



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y LA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

**TEMA: “ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE
OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS SOBRE PROPIEDADES
MECÁNICAS EN IMPRESIÓN 3D MEDIANTE TECNOLOGÍAS *FUSED
DEPOSITION MODELING Y DIGITAL LIGHT PROCESSING*”**

AUTORES:

**GUERRA PAZMIÑO, ANDRÉS EDUARDO
SALTOS TORRES, PABLO SEBASTIÁN**

DIRECTOR:

SEGURA SANGUCHO, LUIS JAVIER

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación, **“ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS SOBRE PROPIEDADES MECÁNICAS EN IMPRESIÓN 3D MEDIANTE TECNOLOGÍAS *FUSED DEPOSITION MODELING* Y *DIGITAL LIGHT PROCESSING*”** realizado por los estudiantes **ANDRÉS EDUARDO GUERRA PAZMIÑO** y **PABLO SEBASTIÁN SALTOS TORRES**, 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 los señores **ANDRÉS EDUARDO GUERRA PAZMIÑO** y **PABLO SEBASTIÁN SALTOS TORRES** para que lo sustenten públicamente.



Ing. Luis Segura



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS SOBRE PROPIEDADES MECÁNICAS EN IMPRESIÓN 3D MEDIANTE TECNOLOGÍAS *FUSED DEPOSITION MODELING* Y *DIGITAL LIGHT PROCESSING***”, 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 declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.

Andrés Eduardo Guerra Pazmiño

Pablo Sebastián Saltos Torres



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **ANDRÉS EDUARDO GUERRA PAZMIÑO** y **PABLO SEBASTIÁN SALTOS TORRES**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” a publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS SOBRE PROPIEDADES MECÁNICAS EN IMPRESIÓN 3D MEDIANTE TECNOLOGÍAS *FUSED DEPOSITION MODELING* Y *DIGITAL LIGHT PROCESSING*”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, febrero del 2018

Andrés Eduardo Guerra Pazmiño

Pablo Sebastián Saltos Torres

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación va dedicado a mis padres Eduardo y Jacqueline, quienes son un pilar fundamental en mi vida, siempre estuvieron apoyándome y demostrándome el infinito amor que me tienen. A mis hermanas Andrea y Johanna, quienes me hicieron creer que todo lo que te propongas lo puedes alcanzar en la vida. A mi sobrino Nicolás quien con una sonrisa alegre cualquier instante. Y sobre todo les dedico a mis Viejitos: José, Ameriquita y Blanquita que desde el cielo me iluminaron y me bendijeron en mi vida.

Andrés Guerra Pazmiño

Quiero dedicar este proyecto de tesis a mis padres y abuelitos que han estado orgullosos de mi en todo momento y me han alentado a seguir creciendo humana y profesionalmente. A mis amigos, por esos momentos de risas, tristezas, enojos, decepciones y glorias que hemos atravesado y quienes mejor entienden lo que este logro significa. A Dios, por entregarme esa paz que me ha mantenido esforzado y valiente durante estos años de estudiante y ahora como un profesional más a su servicio.

Sebastián Saltos Torres.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por siempre cuidarme y guiarme en todo este camino, a mi familia por creer en mí y por darme las fuerzas necesarias en los momentos indicados, a mi novia por su incondicional apoyo y cariño. A mis amigos quienes a pesar de las adversidades presentadas en la Universidad y fuera de ella, siempre nos unimos y buscamos como seguir adelante. A mi director de tesis, Ingeniero Luis Segura, por guiarnos y apoyarnos en este proceso. A mi amigo y compañero de tesis, Sebas, quien durante toda la carrera demostró ser un verdadero amigo y más que eso un hermano.

Andrés Guerra Pazmiño

Agradezco a Dios por haberme dado el privilegio de estudiar, por proveer a mis padres los recursos para darme lo necesario para terminar mi carrera universitaria. A mi madre por brindarme siempre el apoyo sentimental y el amor que, a diario, con un desayuno me lo demostraba, a mi padre por siempre estar pendiente de cuanto iba aprendiendo, a mi hermana por ser fuente de inspiración para querer ser profesional y a mi enamorada por darme siempre el amor y el apoyo en esos momentos de frustración durante esos días de pruebas y proyectos. Agradezco también a esos maestros que, con ética, moral y vocación, supieron compartir sus enseñanzas y llegando a ser algunos buenos amigos, como el Ing. Luis Segura. Y finalmente agradezco a los amigos que esta universidad me permitió conocer, especialmente a mi mejor amigo y compañero de tesis, el Chorri, lo logramos guambra.

Sebastián Saltos Torres

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I	xix
1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación e importancia	2
1.4 Alcance del proyecto.....	5
1.5 Objetivos.....	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	6
1.6 Estructura del documento	7
CAPÍTULO II	8
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Estado del arte.....	8
2.1.1 Historia de la impresión 3D.....	14
2.2 Procedimiento para imprimir en 3D	15
2.3 Tecnologías de la impresión 3D.....	15
2.3.1 Tecnología FDM.....	16
2.3.1.1 Material ABS	17
2.3.1.2 Material PLA	18
2.3.2 Tecnología DLP.....	20
2.3.2.1 Cámara de Curado	21
2.4 Metodologías para el diseño de experimentos.	23
2.4.1 Metodología de superficie de respuesta	23

