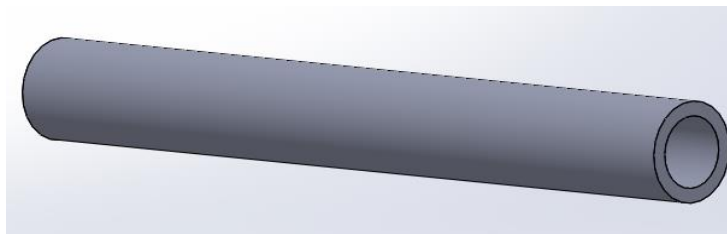


Figura 211 Diseño final del cilindro a torsión optimizado con el 50% de la masa

El cilindro optimizado con el 50% de la masa generó una geometría tubular observada en la figura 211, por lo tanto, para el diseño final se consideró realizar un tubo con un espesor de 2.75 [mm], el cual fue escogido de la menor medida realizada.

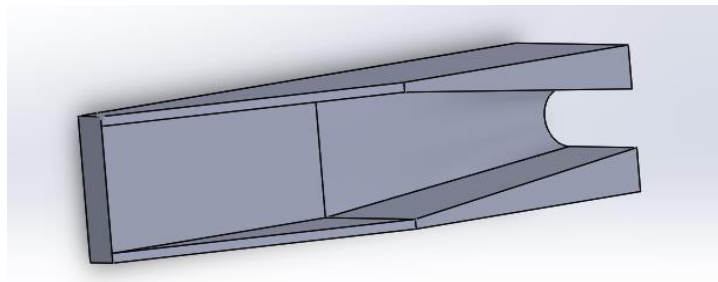


Figura 212 Diseño final del prisma cuadrado a flexo torsión optimizado con el 50% de la masa

El diseño final del prisma optimizado al 50% de la masa fue basado en la geometría dada por el programa Inspire mostrado en la figura 212. Para el diseño final del mismo se consideró dejar el alma con el mismo espesor de la optimización. En las alas, superior e inferior, desde el empotramiento hasta la longitud de 61.50 [mm] tiene una forma rectangular con un espesor variando de un máximo en la sujeción hasta un mínimo en la distancia mencionada, y desde esa longitud hasta el extremo libre tiene una forma rectangular con espesor constante.

CAPITULO V

5. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS OPTIMIZADOS

5.1. Operación Impresora 3D

El rápido crecimiento de la tecnología CAD para el diseño de elementos de máquinas en la actualidad, se lo hace de manera fácil debido a que se almacenan en el computador datos tridimensionales lo cual hace que la producción sea automatizada, se fabrique piezas de formas complicadas, se reduzca el tiempo de retardo y los costos para el desarrollo de nuevos productos industriales y para la realización de prototipos. Como se conoce la técnica del prototipado rápido se la hace construyendo y sobreponiendo pequeñas partículas o capas delgadas de material en dos dimensiones hasta formar el sólido en tres dimensiones, por lo cual se evita los procesos por arranque de viruta. La característica principal de este método es que los elementos de máquina son directamente formados automáticamente de acuerdo a los datos del CAD. (Nakagawa, 1999)

Uno de los métodos de prototipado más aplicados y difundidos es la impresión en 3D, clasificados dentro de los métodos de fotopolímero, polvo sinterizado, inyección de tinta, deposición fundida y corte de láminas. El método de la deposición fundida utiliza una boquilla bastante fina por donde sale el filamento del plástico para fundirlo y depositarlo en una capa de resina del polímero que normalmente es utilizado para formar los modelos a fabricar. Los sistemas por deposición fundida utilizan materiales que están suministrados en forma de rollos de alambre polimérico tales como el ABS, nylon, PLA, entre otros, por lo general existen dos boquillas de las cuales una sirve para fabricar el soporte de la pieza a imprimir, y la otra sirve para la construcción de la misma. (Nakagawa, 1999)

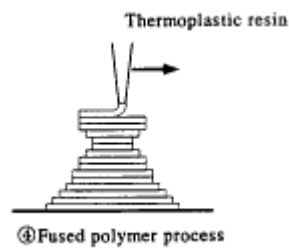


Figura 213 Proceso de polímero fundido

Fuente: (Nakagawa, 1999)

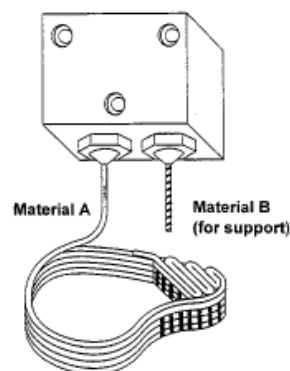


Figura 214 Proceso de deposición fundida

Fuente: (Nakagawa, 1999)

La geometría de la pieza debe ser realizada en un programa CAD y posteriormente ser guardada en el formato .STL. La pieza será enviada a un programa, el cual debe ser utilizado por la impresora 3D, que dividirá a la misma en capas. Una vez realizado este proceso se procede a guardar el archivo en una tarjeta SD que será insertada en la impresora.

La impresora 3D se debe calentar a una cierta temperatura, dependiendo de la misma, para empezar a trabajar ya que calienta el filamento termoplástico que va a ser extruido hacia una cama climatizada donde la pieza será impresa. El extrusor de la impresora 3D tiene movimientos cartesianos, es decir, se mueve en el eje x, y, z. (Sanchez, 2015)

5.2. Construcción

Las impresiones de las piezas se las realizó en la empresa MG⁶ por las razones vistas en capítulos anteriores. Se tuvieron que imprimir 28 piezas en dos diferentes materiales, ABS y PLA, los cuales fueron diseñados en un programa CAD y fueron guardados con el formato .STL, para poder realizar la impresión 3D se pasó las piezas al programa CURA, el cual facilita el paso de una pieza modelada en 3D a un objeto real para ser impresa por medio de la división de la mismas en diferentes capas.

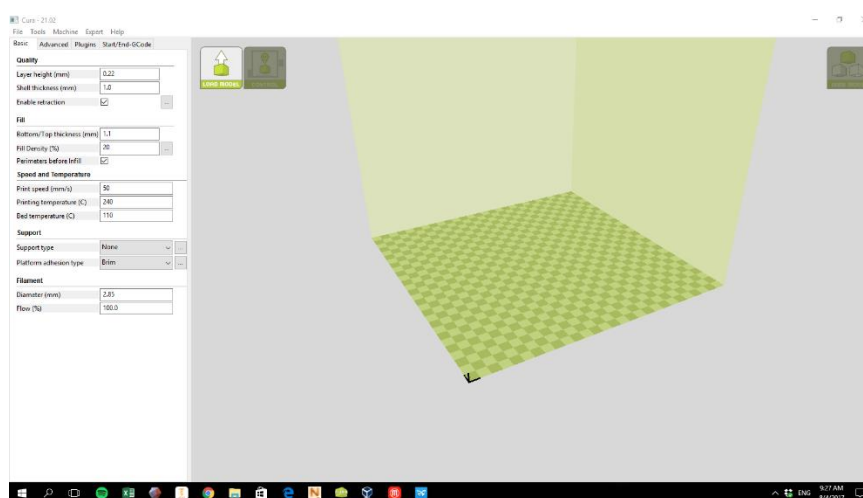


Figura 215 Interfaz del programa CURA para la realización de la impresión 3D

Fuente: (MG, 2017)

Como se muestra en la figura 215, el programa va a tener un área de impresión que es la medida de la superficie donde se imprimió las piezas, las mismas que no pueden tener medidas que sobrepasen esta base. En esta área se observa cómo va a salir la pieza al momento de ser impresa.

Todas las piezas han sido impresas con la misma dirección de las fibras para obtener las mismas propiedades mecánicas en cada una de ellas y así realizar los análisis considerando un comportamiento isotrópico. Para poder imprimir se necesita configurar los parámetros básicos de la impresión 3D, los cuales ayudan a obtener un mejor resultado con las especificaciones requeridas, las cuales son calidad, relleno, velocidad y temperatura, soporte y

⁶ Se ha omitido el nombre completo de la empresa para evitar cualquier conflicto de índole de propiedad intelectual.

filamento. Se trabajó con un relleno al 100% ya que se necesitó que las piezas se asemejen lo mejor posible a un sólido macizo para realizar los respectivos ensayos. En las piezas al 50%, 30% y 20% de masa se utilizó soportes ya que las piezas tienen una geometría compleja que no se puede sustentar, el tipo de soporte que se usó fue “Everywhere” que genera soportes apoyados en cualquier parte de la pieza. Los otros parámetros fueron escogidos por la empresa según fuera necesario.

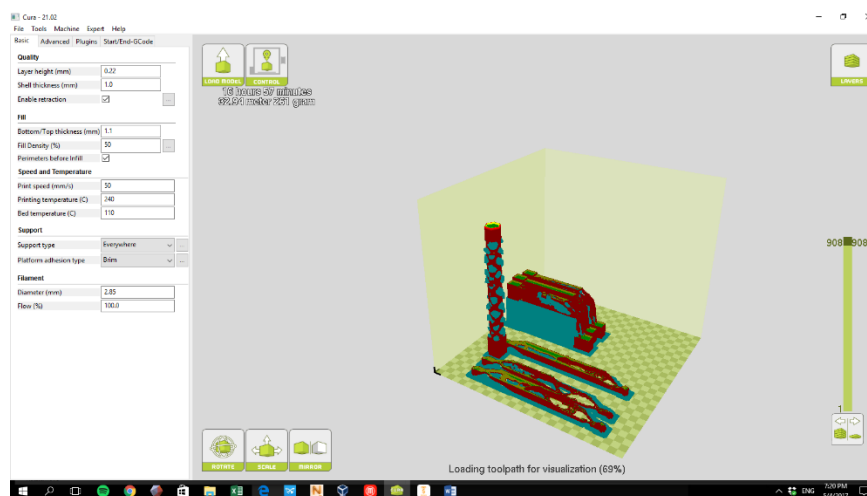


Figura 216 Aplicación de soportes en las piezas desde el programa CURA

Fuente: (MG, 2017)

Una vez que las piezas cumplan con las especificaciones requeridas se procedió a guardar los archivos en una tarjeta SD y se colocó posteriormente en la impresora Lulz bot TAZ 6 para realizar la impresión en PLA y ABS.

Se consideró clasificar las piezas en dos bloques de 14 piezas, un bloque impreso con material ABS y el otro con material PLA. Cada bloque se imprimió con las mismas especificaciones para que no exista variación en los resultados de los ensayos entre una pieza y otra. (Diosdado, 2014)

5.2.1. Especificaciones técnicas de la Impresora 3D Lulz bot TAZ 6

Tabla 18
Especificaciones técnicas de la impresora Lulz bot TAZ 6

Especificaciones Técnicas	
Requisitos de energía	100 - 240 VAC
Superficie de impresión	Con calefacción cama de vidrio de borosilicato cubierta con superficie de impresión PEI.
Área de impresión	280 mm x 280 mm x 250 mm (11,02 pulgadas x 11.02 x 9.8 in)
La velocidad máxima de impresión	200 mm / seg (7,9 pulgadas / seg)
Promedio Velocidad de impresión	30 - 50 mm / seg (1,18 - 1,97 pulg) usando por defecto el perfil nGen
Espesor (Layer Thickness)	0,05 mm - 0,5 mm (0,002 pulgadas - 0,0196 pulgadas)
Materiales soportados	ABS, PLA, caderas, PVA, filamentos llenos de madera, poliéster (Tritan), PETT, bronce, cobre, filamentos de acero llenas inoxidable, policarbonato, nylon, PETG, PLA conductor y ABS, filamentos luminiscentes UV, PCTPE, PC – ABS.
Utilizables de incandescencia Tamaños	3 mm estándar (0,1 pulgadas)
Temperatura de funcionamiento máxima:	Extrusora: 300 ° C (572 ° F) Cama climatizada: 120 ° C (248 ° F)

Fuente: (Rambal)



Figura 217 Impresora 3D Lulz bot TAZ 6

Fuente: (Rambal)

5.2.2. Prototipos impresos



Figura 218 Prototipos impresos de la viga rectangular a flexión con el 100%, 50%, 30% y 20% de masa, Material ABS y PLA



Figura 219 Prototipos impresos del cilindro a torsión con el 100%, 50%, 30% y 20% de masa, Material ABS y PLA



Figura 220 Prototipos impresos del prisma cuadrado a flexo torsión con el 100%, 50%, 30% y 20% de masa, Material ABS y PLA

CAPITULO VI

6. ENSAYOS MECÁNICOS

6.1. Operación de instrumentos y equipos a utilizar

Para el presente proyecto se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos pertenecientes al Laboratorio de Mecánica de Materiales del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la ESPE que se muestran a continuación.