	viii
2.4.1.1 Modelos de RSM	23
2.4.1.2 Gráficas de RSM.....	23
2.4.1.3 Optimización de respuesta.....	25
2.4.2 Metodología de Taguchi	26
2.4.2.1 Arreglos Ortogonales	26
2.5 Dureza Shore D	28
2.6 Probetas y materiales	29
2.7 Equipo a utilizar	31
2.7.1 Impresoras 3D.....	31
2.7.1.1 MakerBot Replicator 2X	31
2.7.1.2 Impresora DLP genérica	31
2.7.2 Equipos para ensayos	32
2.7.2.1 Máquina de ensayos universales MTS.....	32
2.7.2.2 Durómetro portátil INSIZE Shore D	33
CAPÍTULO III	35
3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	35
3.1 Definición.....	35
3.2 Metodología.....	35
3.2.1 Parámetros de fabricación en impresoras 3D por medio de tecnología FDM.....	36
3.2.2 Parámetros relacionados con perímetros y capas	36
3.2.3 Parámetros para controlar el relleno:.....	37
3.3 Experimento para ensayos de flexión	37
3.3.1 Experimento con tecnología FDM.....	37
3.3.2 Experimento con tecnología DLP	39
3.4 Experimento para ensayos de dureza.....	40
3.3.1 Experimento con tecnología FDM.....	40
3.3.2 Experimento con tecnología DLP	41
3.5 Metodología Taguchi.....	42
3.5.1 Ensayos de flexión en PLA.....	42
3.5.1.1 Análisis de varianza	43
3.5.1.2 Resumen del modelo	43
3.5.1.3 Análisis del modelo	43
3.5.1.4 Análisis de interacción de factores para flexión. Material: PLA.....	45
3.5.2 Ensayos de flexión en ABS	46
3.5.2.1 Análisis de varianza	47

	ix
3.5.2.2 Resumen del modelo	48
3.5.2.3 Análisis del modelo	48
3.5.2.4 Análisis de interacción de factores para flexión. Material: ABS	49
3.5.3 Ensayos de flexión en resina.....	51
3.5.3.1 Análisis de varianza	51
3.5.3.2 Resumen del modelo	51
3.5.3.3 Análisis del modelo	51
3.5.3.4 Análisis de interacción de factores para flexión. Material: Resina	53
3.5.4 Ensayo de dureza en PLA.....	53
3.5.4.1 Análisis de varianza	54
3.5.4.2 Resumen del modelo	54
3.5.4.3 Análisis del modelo	55
3.5.4.4 Análisis de interacción de factores para dureza. Material: PLA	56
3.5.5 Ensayo de dureza en ABS.....	57
3.5.5.1 Análisis de Varianza	58
3.5.5.2 Resumen del modelo	58
3.5.5.3 Análisis del modelo	59
3.5.5.4 Análisis de interacción de factores para Dureza. Material: ABS	60
3.5.6 Ensayo de dureza en resina	61
3.5.6.1 Análisis de varianza	62
3.5.6.2 Resumen del modelo	62
3.5.6.3 Análisis del modelo	62
3.5.6.4 Análisis de interacción de factores para Dureza. Material: Resina	63
3.6 Metodología de Superficie de Respuesta.....	63
3.6.1 Ensayo de flexión en PLA.....	63
3.6.1.1 Análisis de varianza	64
3.6.1.2 Resumen del modelo	64
3.6.1.3 Análisis del modelo	64
3.6.1.4 Análisis de superficies y contornos	65
3.6.1.5 Predicción de optimización.....	71
3.6.2 Ensayo de flexión en ABS	71
3.6.2.1 Análisis de varianza	71
3.6.2.2 Resumen del modelo	72
3.6.2.3 Análisis del modelo	72
3.6.2.4 Análisis de superficies y contornos	73

	x
3.4.2.5 Predicción de optimización.....	79
3.6.3 Ensayo de flexión en resina.....	79
3.6.3.1 Análisis de varianza	79
3.6.3.2 Resumen del modelo	80
3.6.3.3 Análisis del modelo	80
3.6.3.4 Análisis de superficies y contornos	80
3.4.3.5 Predicción de optimización.....	81
3.6.4 Ensayo de dureza en PLA	82
3.6.4.1 Análisis de varianza	82
3.6.4.2 Resumen del modelo	82
3.6.4.3 Análisis del modelo	82
3.6.4.4 Análisis de superficies y contornos	83
3.6.2.5 Predicción de optimización.....	89
3.6.5 Ensayo de dureza en ABS.....	89
3.6.5.1 Análisis de varianza	89
3.6.5.2 Resumen del modelo	90
3.6.5.3 Análisis del modelo	90
3.6.5.4 Análisis de superficies y contornos	90
3.4.4.5 Predicción de optimización.....	96
3.6.6 Ensayo de dureza en resina	97
3.6.6.1 Análisis de varianza	97
3.6.6.2 Resumen del modelo	98
3.6.6.3 Análisis del modelo	98
3.6.6.4 Análisis de superficies y contornos	98
3.6.4.5 Predicción de optimización.....	99
CAPÍTULO IV.....	101
4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE CURADO.....	101
4.1 Definición de criterios de construcción de la cámara de curado	101
4.2 Elementos, partes y componentes.....	104
4.2.1 Cámara de curado.....	104
4.2.2 Puerta.....	104
4.2.3 Tapa.....	105
4.2.4 Base.....	105
4.2.5 Tapa de base	105
4.2.6 Pasador.....	106

	xi
4.2.7 Pulsadores	106
4.2.8 Pantalla LCD	107
4.2.9 Fuente de alimentación	107
4.2.10 Protoboard.....	108
4.2.11 Cinta adhesiva de aluminio.....	108
4.3 Procedimiento de ensamblado.....	109
4.4 Modo de uso	113
4.5 Lógica de programación.....	115
CAPÍTULO V.....	116
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	116
5.1 Relación flexión vs dureza	116
5.1.1 PLA	116
5.1.2 ABS.....	116
5.1.3 Resina.....	117
5.1.4 Análisis de flexión vs dureza	117
5.2 Relación flexión vs tiempo de impresión	118
5.2.1 PLA	118
5.2.2 ABS.....	118
5.2.3 Resina.....	119
5.2.4 Análisis de flexión vs tiempo de impresión	119
5.3 Relación fuerza vs deflexión	120
5.3.1 PLA	120
5.3.2 ABS.....	121
5.3.3 Resina.....	122
5.4 Cálculo de esfuerzos	123
5.4.1 Esfuerzo flector	123
5.4.2 Esfuerzo de tracción.....	124
5.4.2.1 PLA.....	124
5.4.2.1 ABS	124
5.4.2.1 Resina	124
5.4.3 Configuraciones optimizadas.....	125
5.5 Tratamiento de post curado con cámara de curado.....	126
CAPÍTULO VI.....	129
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	129
6.1 Conclusiones	129