- **Máquina de ensayos universales MTS capacidad de 5KN**

Tabla 19
Características técnicas, Máquina de ensayos universales MTS capacidad de 5 KN

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
CAPACIDAD: TRACCIÓN 10 t - COMPRESIÓN 200t
VOLTAGE: 220V
FASES: 3
PESO: 500 Kg
CICLOS : 50Hz
TIPO DE MOTOR: P - 8
POTENCIA DEL MOTOR: 2 HP
VELOCIDAD MAXIMA MOTOR : 1700 rpm
FRECUENCIA DE CALIBRACIÓN: CADA 3 AÑOS



Figura 221 Máquinas de ensayos universales MTS, capacidad 5 KN

- **Máquina de ensayos universales**

Tabla 20
Características técnicas, Máquina de ensayos universales

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
VOLTAJE: 110/120 V
FASES : 1
CICLOS: 60 Hz
PESO : NA
CAPACIDAD: 5.000 N
REVOLUCIONES MAX. DEL MOTOR : NA



Figura 222 Máquina de ensayos universales

- **Calibrador de toquimetro**

Tabla 21
Características técnicas, Calibrador de toquimetro

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
VOLTAJE: 12 V
FASES : 1
CICLOS : 60 Hz
PESO : 3 Kg
CAPACIDAD: 6K inch-lbs



Figura 223 Calibrador de toquimetro

- **Calibrador**

Tabla 22
Características técnicas, Calibrador

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
Apreciación: 0.01
Rango: 150 mm
Tipo: Digital



Figura 224 Calibrador

- **Entenalla**

Tabla 23
Características técnicas, Entenalla

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
CAPACIDAD DE ABERTURA: hasta 100 mm
PESO : 5 Kg
ANCHO DE LA MORDAZA: 100 mm



Figura 225 Entenalla

- **Comparador de reloj**

Tabla 24 Características técnicas,
Comparador de reloj

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
Apreciación: 0.01 mm
Rango: 25 mm
Marca: Mitutoyo



Figura 226 Comparador de reloj

- **Pesos**

Peso de 5 [Kg]

Peso de 2.5 [Kg]



Figura 227 Pesos

- **Balanza**

Tabla 25
Características técnicas, Balanza

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
Apreciación: 0.01 mm
Rango: 1000 g
Tipo: digital



Figura 228 Balanza

6.2. Protocolo de Pruebas y resultados

Las pruebas que se realizaron en los elementos optimizados fueron de flexión en la viga rectangular, torsión en el cilindro y flexo torsión en el prisma cuadrado.

6.2.1. Flexión

Para las pruebas de flexión se utilizó la máquina de ensayos universales MTS capacidad 5 KN que dispone de medidores de fuerza y desplazamiento.

El ensayo se realizó en la viga con el 100% de masa y en las vigas optimizadas topológicamente al 50%, 30% y 20% de masa con los materiales ABS y PLA. Primeramente se midió la longitud entre apoyos de cada una y su peso respectivo, se colocó en la máquina de ensayos y se procedió aplicar una fuerza hasta la rotura de las mismas.

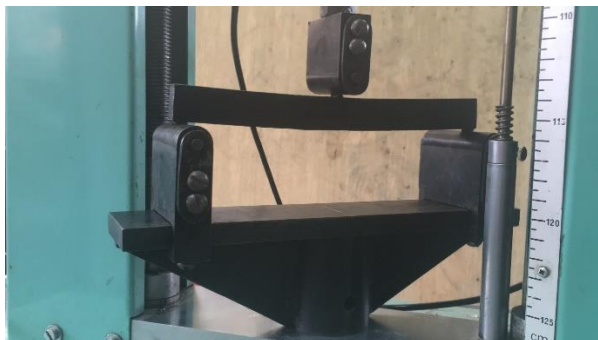


Figura 229 Ensayo de flexión en vigas

La máquina dará como resultados los datos de fuerza en Newton y el desplazamiento en milímetros, y se muestran a continuación.

Material ABS

- **Viga con el 100% de masa**

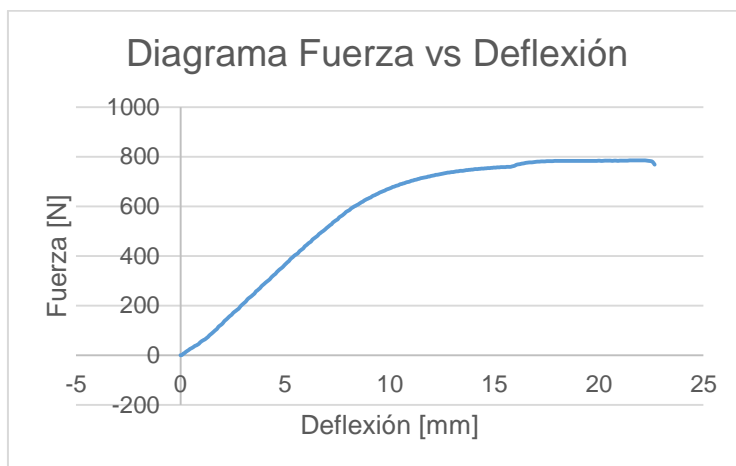


Figura 230 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 100% de masa, Material ABS

En vista de que en la simulación se aplicó una fuerza de 500 [N] obteniéndose una deflexión de 6.02 [mm], del diagrama obtenido se observa que con la misma fuerza va a existir un desplazamiento de 6.81 [mm].

- **Viga optimizada topológicamente al 50% de masa.**

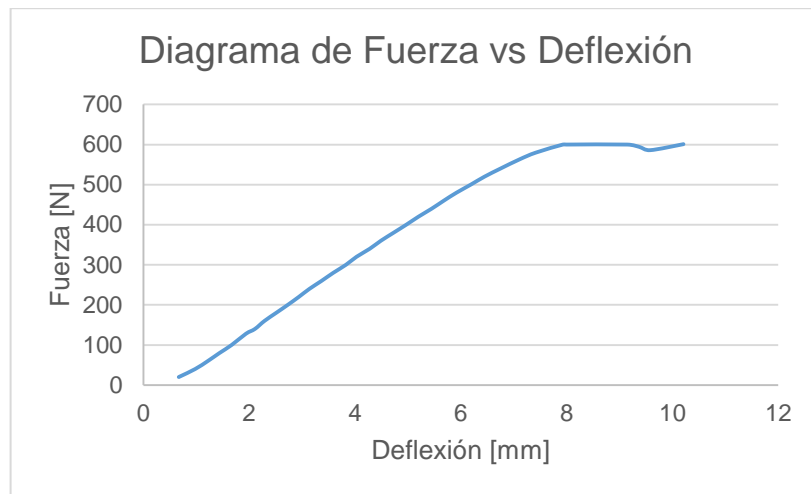


Figura 231 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 50% de masa, Material ABS

En la simulación se observó que con una fuerza de 500 [N] existió una deflexión de 8.13 [mm], y en los resultados de los ensayos realizados, mostrados en la figura 231, con esa misma fuerza fue de 6.19 [mm].

- **Viga optimizada topológicamente al 30% de masa.**

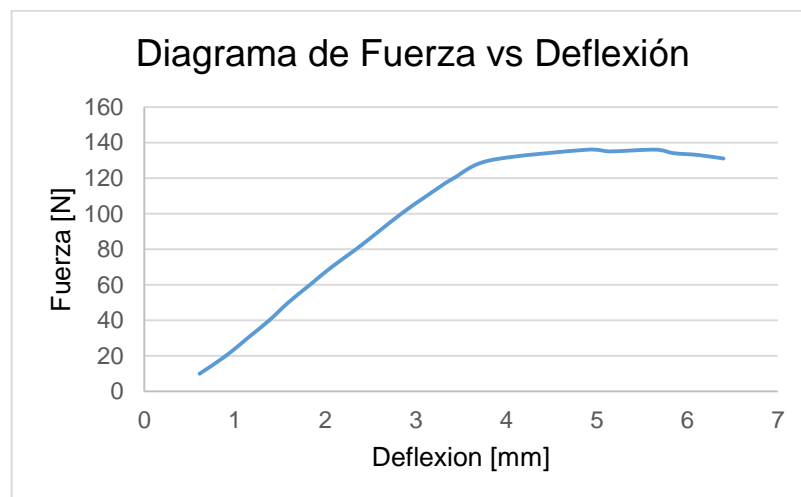


Figura 232 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 30% de masa, Material ABS

En la simulación de la viga optimizada al 30% de la masa se aplicó una fuerza de 100 [N] que tuvo una deflexión de 2.87 [mm], el resultado obtenido

en el ensayo con la misma fuerza fue de 2.84 [mm] como se muestra en la figura 232.

- **Viga optimizada topológicamente al 20% de masa.**

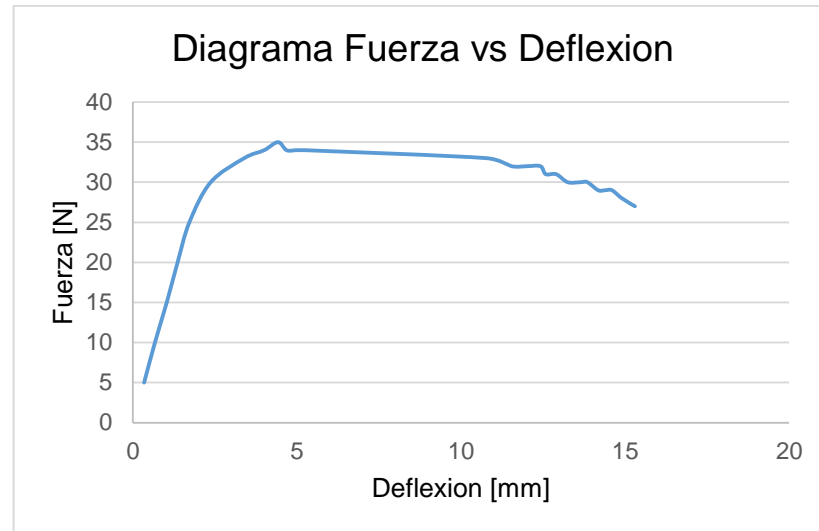


Figura 233 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 20% de masa, Material ABS

Para la simulación de la viga optimizada con el 20% de la masa se aplicó una carga de 20 [N] con la cual se obtuvo una deflexión de 1.99 [mm], el resultado de deflexión del ensayos de flexión con la misma carga es de 1.36 [mm].

Material PLA

- **Viga 100% de masa**

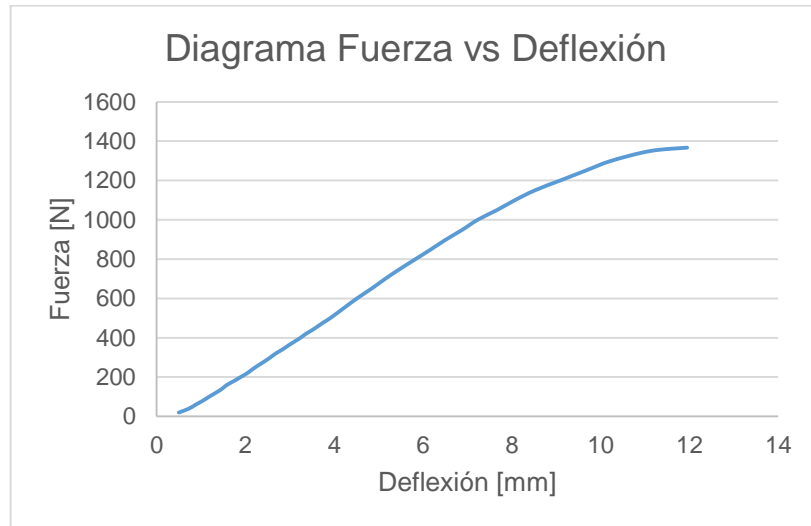


Figura 234 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 100% de masa, Material PLA

Al momento de realizar la simulación se colocó una carga de 500 [N] con la cual se consiguió una deflexión de 3.25 [mm], mientras que en los ensayos, con la misma carga, se obtuvo un valor de 3.91 [mm].