6.2 Recomendaciones	xii
BIBLIOGRAFÍA	130
	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Impresora 3D MakerBot Replicator 2X.....	2
Figura 2 Curvas de tensión vs deformación con diferentes espesores de capa.....	3
Figura 3 Curva de resistencia a la tracción vs deformación unitaria para 100% de relleno...	4
Figura 4 Curva de resistencia a la tracción vs porcentaje de relleno.....	4
Figura 5 Orientaciones de impresión en la cama de la impresora.....	9
Figura 6 Esfuerzos cortantes para ABS y PC a diferentes orientaciones de impresión.....	11
Figura 7 Esfuerzo de tracción vs espesor de capa para diferentes tiempos de exposición. .	13
Figura 8 Esfuerzo flexor vs espesor de capa para diferentes tiempos de exposición.....	13
Figura 9 Propiedades físicas y mecánicas del ABS.....	18
Figura 10 Impresión tridimensional mediante DLP de un elemento.....	20
Figura 11 Ficha técnica de resinas estándar Formlabs.....	21
Figura 12 Espectro de luz y rangos de longitud de onda.....	22
Figura 13 Ejemplo de un gráfico de superficie de respuesta.....	24
Figura 14 Ejemplo de gráfica de contorno.....	24
Figura 15 Ejemplo de gráfica de optimización de RSM.....	25
Figura 16 Arreglo ortogonal L27(3)13.....	27
Figura 17 Dimensiones de probeta de tracción para tecnología FDM.....	29
Figura 18 Dimensiones de probeta de tracción para tecnología DLP.....	30
Figura 19 Dimensiones de probeta de flexión para tecnología FDM.....	30
Figura 20 Dimensiones de probeta de flexión para tecnología DLP.....	30
Figura 21 Impresora MakerBot Replicator 2X utilizada.....	31
Figura 22 Impresora DLP utilizada.....	32
Figura 23 Máquina de ensayos universales MTS T-5002.....	33
Figura 24 Durómetro Shore D utilizado.....	34
Figura 25 Indentador del durómetro.....	34
Figura 26 Diferencia de acabado a diferentes alturas de capa.....	36
Figura 27 Impresión a diferentes porcentajes de relleno.....	37
Figura 28 Gráfica de efectos principales para flexión en PLA.....	44
Figura 29 Gráfica de interacción de factores para fuerza en PLA.....	45
Figura 30 Gráfica de efectos principales para dureza en ABS.....	48
Figura 31 Gráfica de interacción de factores para fuerza en ABS.....	49
Figura 32 Gráfica de efectos principales para flexión en resina.....	52
Figura 33 Gráfica de interacción de factores para fuerza en resina.....	53
Figura 34 Gráfica de efectos principales para dureza en resina.....	55
Figura 35 Gráfica de interacción de factores para dureza en PLA.....	56
Figura 36 Gráfica de efectos principales para dureza en ABS.....	59
Figura 37 Gráfica de interacción de factores para dureza en ABS.....	60
Figura 38 Gráfica de efectos principales para dureza en resina.....	62
Figura 39 Gráfica de interacción de factores para dureza en resina.....	63
Figura 40 Gráfica de superficie. Primera capa vs alto de capa en PLA.....	65
Figura 41 Gráfica de contorno. Primera capa vs alto de capa en PLA.....	65
Figura 42 Gráfica de superficie. Perímetros vs alto de capa en PLA.....	66
Figura 43 Gráfica de contorno. Perímetros vs alto de capa en PLA.....	66
Figura 44 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs alto de capa en PLA.....	67
Figura 45 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs alto de capa en PLA.....	67

Figura 46 Gráfica de superficie. Perímetros vs primera capa en PLA.....	68
Figura 47 Gráfica de contorno. Perímetros vs primera capa en PLA.....	68
Figura 48 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs primera capa en PLA.....	69
Figura 49 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs primera capa en PLA.....	69
Figura 50 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs perímetros en PLA.....	70
Figura 51 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs perímetros en PLA.....	70
Figura 52 Gráfica de optimización de flexión en PLA con RSM.....	71
Figura 53 Gráfica de superficie. Primera capa vs alto de capa en ABS.....	73
Figura 54 Gráfica de contorno. Primera capa vs alto de capa en ABS.....	73
Figura 55 Gráfica de superficie. Perímetros vs alto de capa en ABS.....	74
Figura 56 Gráfica de contorno. Perímetros vs alto de capa en ABS.....	74
Figura 57 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs alto de capa en ABS.....	75
Figura 58 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs alto de capa en ABS.....	75
Figura 59 Gráfica de superficie. Perímetros vs primera capa en ABS.....	76
Figura 60 Gráfica de contorno. Perímetros vs primera capa en ABS.....	76
Figura 61 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs primera capa en ABS.....	77
Figura 62 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs primera capa en ABS.....	77
Figura 63 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs perímetros en ABS.....	78
Figura 64 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs perímetros en ABS.....	78
Figura 65 Gráfica de optimización de flexión en ABS con RSM.....	79
Figura 66 Gráfica de superficie. Tiempo curado vs tiempo post curado en resina.....	80
Figura 67 Gráfica de contorno. Tiempo curado vs tiempo post curado en resina.....	81
Figura 68 Gráfica de optimización de flexión en resina con RSM.....	81
Figura 69 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs perímetros en PLA.....	83
Figura 70 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs perímetros en PLA.....	83
Figura 71 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs primera capa en PLA.....	84
Figura 72 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs primera capa en PLA.....	84
Figura 73 Gráfica de superficie. Perímetros vs primera capa en PLA.....	85
Figura 74 Gráfica de contorno. Perímetros vs primera capa en PLA.....	85
Figura 75 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs alto de capa en PLA.....	86
Figura 76 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs alto de capa en PLA.....	86
Figura 77 Gráfica de superficie. Perímetros vs alto de capa en PLA.....	87
Figura 78 Gráfica de contorno. Perímetros vs alto de capa en PLA.....	87
Figura 79 Gráfica de superficie. Primera capa vs alto de capa en PLA.....	88
Figura 80 Gráfica de contorno. Primera de capa vs alto de capa en PLA.....	88
Figura 81 Gráfica de optimización de dureza en PLA con RSM.....	89
Figura 82 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs perímetros en ABS.....	90
Figura 83 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs perímetros en ABS.....	91
Figura 84 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs primera capa en ABS.....	91
Figura 85 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs primera capa en ABS.....	92
Figura 86 Gráfica de superficie. Perímetros vs primera capa en ABS.....	92
Figura 87 Gráfica de contorno. Perímetros vs primera capa en ABS.....	93
Figura 88 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs alto de capa en ABS.....	93
Figura 89 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs alto de capa en ABS.....	94
Figura 90 Gráfica de superficie. Perímetros vs alto de capa en ABS.....	94
Figura 91 Gráfica de contorno. Perímetros vs alto de capa en ABS.....	95
Figura 92 Gráfica de superficie. Primera capa vs alto de capa en ABS.....	95

Figura 93 Gráfica de contorno. Primera capa vs alto de capa en ABS.....	96
Figura 94 Gráfica de optimización de dureza en ABS con RSM	96
Figura 95 Gráfica de superficie. Tiempo post curado vs tiempo curado en resina	98
Figura 96 Gráfica de contorno. Tiempo post curado vs tiempo curado en resina.....	99
Figura 97 Gráfica de optimización de dureza en resina con RSM.....	99
Figura 98 Modelado tridimensional de la cámara de curado	103
Figura 99 Cámara de curado	104
Figura 100 Puerta de la cámara de curado.....	104
Figura 101 Tapa de la cámara de curado	105
Figura 102 Base de la cámara de curado	105
Figura 103 Tapa de la base	105
Figura 104 Pasador	106
Figura 105 Pulsador de 4 pines	106
Figura 106 Pantalla LCD de 16 caracteres y 4 líneas	107
Figura 107 Fuente de 12V DC	107
Figura 108 Protoboard de 400 puntos	108
Figura 109 Cinta adhesiva de aluminio.....	108
Figura 110 Fotografía durante la conexión de los elementos.....	109
Figura 111 Protección de papel para el pegamento en la cinta.....	110
Figura 112 Arreglo de cintas LED dentro de la cámara de curado.....	110
Figura 113 Cinta de LEDs adheridas en la cámara de curado. Puerta ensamblada.	111
Figura 114 Cámara de curado armada totalmente.....	112
Figura 115 Vista explotada de las partes de la cámara de curado.....	112
Figura 116 Diagrama eléctrico para la conexión del controlador de la cámara de curado..	113
Figura 117 Botones de la cámara de curado	114
Figura 118 Lógica de programación de la cámara de curado	115
Figura 119 Fuerza vs deflexión de las 3 mejores probetas de PLA para fuerza de flexión.	120
Figura 120 Fuerza vs deflexión de las 3 mejores probetas de ABS para fuerza de flexión	122
Figura 121 Fuerza vs deflexión de las 3 mejores probetas de resina en flexión.	123
Figura 122 Fuerza de flexión vs tiempo de post curado con luz UV	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Resultados de ensayos de tracción para diferentes espesores de capa.....</i>	8
Tabla 2	<i>Propiedades de la tensión para las probetas testeadas con diferente orientación. .</i>	10
Tabla 3	<i>Esfuerzos de tracción para diferentes espesores y tiempo de curado.</i>	12
Tabla 4	<i>Esfuerzos de flexión para diferentes espesores de capa y tiempos de exposición. .</i>	12
Tabla 5	<i>Métodos de impresión 3d y sus características.</i>	16
Tabla 6	<i>Propiedades físicas y mecánicas del PLA.....</i>	19
Tabla 7	<i>Comparativa de propiedades físicas y características entre ABS y PLA.....</i>	19
Tabla 8	<i>Materiales comunes respecto a su dureza en escala Shore D.....</i>	29
Tabla 9	<i>Parámetros definidos para la experimentación.....</i>	35
Tabla 10	<i>Valor de cada nivel según el factor para tecnología FDM.....</i>	38
Tabla 11	<i>Formulario de flexión para FDM. Arreglo ortogonal L27(3)5.....</i>	38
Tabla 12	<i>Valor de cada nivel según el factor para tecnología DLP.....</i>	39
Tabla 13	<i>Formulario de flexión para DLP. Arreglo ortogonal L9(3)2.....</i>	40
Tabla 14	<i>Formulario de dureza para FDM. Arreglo ortogonal L27(3)5.</i>	40
Tabla 15	<i>Formulario de dureza para DLP. Arreglo ortogonal L9(3)2.....</i>	41
Tabla 16	<i>Registro de fuerza máxima en ensayo de flexión. Material: PLA.....</i>	42
Tabla 17	<i>Configuración para fuerza máxima a flexión en PLA con metodología Taguchi... </i>	44
Tabla 18	<i>Registro de fuerza máxima en ensayo de flexión. Material: ABS.....</i>	46
Tabla 19	<i>Configuración para fuerza máxima a flexión en ABS con metodología Taguchi ...</i>	49
Tabla 20	<i>Registro de fuerza máxima de flexión. Material: Resina.....</i>	51
Tabla 21	<i>Configuración para fuerza máxima a flexión en resina con metodología Taguchi.</i>	52
Tabla 22	<i>Registro de dureza máxima en ensayo Shore D. Material: PLA.....</i>	53
Tabla 23	<i>Configuración para máxima dureza en PLA con metodología Taguchi.....</i>	55
Tabla 24	<i>Registro de dureza máxima en ensayo Shore D. Material: ABS.....</i>	57
Tabla 25	<i>Configuración para máxima dureza en ABS con metodología Taguchi.....</i>	59
Tabla 26	<i>Registro de dureza máxima en ensayo Shore D. Material: Resina.....</i>	61
Tabla 27	<i>Configuración para máxima dureza en resina con metodología Taguchi.....</i>	63
Tabla 28	<i>Configuración para fuerza máxima en PLA.....</i>	71
Tabla 29	<i>Configuración para fuerza máxima en ABS con RSM.....</i>	79
Tabla 30	<i>Configuración para fuerza máxima en resina con RSM.....</i>	82
Tabla 31	<i>Configuración para dureza máxima en PLA con RSM.....</i>	89
Tabla 32	<i>Configuración para dureza máxima en ABS con RSM.....</i>	97
Tabla 33	<i>Configuración para dureza máxima en resina con RSM.....</i>	100
Tabla 34	<i>Matriz de selección de forma de la cámara de curado.....</i>	101
Tabla 35	<i>Matriz de selección del método de construcción de la cámara de curado.....</i>	101
Tabla 36	<i>Matriz de selección de material de construcción para la cámara de curado.....</i>	101
Tabla 37	<i>Matriz de selección de la fuente de luz LED UV.....</i>	102
Tabla 38	<i>Matriz de selección del controlador.....</i>	102
Tabla 39	<i>Parámetros de diseño de la cámara de curado.....</i>	102
Tabla 40	<i>Dimensiones globales de la cámara de curado.....</i>	103
Tabla 41	<i>Flexión de menor a mayor en PLA.....</i>	116
Tabla 42	<i>Dureza de menor a mayor en PLA.....</i>	116
Tabla 43	<i>Flexión de menor a mayor en ABS.....</i>	116
Tabla 44	<i>Dureza de menor a mayor en ABS.....</i>	117
Tabla 45	<i>Flexión de menor a mayor en resina.....</i>	117