- **Viga optimizada topológicamente al 50% de masa.**

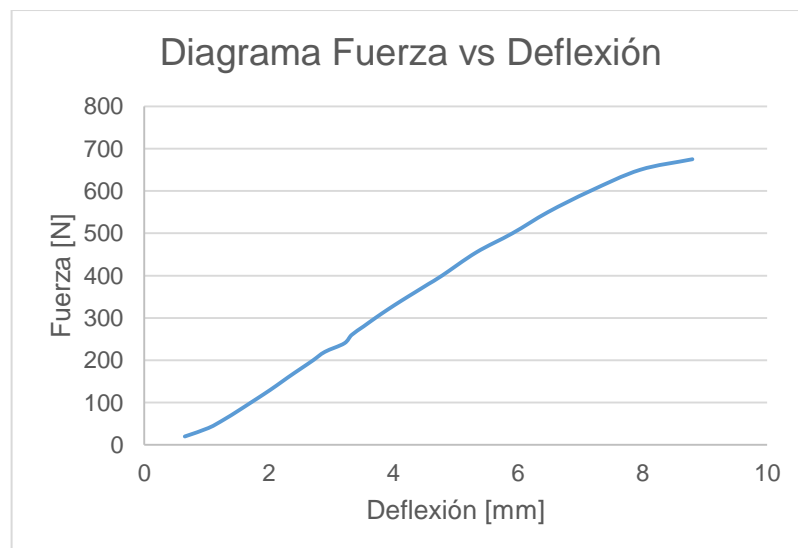


Figura 235 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 50% de masa, Material PLA

Para realizar la simulación de la viga se aplicó una carga de 500 [N] donde se obtuvo una deflexión de 4.26 [mm]. Con el mismo valor de la carga, en los resultados de los ensayos, se obtuvo una deflexión de 5.91 [mm] como se muestra en la figura 235.

- **Viga optimizada topológicamente al 30% de masa.**

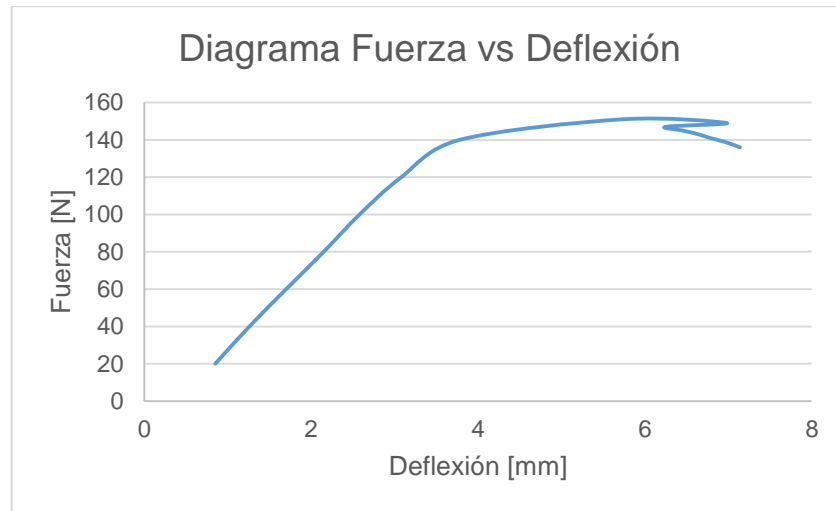


Figura 236 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 30% de masa, Material PLA

Para la simulación se colocó una carga de 151 [N] y se obtuvo una deflexión de 2.21 [mm], así mismo, en los ensayos se obtuvo una deflexión de 5.73 [mm] para la misma carga.

- **Viga optimizada topológicamente al 20% de masa.**

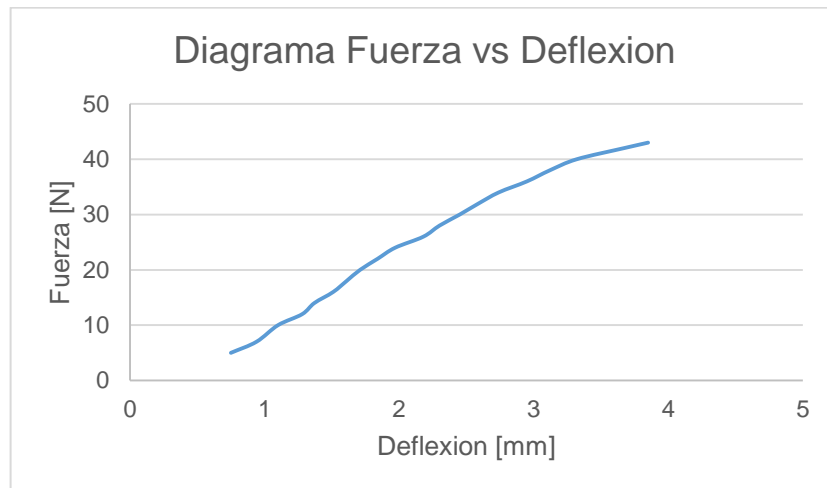


Figura 237 Diagrama Fuerza Vs Deflexión de la viga con el 20% de masa, Material PLA

En la simulación de la viga optimizada al 20% se colocó una carga de 30 [N] donde se obtuvo una deflexión de 1.51 [mm], con la misma carga se obtuvo un resultado de 2.45 [mm] en los ensayos realizados.

6.2.2. Torsión

Para los ensayos de torsión en las vigas cilíndricas con el 100% de masa y optimizadas topológicamente con el 50%, 30% y 20% se colocó el dado rectangular en el calibrador del toquimetro para poder leer el torque que se está aplicando en el elemento, en el dado hexagonal se colocó una llave para ajustar pernos de ruedas de automóviles con el cual se aplicó el torque manualmente, donde se aplicó dos fuerzas iguales pero en diferente dirección alrededor del eje axial con el fin de que al aplicar la ecuación de la estática sumatoria de fuerzas en dirección vertical, estas dos fuerzas se anulen por lo tanto el efecto de la fuerza cortante y del momento flector se anule; y en el extremo de la llave se colocó el comparador de reloj para saber el desplazamiento que tuvo el elemento y con ese dato resultante obtener el ángulo de torsión del mismo. El ensayo de flexión se muestra en la figura 238.



Figura 238 Ensayo de torsión en el elemento cilíndrico

Se sacaron tres medidas de desplazamiento de cada torque aplicado, se realizó un promedio y luego se obtuvo los ángulos de torsión en grados con el mismo procedimiento realizado en capítulos anteriores.

Material ABS

- Cilindro con el 100% de masa

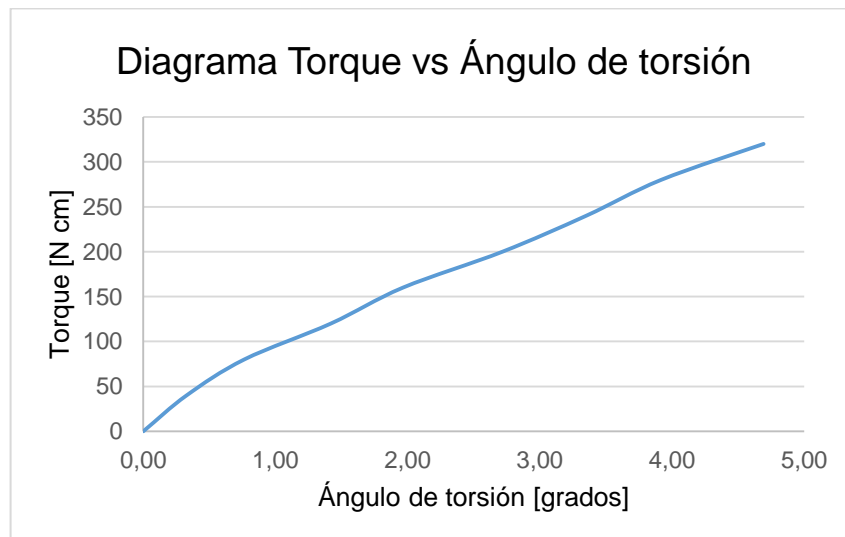


Figura 239 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 100% de masa, Material ABS

Para la simulación del cilindro se colocó un torque de 3200 [N m] (320 [N cm]) obteniéndose un ángulo de torsión de 3.69 °, los resultados fueron de 4.69 ° con el mismo torque aplicado en los ensayos de torsión.

- **Cilindro optimizado topológicamente con el 50% de masa**

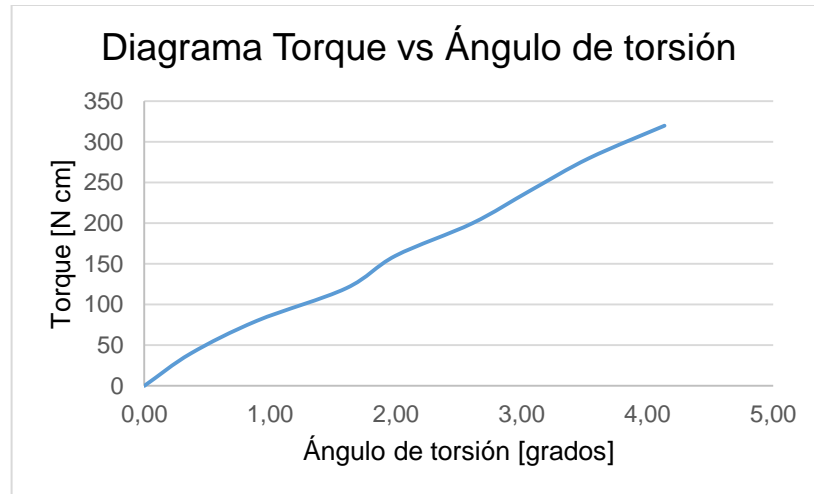


Figura 240 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 50% de masa, Material ABS

Para la simulación del cilindro optimizado con el 50% de masa se aplicó un torque de 3200 [N mm] con un ángulo de torsión de 4.83 °, en los ensayos de torsión se obtuvo un ángulo de torsión de 4.14 ° con el mismo torque.

- **Cilindro optimizado topológicamente con el 30% de masa**

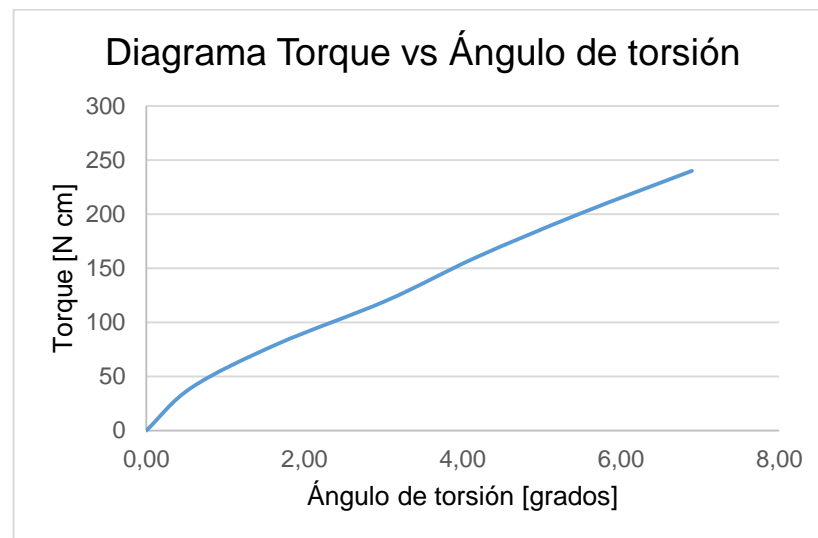


Figura 241 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 30% de masa, Material ABS

En la simulación del cilindro al 30% de masa se colocó un torque 240 [N cm] obteniéndose un ángulo de torsión de 6.44 °, mientras que en los ensayos de torsión el ángulo fue de 6.90 °, para el mismo torque.

- **Cilindro optimizado topológicamente con el 20% de masa**

En vista de que la impresora no une bien las uniones de las hélices, el elemento no tiene resistencia a ningún torque y por esta razón no se han obtenido resultados en el ensayo de torsión.

Material PLA

- **Cilindro con el 100% de masa**

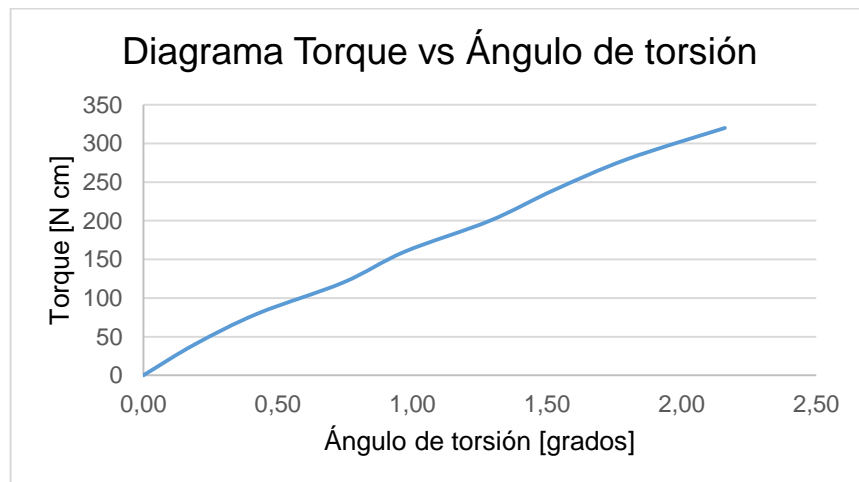


Figura 242 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 100% de masa, Material PLA

Para la simulación se aplicó un torque de 320 [N cm] obteniéndose un ángulo de torsión de 2.02 °, mientras que en los ensayos de torsión se obtuvo un ángulo de 2.16 °.

- **Cilindro optimizado topológicamente con el 50% de masa**

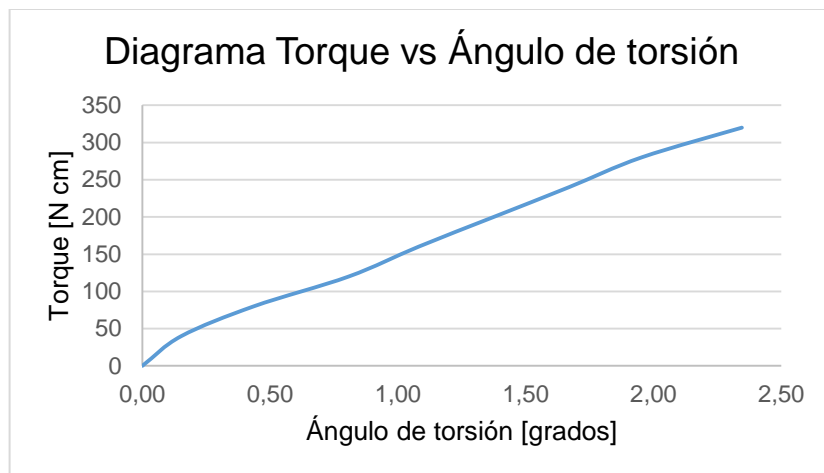


Figura 243 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 50% de masa, Material PLA

En la simulación del cilindro optimizado con el 50% de la masa se colocó un torque de 320 [N cm] en donde se obtuvo un ángulo de torsión de 2.61 °. Con el mismo torque, en el ensayo de torsión, se obtuvo un ángulo de 2.35 °.

- **Cilindro optimizado topológicamente con el 30% de masa**

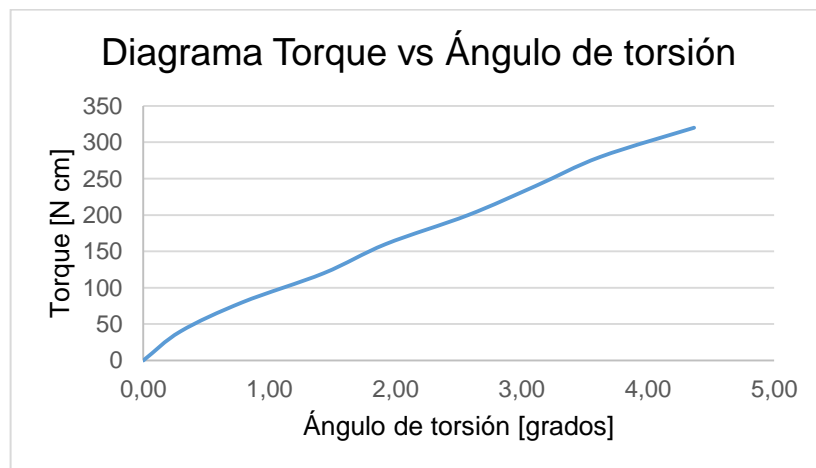


Figura 244 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 30% de masa, Material PLA

En la simulación del cilindro optimizado con el 30% de masa se aplicó un torque de 320 [N cm] y se obtuvo un ángulo de torsión de 4.64 °, así mismo, en los ensayos se obtuvo un ángulo de 4.37° con el mismo torque.

- **Cilindro optimizado topológicamente con el 20% de masa**

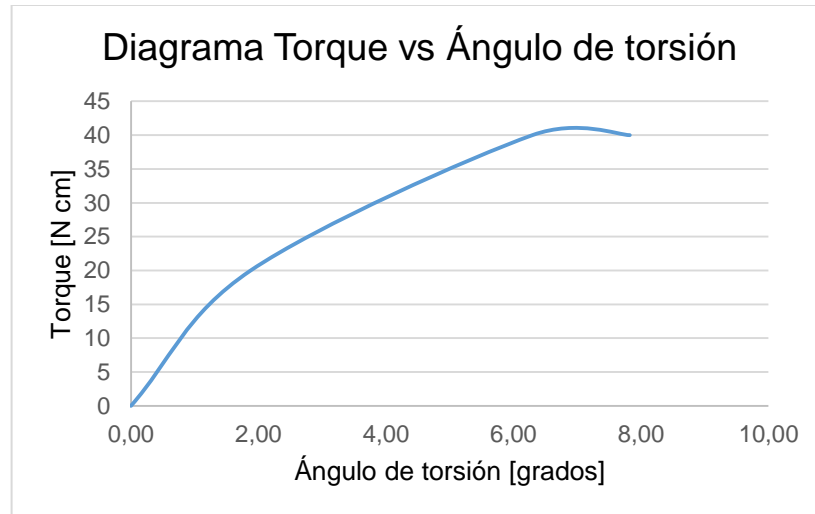


Figura 245 Diagrama torque vs ángulo de torsión del cilindro con el 20% de masa, Material PLA

En el ensayo de torsión, aplicando un torque de 40 [N cm] en el cilindro optimizado con el 20% de masa se obtuvo dos valores de ángulo de torsión de 6.30 ° y 7.82 °.

6.2.3. Flexo Torsión

Para realizar el ensayo de flexo torsión se colocó el dado cuadrado del prisma en la entenalla, la cual se comportó como una sujeción de empotramiento, se usó un nivel para que el prisma se encuentre totalmente recto y en un extremo lateral del prisma se aplicó pesos de 2.5 [Kg] y de 5 [Kg], los cuales fueron sostenidos por medio de un hilo y del porta pesos. Para medir el desplazamiento se colocó un comparador de reloj en el extremo donde se aplicaron las cargas como se muestra en la figura 246.



Figura 246 Nivelación del prisma cuadrado a flexo torsión



Figura 247 Ensayo de flexo torsión en el prisma cuadrado

Los datos que se obtuvieron en el ensayo fueron el desplazamiento en el prisma generado por las fuerzas aplicadas y para obtener el torque se multiplicó la mitad del ancho de la sección transversal del prisma con las cargas aplicadas por parte de los pesos.

Material ABS

- **Prisma cuadrado con el 100% de masa**

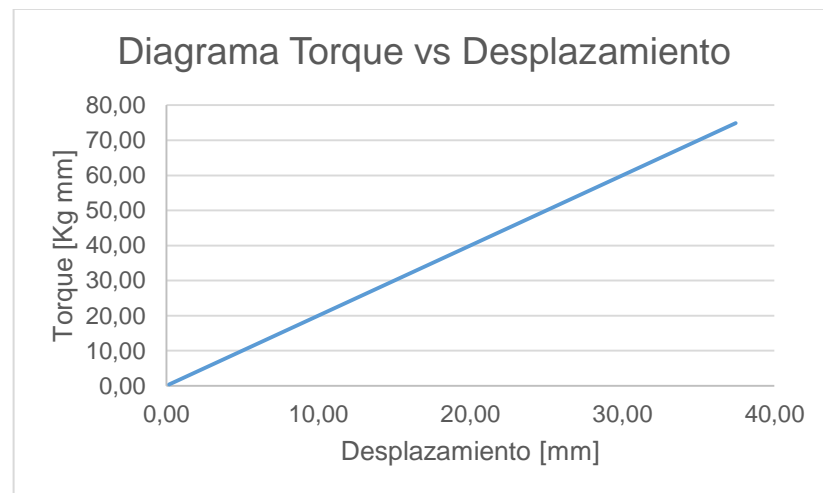


Figura 248 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 100% de masa, Material ABS

En la simulación del prisma cuadrado con el 100% de masa se aplicó una fuerza de 5 [kg], 49.05 [N], dando un desplazamiento de 0.36 [mm] mientras que en el ensayo, con la misma fuerza, se obtuvo un desplazamiento de 0.37 [mm].

- **Prisma cuadrado optimizado topológicamente con el 50% de masa**

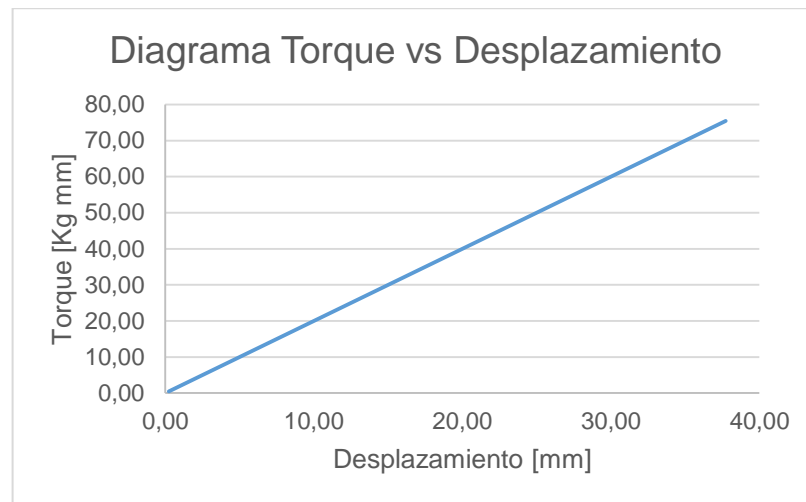


Figura 249 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 50% de masa, Material ABS

En la simulación del prisma optimizado con el 50% de masa con una carga de 5 [Kg] se obtuvo un desplazamiento de 0.45 [mm] y en los ensayos el desplazamiento fue de 0.47 [mm] con la misma carga.

- **Prisma cuadrado optimizado topológicamente con el 30% de masa**

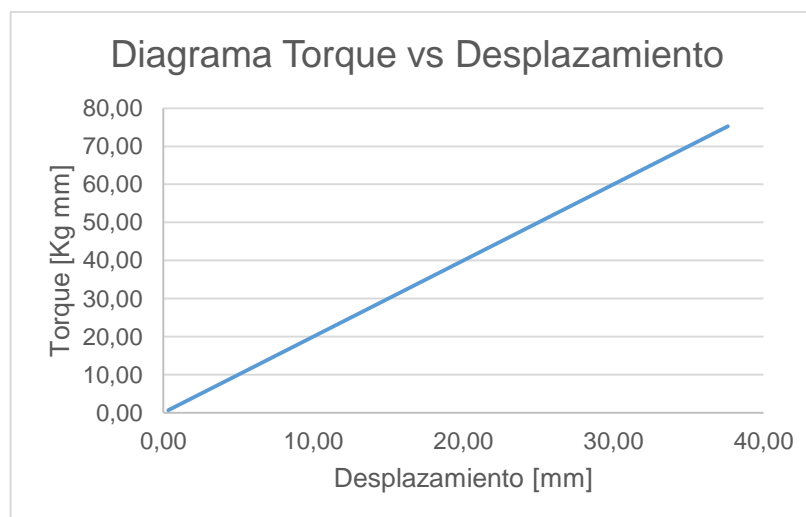


Figura 250 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 30% de masa, Material ABS

En la simulación del prisma optimizado al 30% de masa con la carga de 5 [kg] se tiene un desplazamiento de 0.66 [mm] y en el ensayo de flexo torsión el desplazamiento fue de 0.67 [mm] con la misma carga.