	xvii
Tabla 46 <i>Dureza de menor a mayor en resina</i>	117
Tabla 47 <i>Flexión de menor a mayor en PLA</i>	118
Tabla 48 <i>Tiempo de impresión de menor a mayor en PLA</i>	118
Tabla 49 <i>Flexión de menor a mayor en ABS</i>	118
Tabla 50 <i>Tiempo de impresión de menor a mayor en ABS</i>	119
Tabla 51 <i>Flexión de menor a mayor en resina</i>	119
Tabla 52 <i>Tiempo de menor a mayor en resina</i>	119
Tabla 53 <i>Flexión de menor a mayor en PLA</i>	120
Tabla 54 <i>Deflexión de menor a mayor en PLA</i>	120
Tabla 55 <i>Flexión de menor a mayor en ABS</i>	121
Tabla 56 <i>Deflexión de menor a mayor en ABS</i>	121
Tabla 57 <i>Flexión de menor a mayor en resina</i>	122
Tabla 58 <i>Deflexión de menor a mayor en resina</i>	122
Tabla 59 <i>Resistencia a la tracción de las mejores configuraciones</i>	125
Tabla 60 <i>Resistencia a la flexión de las mejores configuraciones</i>	125
Tabla 61 <i>Mejora de resistencia a flexión</i>	126
Tabla 62 <i>Tabla de resistencia a la flexión de Resina con tratamiento de luz UV</i>	127
Tabla 63 <i>Mejora de resistencia a flexión en resina post curada</i>	128

RESUMEN

Este trabajo se desarrolló con la finalidad de analizar la influencia de los parámetros de impresión 3D en las propiedades mecánicas de probetas impresas mediante tecnologías *Fused Deposition Modeling* (FDM) y *Digital Light Printing* (DLP). Los materiales que se utilizaron fueron Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y Ácido Poliláctico (PLA) para la tecnología FDM, y resina para la tecnología DLP. Las probetas se diseñaron a partir de los lineamientos correspondientes a las normas ASTM D638 – 03 y ASTM D790 – 03. Se consideraron los factores: alto de primera capa, alto de capa, número de perímetros, densidad de relleno y patrón de relleno, para FDM, mientras que para DLP fueron: tiempo de curado y tiempo de post curado. Una vez establecidos los factores para cada tecnología se estableció el número de probetas de muestra mediante un arreglo ortogonal Taguchi L27(3)5 para FDM y L9(3)2 para DLP. Para el análisis de optimización con los resultados de los ensayos, tanto en flexión como en dureza, se utilizaron las metodologías de Taguchi y superficie de respuesta, en donde se observó las interacciones entre los factores, los factores más significativos, gráficas de superficies, gráfica de contornos, predicción de optimización y finalmente el ajuste de cada modelo con los datos obtenidos. Además, se diseñó y construyó una cámara de curado para comprobar un incremento en las propiedades mecánicas de las probetas de resina. Las probetas optimizadas se imprimieron y se les sometió a los ensayos de flexión, dureza y tracción y se compararon con las mejores configuraciones de cada arreglo en los experimentos, obteniendo los valores porcentuales de mejora en cada caso.

PALABRAS CLAVES:

- **OPTIMIZACIÓN**
- **METODOLOGÍA TAGUCHI**
- **METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA**
- **CÁMARA DE CURADO**
- **PARÁMETROS DE IMPRESIÓN 3D**

ABSTRACT

This work was developed with the purpose of analyzing the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of printed specimens using Fused Deposition Modeling (FDM) and Digital Light Printing (DLP) technologies. The materials that were used were Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and Polylactic Acid (PLA) for FDM technology, and resin for DLP technology. The specimens were designed based on the guidelines corresponding to ASTM D638 - 03 and ASTM D790 - 03 standards. The following factors were considered: top & bottom layers height, layer height, number of perimeters, infill density and infill pattern, for FDM, while for DLP were: curing time and post curing time. Once the factors for each technology were established, the size of sample specimens was established by a Taguchi's orthogonal array L27(3)5 for FDM and L9(3)2 for DLP. For the optimization analysis with the results of the tests, flexion and hardness, the Taguchi method and response surface methodology were used, where the interactions between the factors, the most significant factors, surface graphs, contours graphs, prediction of optimization and finally the adjustment of each model with the obtained data, were observed. In addition, a curing chamber was designed and constructed to verify an increase in the mechanical properties of resin specimens. The optimized specimens were printed and subjected to the bending, hardness and traction tests, and compared with the best configurations of each array in the experiments, obtaining the percentage values of improvement in each case.