- **Prisma cuadrado optimizado topológicamente con el 20% de masa**

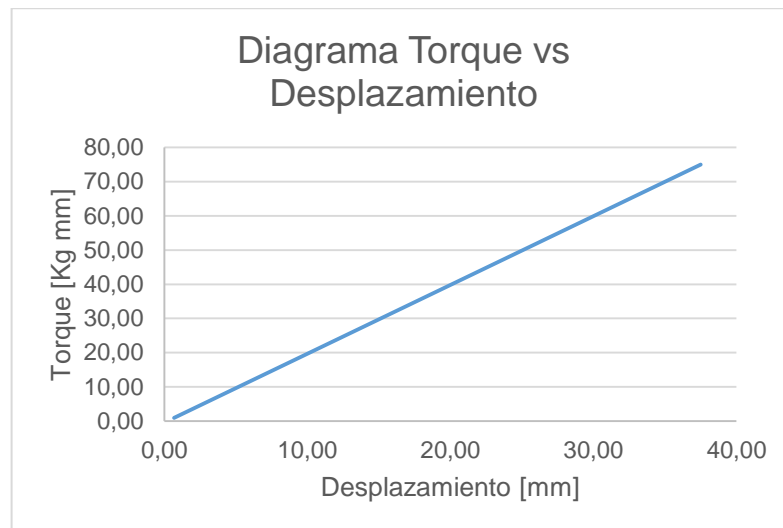


Figura 251 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 20% de masa, Material ABS

El desplazamiento que se obtuvo en la simulación realizada en el prisma al 20% de masa con un fuerza de 5 [Kg] fue de 0.96 [mm] y en el ensayo de flexo torsión el resultado fue de 0.94 [mm].

Material PLA

- **Prisma cuadrado con el 100% de masa**

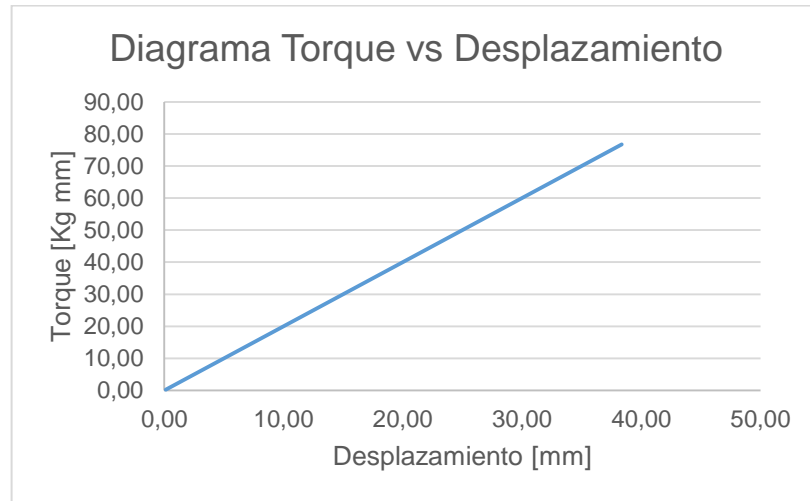


Figura 252 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 100% de masa, Material PLA

El desplazamiento obtenido en la simulación del prisma con el 100% de masa fue de 0.20 [mm] con una carga aplicada de 5 [Kg], con el mismo valor de la carga el resultado de desplazamiento en el ensayo de flexo torsión fue de 0.23 [mm].

- **Prisma cuadrado optimizado topológicamente con el 50% de masa**

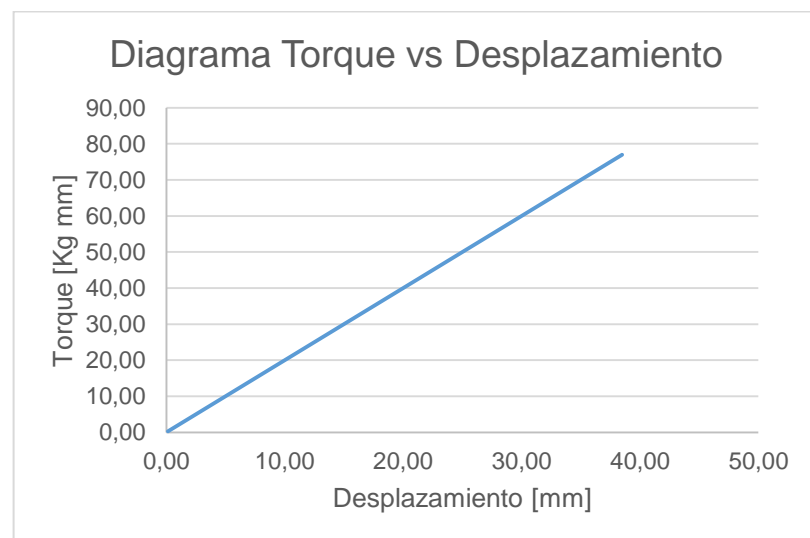


Figura 253 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 50% de masa, Material PLA

Con una carga de 5 [Kg] aplicado en el prisma optimizado al 50% de masa, en la simulación se obtuvo un desplazamiento de 0.27 [mm] y en el ensayo de flexo torsión de 0.28 [mm].

- **Prisma cuadrado optimizado topológicamente con el 30% de masa**

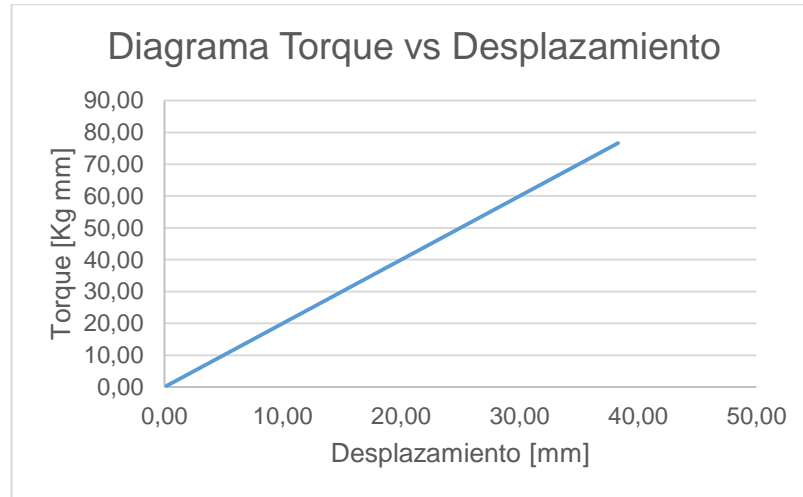


Figura 254 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 30% de masa, Material PLA

Al igual que en el prisma al 50% de masa, con una carga de 5 [Kg] se obtuvo un desplazamiento resultante de la simulación de 0.38 [mm] mientras que en el ensayo de flexo torsión el desplazamiento fue de 0.37 [mm].

- **Prisma cuadrado optimizado topológicamente con el 20% de masa**

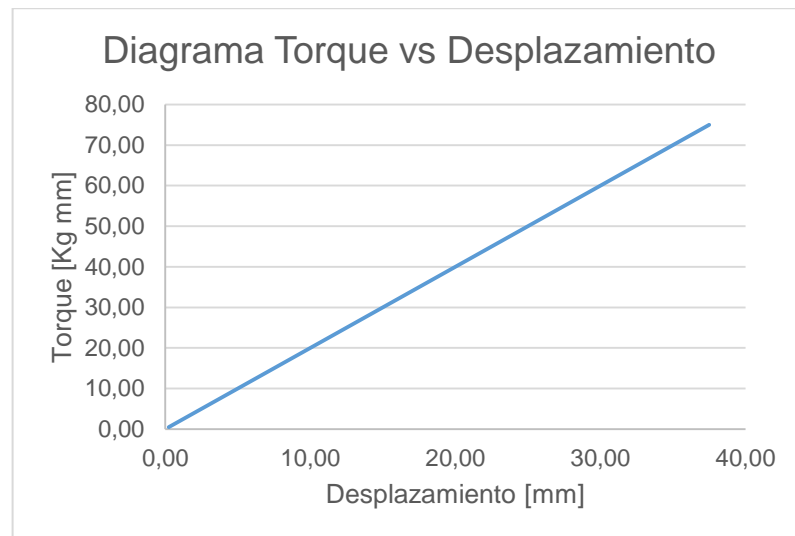


Figura 255 Diagrama Torque vs Desplazamiento del prisma con el 20% de masa, Material PLA

En la simulación del prisma con el 20% de masa aplicando un carga de 5 [Kg] se obtuvo un desplazamiento de 0.49 [mm], mientras que en el ensayo de flexo torsión se obtuvo un desplazamiento de 0.48 [mm].

CAPITULO VII

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Viga rectangular a flexión

En la tabla 26 y 27 que se muestran a continuación se observa los resultados obtenidos de las simulaciones y los ensayos realizados a las vigas con el 100% de masa y optimizadas topológica con el 50%, 30% y 20% de la masa, para los materiales ABS y PLA.

Tabla 26
Cuadro comparativo de resultados de la viga a flexión del material ABS

Material	ABS	Resultados Simulación				Resultados Ensayo de flexión	
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Carga aplicada [N]	Esfuerzo [Mpa]	Deformación Unitaria	Deflexión [mm]	Deflexión [mm]	Fuerza Máxima [N]
100	41,35	500	30,82	0,0177	6,02	6,81	785
50	22,14	500	30,16	0,0182	8,13	6,19	601
30	12,85	100	6,28	0,0038	2,87	2,84	136
20	7,96	20	1,65	0,0011	1,99	1,36	35

Tabla 27 Cuadro comparativo de resultados de la viga a flexión del material PLA

Material	PLA	Resultados Simulación				Resultados Ensayo de flexión	
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Carga aplicada [N]	Esfuerzo [Mpa]	Deformación Unitaria	Deflexión [mm]	Deflexión [mm]	Fuerza Máxima [N]
100	51,85	500	31,38	0,00969	3,25	3,91	1367
50	27,41	500	30,64	0,00980	4,26	5,91	675
30	16,44	151	10,28	0,00341	2,21	5,73	151
20	10,28	30	2,69	0,00083	1,51	2,45	43

- **Análisis de Pesos**

Según los resultados obtenidos, los pesos de las vigas bajan dependiendo del porcentaje de masa con la que se haya realizado la optimización topológica. En las tablas siguientes se observa la relación que existe entre los elementos optimizados con respecto al elemento al 100% de

masa, se puede apreciar que las piezas cumplen con el porcentaje de masa quitado por el programa Inspire, esto sucede tanto para el material ABS como para el material PLA mostrados en las tablas 28 y 29, respectivamente.