KEYWORDS

- **OPTIMIZATION**
- **TAGUCHI METHODOLOGY**
- **RESPONSE SURFACE METHODOLOGY**
- **CURING CHAMBER**
- **3D PRINTING PARAMETERS**

CAPÍTULO I

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1 Introducción

En la actualidad, la impresión 3D ha empezado a tomar un rol importante en la sociedad, puesto que con esta tecnología se puede llegar a fabricar componentes que antes era imposible o muy complicado de realizar. Uno de los aspectos más relevantes de las impresoras 3D es que estas son auto-replicas, además tanto el software como el hardware se encuentran libres en internet; cualquier persona que disponga de los materiales y de tiempo suficiente puede ensamblar un equipo.

La impresión 3D es, actualmente, la tecnología más importante y utilizada en el campo de la fabricación aditiva, conocida también como manufactura aditiva, en la cual se crea un objeto tridimensional por medio de superposición sucesiva de capas de un material, generalmente un polímero; es por esta razón que los campos en los que se usan elementos impresos en 3D son mayores, va desde juguetes, carcasas de celulares, engranes, etc.; hasta lámparas y casas.

En todo el mundo existen distintas marcas de impresoras 3D, teniendo cada una diferentes tamaños y especificaciones dependiendo el uso que se le vaya a dar. Para el presente proyecto se utilizará la máquina Makerbot Replicator 2x para imprimir las probetas con ABS y PLA para su posterior análisis de propiedades mecánicas.

El presente proyecto propone establecer una metodología de optimización de las propiedades mecánicas de elementos realizados en la impresora Makerbot Replicator 2x (figuras 1 y 21), además del diseño y construcción de una cámara de curado para elementos impresos mediante Procesamiento Digital de luz (Digital Light Processing), con el fin de analizar la influencia del post curado en las propiedades mecánicas de los elementos impresos.

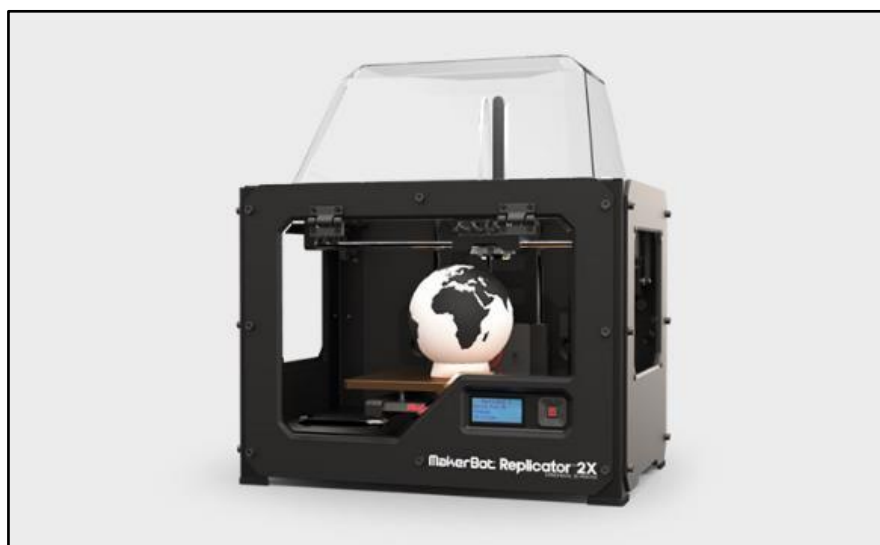


Figura 1 Impresora 3D MakerBot Replicator 2X

Fuente: (Makerbot, 2017)

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE no tiene ninguna investigación relacionada a las propiedades mecánicas de elementos fabricados mediante impresión 3D por tecnologías Modelado por Deposición Fundida y Procesamiento Digital de Luz, traducido del inglés, *Fused Deposition Modeling* (FDM) y *Digital Light Printing* (DLP) respectivamente.

Tener una base de conocimiento sobre las propiedades mecánicas, previo a un proceso de manufactura, que en este caso es la impresión 3D, es de gran importancia a nivel ingenieril para conocer e incluso poder predecir las características y desempeño que se pueden tener al finalizar la fabricación de un elemento, lo cual es clave para poder profundizar esta tecnología en el campo del diseño mecánico y los procesos de manufactura, incluso pensando alcanzar su aplicación a nivel industrial.

1.3 Justificación e importancia

Hasta el momento no se ha realizado un análisis muy profundo a los parámetros que brindan las diferentes configuraciones en impresoras 3D, disponibles en el mercado o construidas personalmente, y su influencia con las propiedades mecánicas de los elementos impresos.

Actualmente la Organización Internacional de Estandarización (ISO) y la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM) se encuentran en proceso de elaboración de la normativa específica para la impresión 3D. En Julio del 2016 en la ciudad de Tokio se reunieron la F42 (Comité de Manufactura Aditiva de ASTM) e ISO/TC 261 (Grupo de Trabajo de Manufactura Aditiva de ISO), donde se elaboró la estructura para el desarrollo de estándares para manufactura aditiva, la misma que fue aprobada por ambas partes. (ASTM, 2016)

La implementación, en proceso, de una norma para la impresión 3D es una gran prueba del interés que se tiene en esta técnica de manufactura a nivel global. Industrias como la aeroespacial han visto en la impresión 3D una manera de reducir consumos de combustible y energía, al poder reducir el peso en componentes y tiempo en su creación; crear herramientas personalizadas en termoplásticos resistentes y duraderos que pueden ser fabricados internamente es una facilidad que no se tiene con manufactura sustractiva, además que se reducen restricciones de diseño y se facilita la creación de elementos con geometría de mayor complejidad.