Tabla 28
Cuadro de análisis de pesos para la viga rectangular a flexión, Material ABS

Análisis de pesos			
Material	ABS		
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Relación de pesos	Error Porcentual [%]
100	41,35	100,00	0,00
50	22,14	53,54	7,09
30	12,85	31,08	3,59
20	7,96	19,25	3,75

Tabla 29
Cuadro de análisis de pesos para la viga rectangular a flexión, Material PLA

Análisis de pesos			
Material	PLA		
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Relación de pesos	Error Porcentual [%]
100	51,85	100,00	0,00
50	27,41	52,86	5,73
30	16,44	31,71	5,69
20	10,28	19,83	0,87

- **Análisis de Esfuerzos**

Tabla 30
Cuadro comparativo de resultados de esfuerzo entre el material ABS y PLA para la viga rectangular

Porcentaje de masa [%]	Esfuerzo ABS [Mpa]	Esfuerzo PLA [Mpa]
100	30,82	31,38
50	30,16	30,64
30	6,28	10,28
20	1,65	2,69

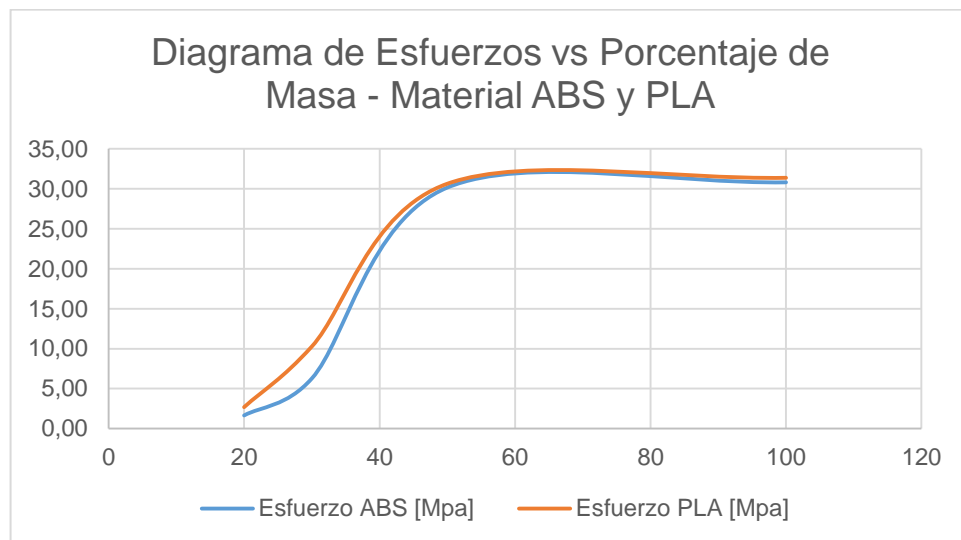


Figura 256 Diagrama de esfuerzos vs porcentaje de masa para la viga rectangular, Material ABS y PLA

En los resultados obtenidos en la simulación para el material ABS propuestos en la tabla 30, se observa que los esfuerzos van a ir disminuyendo dependiendo del porcentaje de masa que tenga la viga, sin embargo, entre el porcentaje de masa de 100% y 50% los valores de esfuerzo de 30.82 y 31.38 [MPa], respectivamente, son parecidos; esto no ocurre para el 30% y 20% de masa donde los esfuerzos, 6.28 y 1.65 [MPa], son muy bajos con respecto a los otros dos. Según la figura 256 se puede trabajar con un porcentaje de masa desde el 45% ya que mantiene una línea aproximadamente constante desde este punto hasta el 100% de masa. El mismo fenómeno ocurre también para los esfuerzos resultantes del material PLA.

En los valores de esfuerzo entre el ABS y PLA de la tabla 30, se observa que para el 100% de masa se tiene un esfuerzo de 30.82 [MPa] (ABS) y 31.38 [MPa] (PLA), con el 50% de masa el esfuerzo es de 30.16 [MPa] (ABS) y 30.64 [MPa] (PLA), con el 30% de masa el esfuerzo es de 6.28 [MPa] (ABS) y 10.28 [MPa] (PLA) y con el 20% de masa el esfuerzo es de 1.68 [MPa] (ABS) y 2.92 [MPa] (PLA). Se puede ver que los valores entre ABS y PLA son parecidos debido a que los esfuerzos solo dependen de la fuerza y de las características geométricas mas no del material y el Coeficiente de Poisson.

- **Análisis de Deformaciones Unitarias**

Tabla 31

Cuadro comparativo de resultados de deformaciones unitarias entre el material ABS y PLA para la viga rectangular

Porcentaje de masa [%]	Deformación Unitaria ABS	Deformación Unitaria PLA
100	0,0177	0,00969
50	0,0182	0,00980
30	0,0038	0,00341
20	0,0011	0,00083

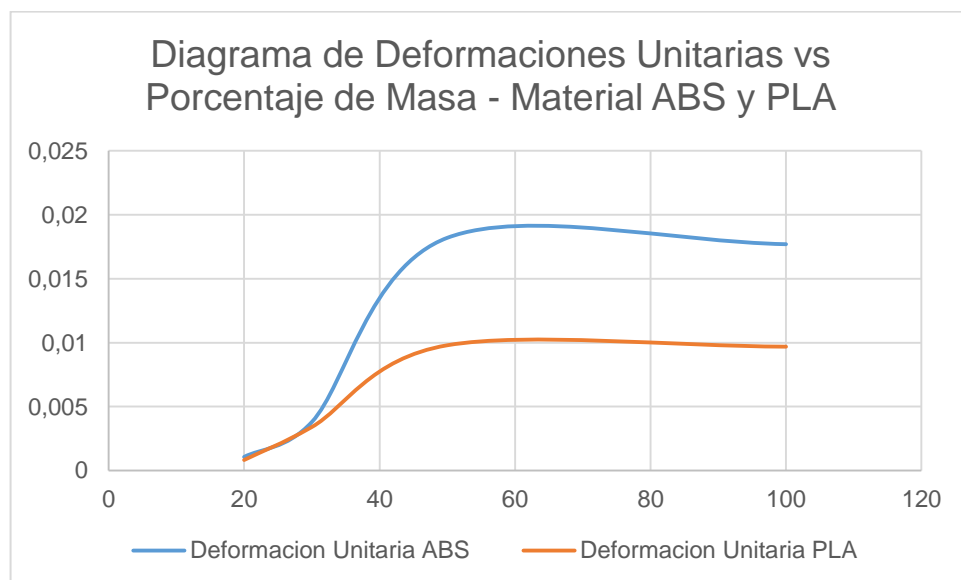


Figura 257 Diagrama de deformación unitaria vs porcentaje de masa para la viga rectangular, Material ABS y PLA

Del diagrama mostrado en la figura 257 se observa que desde el 45% de masa los valores de deformación unitaria tienden a ser constantes hasta llegar al 100%, por lo tanto se puede realizar la optimización topológica desde un porcentaje de masa de 45%, y así obtener valores semejantes al 100%.

Comparando la tendencia de las líneas entre el material ABS y PLA se observa que existe una diferencia entre las mismas desde el 30% hasta el 100% de masa. Los valores de deformación unitaria del material PLA son

menores que los valores del material ABS, esto quiere decir que el PLA tiene una mayor rigidez que el ABS.

- **Análisis de Deflexiones**

Tabla 32

Comparación de resultados de deflexiones de la simulación y del ensayo para la viga rectangular, Material ABS

Porcentaje de masa [%]	Deflexión ABS Simulación [mm]	Deflexión ABS Ensayos [mm]	Error Porcentual [%]
100	6,02	6,81	13,12
50	8,13	6,19	23,86
30	2,87	2,84	1,05
20	1,99	1,36	31,66

Tabla 33

Comparación de resultados de deflexiones de la simulación y del ensayo para la viga rectangular, Material PLA

Porcentaje de masa [%]	Deflexión PLA Simulación [mm]	Deflexión PLA Ensayos [mm]	Error Porcentual [%]
100	3,25	3,91	20,31
50	4,26	5,91	38,73
30	2,21	5,73	61,43
20	1,51	2,45	62,25

Como se observa en las tablas 32 y 33, los valores resultantes en la simulación y en los ensayos realizados son parecidos entre sí, sin embargo, los errores porcentuales que se obtuvieron se deben a diferentes factores: por ser elementos pequeños y tener valores de deflexión pequeños los errores generados van a ser bastantes grandes, al igual que existe una pequeña variación en los pesos de las piezas se considera que sucedió lo mismo con el módulo de elasticidad en cada una de las mismas, las dimensiones de impresión no son totalmente exactas con las simuladas y existen errores de lectura de datos ya que la toma de los mismos al

momento de realizar los ensayos fue manual por fallas ocurridas en la máquina. Los valores de porcentaje de error de 30% y 20% de masa tanto para el ABS y PLA son altos debido a que existió un pandeo lateral al momento de realizar el ensayo de flexión ya que tenían dimensiones pequeñas.

- **Análisis de Fuerza**

Tabla 34

Cuadro comparativo de resultados de fuerza máxima entre el material ABS y PLA para la viga rectangular

Porcentaje de masa [%]	Fuerza Máxima (N)	
	ABS	PLA
100	785	1367
50	601	675
30	136	151
20	35	43

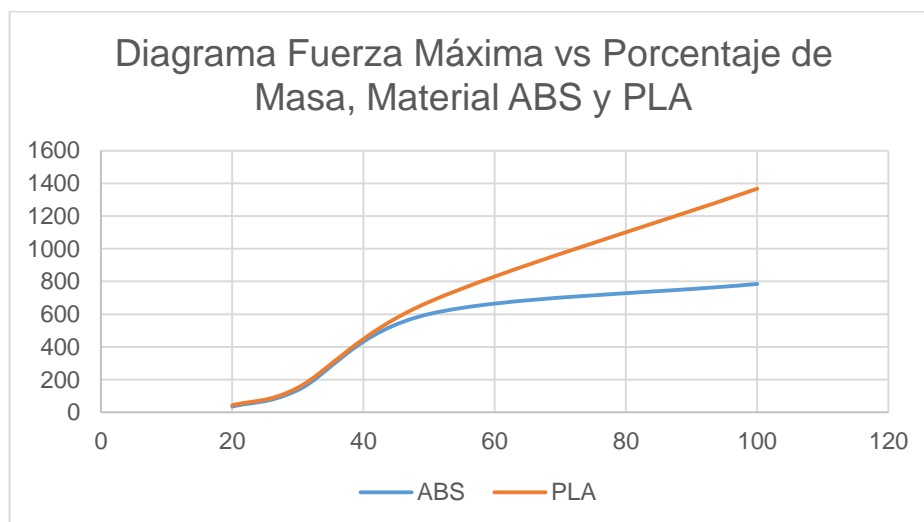


Figura 258 Diagrama de fuerza máxima vs porcentaje de masa, Material ABS y PLA

Se observa en el diagrama de la figura 258 que en los valores menores al 45% de masa los valores de resistencia casi coinciden entre los dos materiales, ABS y PLA, en cambio en valores mayores a ese porcentaje si existe una gran diferencia.

Tabla 35
Cuadro comparativo de resultados de deflexiones con una fuerza máxima entre el material ABS y PLA para la viga rectangular

Porcentaje de masa [%]	Deflexión [mm] con una Fuerza Max [N]	
	ABS	PLA
100	22.22	11.95
50	10.21	8.80
30	5.65	5.73
20	4.42	3.85

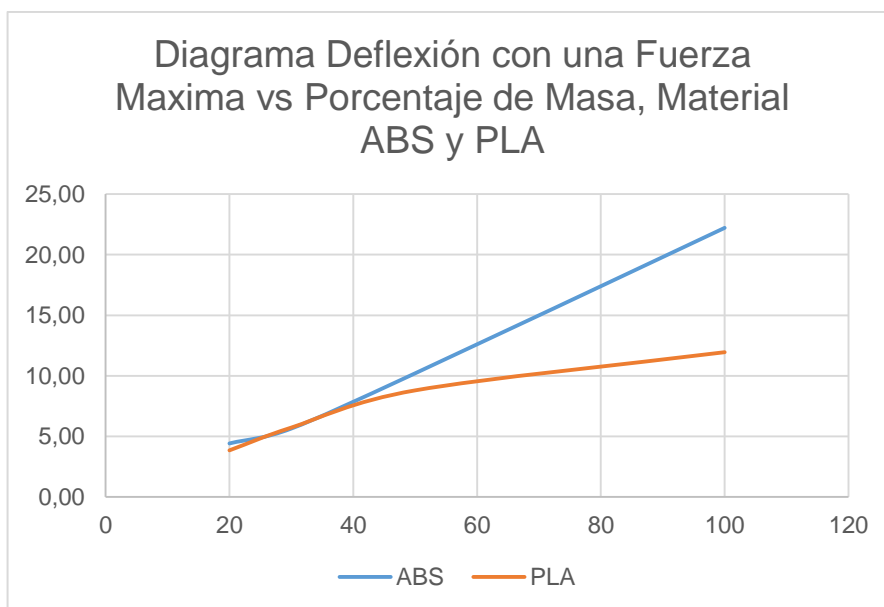


Figura 259 Diagrama de deflexión con una fuerza máxima vs porcentaje de masa para la viga rectangular, Material ABS y PLA

En el diagrama mostrado en la figura 259 se observa que el ABS va a tener una mayor deflexión con respecto al PLA y los valores de deflexión están parecidos desde los porcentajes menores al 40%

Tabla 36
Cuadro comparativo de resultados de deflexiones con una fuerza de 30 N
entre el material ABS y PLA para la viga rectangular

Porcentaje de masa [%]	Deflexión [mm] con una Fuerza 30 [N]	
	ABS	PLA
20	2,37	2,45
30	1,14	1,055
50	0,825	0,84
100	0,557	0,615

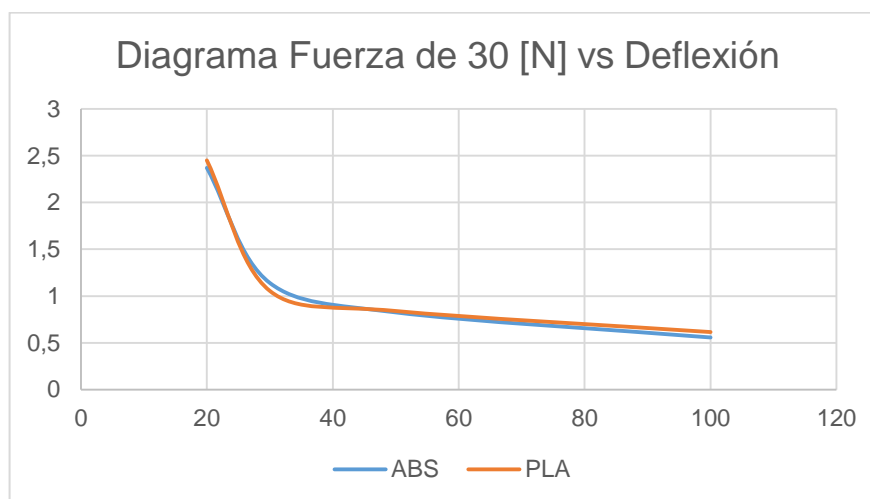


Figura 260 Diagrama de deflexión con una fuerza de 30 N vs porcentaje de masa para la viga rectangular, Material ABS y PLA

En el diagrama de la figura 260 se observa que para una fuerza de 30 [N] las líneas que representan el material ABS y PLA tienen una tendencia igual.

7.2. Cilindro a torsión

Los resultados obtenidos de las simulaciones y de los ensayos realizados a los cilindros con el 100% de masa y los optimizados topológicamente con el 50%, 30% y 20% para los materiales ABS y PLA se encuentran en la tabla 37 y 38, respectivamente.

Tabla 37
Cuadro comparativo de resultados del cilindro a torsión del material ABS

Material	ABS	Resultados Simulación			Resultados Ensayo de flexión
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Torque aplicado [N mm]	Esfuerzo Cortante [Mpa]	Ángulo de torsión [Grados]	Ángulo de torsión [Grados]
100	61,31	3200	4,96	3,69	4,69
50	61,14	3200	5,11	4,83	4,14
30	37,47	2400	5,32	6,44	6,90
20	26,23				

Tabla 38
Cuadro comparativo de resultados del cilindro a torsión del material PLA

Material	PLA	Resultados Simulación			Resultados Ensayo de flexión
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Torque aplicado [N mm]	Esfuerzo Cortante [Mpa]	Ángulo de torsión [Grados]	Ángulo de torsión [Grados]
100	76,01	3200	4,13	2,02	2,16
50	75,32	3200	5,75	2,61	2,35
30	40,32	3200	6,57	4,64	4,37
20	33,04	400			6,30- 7,82

- **Análisis de Pesos**

Los pesos de cada elemento cilíndrico dependen del porcentaje de masa con la que se haya realizado la optimización topológica, como se observa en las tablas 39 y 40 los valores de los pesos van bajando según como va bajando el porcentaje de masa usado en la optimización.

Tabla 39
Cuadro de análisis de pesos para el cilindro a torsión, Material ABS

Análisis de pesos				
Material	ABS			
Peso Dado Rectangular [g]	11,19			
Peso Dado Hexagonal [g]	5,94			
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Peso Real [g]	Relación de pesos	Error Porcentual [%]
100	61,31	44,18	100,00	0,00
30	37,47	20,34	46,04	53,46
20	26,23	9,10	20,60	2,99

Tabla 40
Cuadro de análisis de pesos para el cilindro a torsión, Material PLA

Análisis de pesos				
Material	PLA			
Peso Dado Rectangular [g]	13,96			
Peso Dado Hexagonal [g]	7,41			
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Peso Real [g]	Relación de pesos	Error Porcentual [%]
100	76,01	54,64	100,00	0,00
30	40,32	18,95	34,68	15,61
20	33,04	11,67	21,36	6,79

Para obtener el peso real de las piezas optimizadas se restó el peso de los dados rectangular y hexagonal con el peso medido. En las tablas 40 y 41, se observa que para el porcentaje de 30% y de 20% de masa la reducción de peso es consistente con el programa de optimización topológica. Esta condición ocurre tanto para el material ABS como para el material PLA.

- **Análisis de Esfuerzos Cortantes**

Tabla 41

Cuadro comparativo de resultados de esfuerzo cortante para el cilindro a torsión entre el material ABS y PLA

Porcentaje de masa [%]	Esfuerzo Cortante ABS [Mpa]	Esfuerzo Cortante PLA [Mpa]
100	4,96	4,13
50	5,11	5,75
30	5,32	6,57

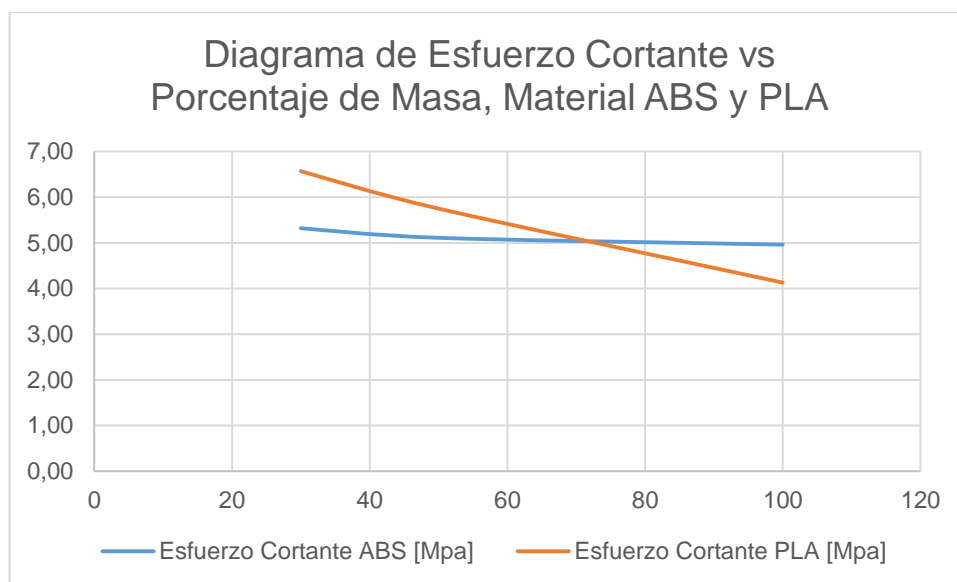


Figura 261 Diagrama de esfuerzos cortantes vs porcentaje de masa para el cilindro a torsión, Material ABS y PLA

En el diagrama de la figura 261 se observa que a partir del 45% de masa los elementos tienden a tener el mismo esfuerzo entre los dos materiales, ABS y PLA, hasta el 100%. Desde este mismo porcentaje, 45%, los esfuerzos van bajando mientras el porcentaje va subiendo.

- **Análisis de Ángulo de torsión**

Tabla 42
Comparación de resultados de ángulos de torsión de la simulación y del ensayo para el cilindro a torsión, Material ABS

Angulo de Torsión [Grados]			
ABS			
Porcentaje de masa [%]	Simulación	Ensayos	Error Porcentual [%]
100	3,75	4,69	25,07
50	4,82	4,14	-14,11
30	6,44	6,90	7,14
20	-	-	-

Tabla 43
Comparación de resultados de ángulos de torsión de la simulación y del ensayo para el cilindro a torsión, Material PLA

Angulo de Torsión [Grados]			
PLA			
Porcentaje de masa [%]	Simulación	Ensayos	Error Porcentual [%]
100	2,02	2,16	6,93
50	2,61	2,35	-9,96
30	4,64	4,37	-5,82
20	-	6,30- 7,82	-

Como se observa en las tablas 42 y 43, los valores obtenidos en la simulación y en los ensayos realizados son parecidos entre sí, sin embargo los errores porcentuales que se obtuvieron se deben a los mismos factores observados en la viga rectangular. También podemos observar que los valores de ángulo de torsión para el material PLA son menores que para el ABS, por lo tanto tiene una mayor rigidez que el otro material.

7.3. Prisma cuadrado a flexo torsión

Los resultados obtenidos de las simulaciones y los ensayos realizados en el prisma cuadrado con el 100% de masa y optimizados topológicamente al

50%, 30% y 20% para los materiales ABS y PLA, se encuentran en las tablas 44 y 45, respectivamente.

Tabla 44
Cuadro comparativo de resultados del prisma cuadrado a flexo torsión del material ABS

Material	ABS	Resultados Simulación				Resultados Ensayo de flexión
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Carga aplicada [N]	Esfuerzo [Mpa]	Deformación Unitaria	Desplazamiento [mm]	Desplazamiento [mm]
100	133,23	49,05 [N]	1,3400000	0,0001680	0,36	0,37
50	80,96	49,05 [N]	0,0000053	0,0000041	0,45	0,47
30	57,73	49,05 [N]	0,0000073	0,0000042	0,66	0,67
20	45,57	49,05 [N]	0,0000096	0,0000093	0,96	0,94

Tabla 45
Cuadro comparativo de resultados del prisma cuadrado a flexo torsión del material PLA

Material	PLA	Resultados Simulación				Resultados Ensayo de flexión
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Carga aplicada [N]	Esfuerzo [Mpa]	Deformación Unitaria	Desplazamiento [mm]	Desplazamiento [mm]
100	165,14	49,05 [N]	1,4030000	0,0009200	0,20	0,23
50	100,99	49,05 [N]	0,0000053	0,0000014	0,27	0,28
30	72,13	49,05 [N]	0,0000078	0,0000022	0,38	0,37
20	57,75	49,05 [N]	0,0000097	0,0000029	0,49	0,48

- **Análisis de Pesos**

Al igual que en los casos anteriores de viga a flexión y de cilindro a torsión, se observa en las tablas 46 y 47 que los pesos van a ir

disminuyendo según como vaya disminuyendo el porcentaje de optimización que se haya utilizado. Esto ocurre para los dos materiales, ABS y PLA.

Tabla 46
Cuadro de análisis de pesos para el prisma cuadrado a flexo torsión, Material ABS

Análisis de pesos				
Material	ABS			
Peso Dado Rectangular [g]	23,12			
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Peso Real [g]	Relación de pesos	Error Porcentual [%]
100	133,23	110,11	100,00	0,00
50	80,96	57,84	52,53	5,06
30	57,73	34,61	31,43	4,77
20	45,57	22,45	20,39	1,94

Tabla 47
Cuadro de análisis de pesos para el prisma cuadrado a flexo torsión, Material PLA

Análisis de pesos				
Material	PLA			
Peso Dado Rectangular [g]	28,84			
Porcentaje de masa [%]	Peso [g]	Peso Real [g]	Relación de pesos	Error Porcentual [%]
100	165,14	136,3	100,00	0,00
50	100,99	72,15	52,93	5,87
30	72,13	43,29	31,76	5,87
20	57,75	28,91	21,21	6,05

Para obtener el peso real en los diferentes porcentajes de masa del prisma, se restó el peso del dado rectangular del peso medido. Como se observa en las tablas 46 y 47 la relación de pesos en cada porcentaje de masa coincide con los porcentajes optimizados topológicamente del programa Inspire.