El autor Dielyson Martins Galina, en su investigación obtiene curvas características de esfuerzo vs deformación para diferentes espesores de capa, además se obtienen resultados sobre la tensión, la dureza y el alargamiento de fibras respecto al espesor de capas. (Martins, Pereira , & Gonçalves , 2016)

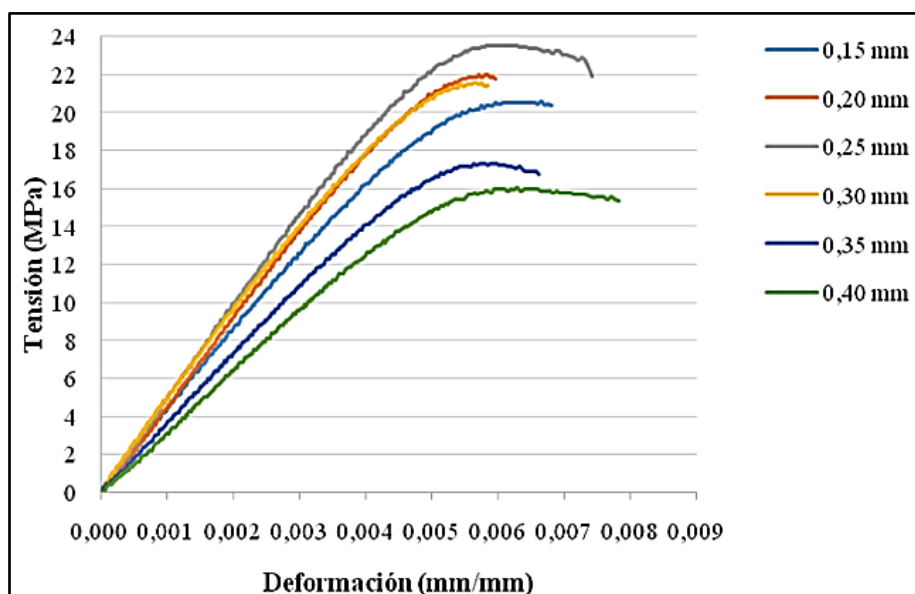


Figura 2 Curvas de tensión vs deformación con diferentes espesores de capa.

Fuente: (Martins, Pereira , & Gonçalves , 2016)

Otros autores que han investigado sobre este tema relacionan el porcentaje de relleno y se analizó la resistencia mecánica utilizando la tecnología FDM, con lo que se construye una curva de resistencia a la tracción vs la deformación unitaria y otra curva de resistencia a la tracción vs el porcentaje de relleno. las cual se muestran a continuación. (Álvarez, Lagos, & Aizpun, 2017)



Figura 3 Curva de resistencia a la tracción vs deformación unitaria para 100% de relleno.

Fuente: (Álvarez, Lagos, & Aizpun, 2017)



Figura 4 Curva de resistencia a la tracción vs porcentaje de relleno.

Fuente: (Álvarez, Lagos, & Aizpun, 2017)

Las distintas variables y parámetros que utilizan las impresoras 3D de materiales pueden ser determinantes para la resistencia de los productos. La tecnología FDM y DLP en la impresión 3D se maneja por una configuración previa del usuario y que resulta clave en el comportamiento mecánico del elemento impreso, en nuestra investigación deseamos relacionar y analizar cuáles son los parámetros más influyentes en las propiedades mecánicas y continuar con los estudios realizados por los autores Martins y Álvarez, buscando la configuración más ideal para la obtención de las mejores propiedades mecánicas.

La importancia de este tema se debe a que hasta el momento no hay suficiente información acerca de las propiedades mecánicas de los objetos impresos en 3D, por ende, los resultados que se obtengan podrían servir para futuras investigaciones.

Para la verificación de resultados: el estudio se realizará imprimiendo probetas con diferentes configuraciones, y en los diferentes tipos de impresoras, y se les someterá a ensayos mecánicos para su posterior análisis. Otros parámetros por considerar y analizar serán el tiempo y el costo de la fabricación de las piezas, para ver la conveniencia de estos parámetros utilizaremos las metodologías Taguchi Methods y Response Surface Methodology.

Las distintas variables y parámetros que utilizan las impresoras 3D de materiales pueden ser determinantes para la resistencia de los productos. La tecnología FMD y DLP en la impresión 3D se maneja por una configuración previa del usuario y que resulta clave en el comportamiento mecánico del elemento impreso.

La importancia de este tema se debe a que hasta el momento no hay suficiente información acerca de las propiedades mecánicas de los objetos impresos en 3D, por ende, los resultados que se obtengan podrían servir para futuras investigaciones.

Para la verificación de resultados: el estudio se realizará imprimiendo probetas con diferentes configuraciones, y en los diferentes tipos de impresoras, y se les someterá a ensayos mecánicos para su posterior análisis. Otros parámetros que considerar y analizar serán el tiempo y el costo de la fabricación de las piezas.

1.4 Alcance del proyecto

El proyecto de titulación se plantea como una investigación de las propiedades mecánicas que se pueden obtener con la variación de parámetros en las impresoras

3D que utilizan tecnología FDM y DLP; con esto se quiere lograr desarrollar una metodología de predicción sobre las propiedades mecánicas.

La cantidad de la muestra, que será sometida a ensayos mecánicos experimentales, se definirá mediante el diseño de experimentos por metodología Taguchi y Superficie de Respuesta, en inglés Response Surface Methodology (RSM). Para la impresión de todas las probetas necesarias, se utilizará la impresora MakerBot Replicator 2X (figuras 1 y 22) y una impresora genérica de tecnología DLP.

Los ensayos mecánicos se realizarán mediante normas ASTM y equipos disponibles en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, definidas en el apartado 2.7.