- **Análisis de Esfuerzos**

Tabla 48

Cuadro comparativo de resultados de esfuerzo entre el material ABS y PLA para el prisma cuadrado

Porcentaje de masa [%]	Esfuerzo ABS [Mpa]	Esfuerzo PLA [Mpa]
100	1,3400000	1,4030000
50	0,0000053	0,0000053
30	0,0000073	0,0000078
20	0,0000096	0,0000097

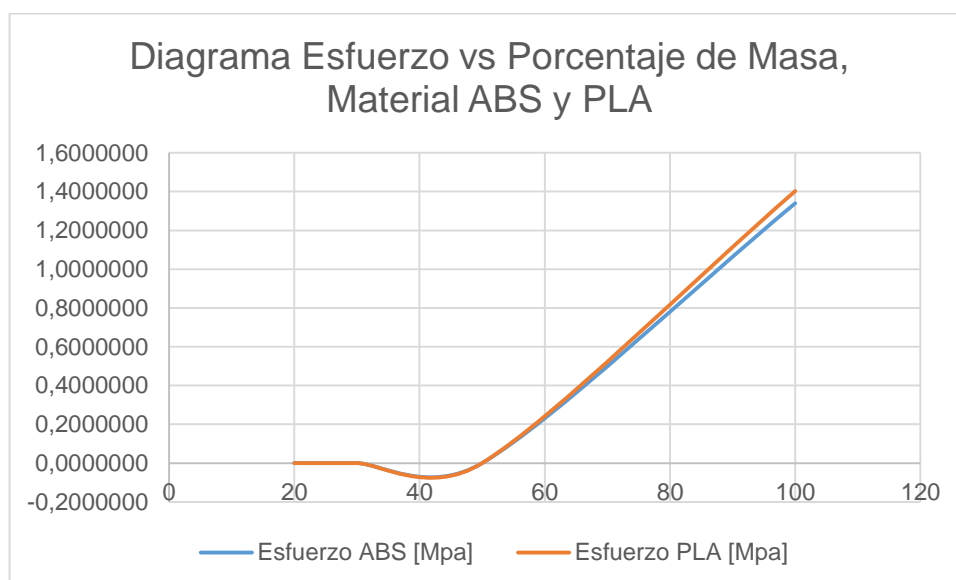


Figura 262 Diagrama de esfuerzos vs porcentaje de masa para el prisma cuadrado, Material ABS y PLA

En el diagrama de la figura 262 se observa que los esfuerzos para el material ABS y PLA tienen una misma tendencia, en donde al 45% de masa los esfuerzos van subiendo hasta el 100%. Como se observó en los análisis anteriores, el esfuerzo solamente depende de la fuerza aplicada y de la geometría de la misma. Los esfuerzos en el prisma son muy bajos con los porcentajes de 50%, 30% y 20% de masa con respecto al 100% de peso.

- **Análisis de Deformaciones Unitarias**

Tabla 49

Cuadro comparativo de resultados de deformaciones unitarias entre el material ABS y PLA para el prisma cuadrado

Porcentaje de masa [%]	Deformación Unitaria ABS	Deformación Unitaria PLA
100	0,0001680	0,0009200
50	0,0000041	0,0000014
30	0,0000042	0,0000022
20	0,0000093	0,0000029

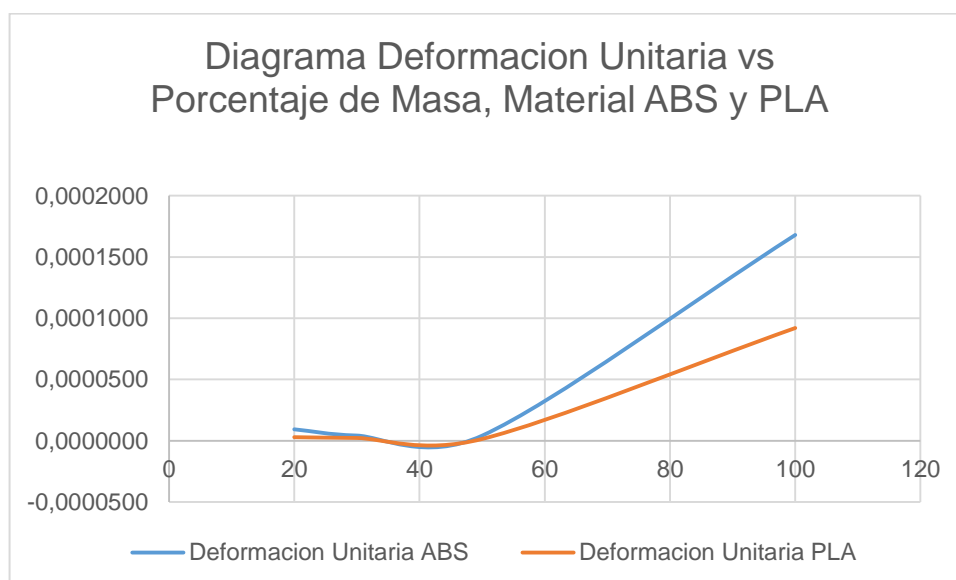


Figura 263 Diagrama de deformación unitaria vs porcentaje de masa para el prisma cuadrado, Material ABS y PLA

En el diagrama de figura 263 se puede observar que los valores de deformación unitaria son menores para el material PLA por lo tanto tiene una mayor rigidez que el ABS. También se observa que a partir del 45% de masa los valores de deformación unitaria tienden a ser constantes por lo que se puede realizar la optimización topológica desde ese porcentaje de peso, tanto para el ABS como para el PLA.

- **Análisis de Desplazamientos**

Tabla 50

Comparación de resultados de desplazamientos de la simulación y del ensayo para el prisma cuadrado, Material ABS

Desplazamientos [mm]			
ABS			
Porcentaje de masa [%]	Simulación	Ensayos	Error Porcentual [%]
100	0,36	0,37	1,65
50	0,45	0,47	4,44
30	0,66	0,67	2,21
20	0,96	0,94	-2,08

Tabla 51 Comparación de resultados de desplazamientos de la simulación y del ensayo para el prisma cuadrado, Material PLA

Desplazamientos [mm]			
PLA			
Porcentaje de masa [%]	Simulación	Ensayos	Error Porcentual [%]
100	0,20	0,23	15,58
50	0,27	0,28	2,94
30	0,38	0,37	-2,89
20	0,49	0,48	-2,44

Como se observa en las tablas 50 y 51, los valores obtenidos en la simulación y en los ensayos realizados son parecidos entre sí, los porcentajes de errores que se obtuvieron se deben a los factores analizados en la viga rectangular.

CAPITULO VIII

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- La optimización topológica es de gran ayuda al momento de realizar el diseño de un elemento de cualquier tipo de material como acero, plástico, hierro, aluminio, entre otros, ya que se puede optimizar el peso del elemento, su geometría y el costo del mismo.
- Se observó que el análisis de optimización topológica no depende del material ni del tipo de cargas que se estén aplicando, solamente depende del tipo de apoyos que tenga el elemento, del porcentaje de masa con que se vaya a trabajar y de las restricciones de espesor.
- Se observó que el programa Inspire 9.5 realiza la optimización topológica buscando la máxima rigidez con diferentes porcentajes de masa y con la máxima inercia posible en el elemento. El programa busca dejar el mismo esfuerzo en todo el elemento donde el momento flector será variable y la inercia disminuirá, esto ocurre para el caso de la viga y el prisma. En el cilindro el programa mantiene el esfuerzo cortante igual en todo el elemento reduciendo el momento polar de inercia y dejando constante el torque y la distancia desde el centro de gravedad hasta el punto donde se está calculado el esfuerzo cortante, es por ello que en la optimización se tiene como resultado geometrías tubulares.
- Se realizó las impresiones 3D con material ABS y PLA para las probetas de tracción y flexión y los elementos con el 100%, 50%, 30% y 20% de masa, donde se buscó el 100% de relleno para que se asemeje lo mejor posible a un sólido. Las impresiones fueron realizadas longitudinalmente con respecto a la cama de la impresión de la impresora Lulz bot TAZ 6.
- Se observó que en los lugares donde se realiza las impresiones 3D no disponen de las propiedades mecánicas con que salen las piezas impresas.

- Se obtuvo en los ensayos realizados de flexión, torsión y flexo torsión que los datos medidos de deflexión, ángulos de torsión y desplazamientos son consistentes con los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el programa CAD, tanto para el material ABS y PLA.
- Se obtuvo mediante las simulaciones realizadas que los esfuerzos solamente dependen de la fuerza que se le está aplicando y de las características geométricas que tenga el elemento mas no del material y el coeficiente de poisson. Mientras que los valores de deformación unitaria van a depender del módulo de elasticidad del material, entre menos sea la deformación unitaria mayor será la rigidez del elemento.
- Se observó con los diagramas de esfuerzo, esfuerzo cortante y deformación unitaria que se puede realizar elementos optimizados topológicamente desde el 45% de masa en adelante, ya que los resultados tienden a ser los mismos hasta el 100% de masa por lo tanto su inercia es la misma y su geometría también.
- Se obtuvo que la resistencia de los elementos va a ir disminuyendo según vaya disminuyendo el porcentaje de masa en la optimización topológica.

8.2. Recomendaciones

Se recomienda:

- Realizar la corrida de la optimización topológica en el programa Inspire 9.5 con diferentes valores de factor de seguridad y con diferentes restricciones de frecuencia con diferentes materiales.
- Aplicar la optimización topológica con la mayor rigidez y con diferentes porcentajes de masa en elementos construidos en acero, realizar sus respectivas simulaciones y en los ensayos medir los esfuerzos y las deformaciones unitarias con galgas extensiométricas.
- Realizar las impresiones 3D en un solo lote de elementos para obtener las mismas propiedades mecánicas en todas las piezas que se hayan impreso.

- Realizar investigaciones usando sólidos de diferentes formas y tamaños como por ejemplo la carcasa de una máquina, la hélice de una bomba hidráulica, el bloque de un motor, entre otros.
- Realizar un programa de elementos finitos para computador del análisis de optimización topológica.

BIBLIOGRAFÍA

- 3dimpresoras3d*. (2016). Obtenido de Qué es una impresora 3D?:
<http://www.3dimpresoras3d.com/que-es-una-impresora-3d/>
- Altair. (2013). Inspire 9.5.
- ASTM, D. 6. (2003). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Nueva York.
- Bendsoe, M. P., & Sigmund, O. (2004). *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. New York: Springer.
- Blog de HXX*. (02 de 03 de 2015). Obtenido de Materiales de impresión 3D:PLA (Ácido poliláctico): <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>
- Diosdado, R. (2014). *Zona Maker*. Obtenido de <https://www.zonamaker.com/impresion-3d/software-imp3d/manual-de-cura>
- Idaero*. (2014). Obtenido de SolidThinking INSPIRE y EVOLVE:
<http://www.idaero.es/solidthinking-inspire-evolve-optimizacion-topologica-diseno-organico-nurb/>.
- Make It From*. (05 de 08 de 2017). Obtenido de <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide/>
- Mariano. (8 de 06 de 2011). *Tecnología de los plásticos*. Obtenido de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>
- Meza, C. (2012). *Optimización Topológica en el diseño de elementos estructurales mecánicos*. Santiago de Cali.
- Meza, C. A., Tamayo, F., & Franco, E. E. (23 de 02 de 2015). Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido. Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- MG, E. (2017). *Impresiones 3D*.
- Nakagawa, T. (1999). Modern Manufacturing, Rapid Prototyping. En *Mechanical Engineering Handbook* (págs. 107-115). CRC Press LLC.
- QuimiNet*. (12 de 01 de 2006). Obtenido de Acrilonitrilo Butadieno Estireno(ABS): Descripción, propiedades y aplicación:
<http://www.quiminet.com/articulos/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-descripcion-propiedades-y-aplicaciones-4433.htm>
- Quintas, R. V. (1989). Sobre el teorema de Maxwell y la optimización de arcos de cubierta. 1-2.
- Rambal. (s.f.). *TAZ 6 3D Printer*.

Sanchez, S. (julio de 29 de 2015). *3Dnatives*. Obtenido de <http://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>

Tecnonauta. (2016). Obtenido de ¿Qué materiales usan? : <http://www.tecnonauta.com/notas/1881-impresoras-3d-materiales>