Además, se diseñará y construirá una cámara de curado con la finalidad de analizar la influencia de un tratamiento posterior con luz UV en las propiedades mecánicas de las impresiones con tecnología DLP.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar y desarrollar una metodología de optimización de parámetros sobre propiedades mecánicas en impresión 3D mediante tecnologías *Fused Deposition Modeling* y *Digital Light Processing*.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar las propiedades mecánicas de las probetas elaboradas mediante impresión 3D con los materiales ABS, PLA y resina líquida, mediante ensayos mecánicos según normas ASTM.
- Identificar los parámetros más influyentes en las propiedades mecánicas y recopilar la información de los resultados para las diferentes configuraciones de parámetros.
- Diseñar y construir una cámara de curado para las impresiones con tecnología DLP.

1.6 Estructura del documento

El presente documento estará conformado por 6 capítulos, el primer capítulo trata de la descripción general del proyecto: planteamiento del problema, justificación e importancia, alcance del proyecto y sus objetivos.

0,15	20,81	±1,06	19,69	±1,12	2,18	±0,13	1.321,86	±38,41
0,20	20,96	±1,46	20,03	±1,25	1,79	±0,12	1.448,90	±139,02
0,25	24,12	±1,02	23,00	±0,59	2,08	±0,32	1.583,67	±61,77
0,30	21,31	±0,82	19,00	±1,15	2,37	±0,57	1.539,64	±53,70
0,35	17,67	±0,76	16,66	±0,38	2,03	±0,34	1.259,08	±89,42
0,40	16,13	±0,85	14,28	±0,80	2,08	±0,38	1.175,33	±137,07

DESVPA: Desvío patrón

Fuente: (Martins, Pereira , & Gonçalves , 2016)

Otro parámetro relacionado con las propiedades mecánicas, que se encontró en otra investigación (Cantrell, Rohde, & Damiani, 2017), es la orientación de la probeta al ser impresa (ver figura 5) y cuyos resultados se enlistan en la tabla 2.

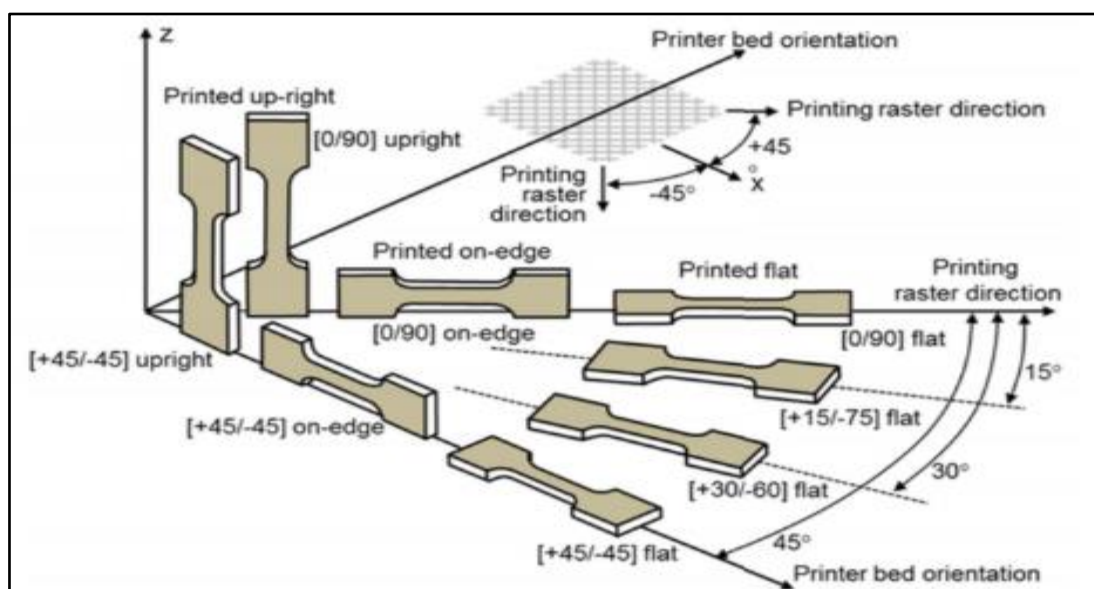


Figura 5 Orientaciones de impresión en la cama de la impresora.

Fuente: (Cantrell, Rohde, & Damiani, 2017)

Tabla 2

Propiedades de la tensión para las probetas testeadas con diferente orientación.

Property	Orientation					
	[+45/-45] flat	[0/90] flat	[+45/-45] on-edge	[0/90] on-edge	[+45/-45] up-right	[0/90] up-right
Poisson's Ratio	0.36 ± 0.03	0.37 ± 0.04	0.38 ± 0.03	0.36 ± 0.02	0.36 ± 0.03	0.36 ± 0.03
Young's Modulus (MPa)	1960 ± 60	2020 ± 60	2020 ± 110	1910 ± 60	2040 ± 90	2050 ± 110
Yield Strength (MPa)	30.3 ± 0.6	32.0 ± 0.8	30.0 ± 1.1	29.0 ± 0.6	29.3 ± 0.8	29.9 ± 1.6
Ultimate Strength (MPa)	32.8 ± 0.6	33.5 ± 0.5	31.9 ± 0.9	30.7 ± 0.7	30.0 ± 0.8	30.9 ± 1.3
Strain at Failure (%)	8.89 ± 2.34	7.14 ± 2.79	5.41 ± 1.13	5.82 ± 1.26	1.72 ± 0.16	1.84 ± 0.15
Breaking Strength (MPa)	29.6 ± 0.5	30.7 ± 0.5	30.1 ± 0.9	29.4 ± 0.7	29.9 ± 0.8	30.8 ± 1.3
Strain Energy Density (MJ/m ³)	3.17 ± 1.04	2.14 ± 1.03	1.46 ± 0.37	1.66 ± 0.41	0.29 ± 0.04	0.32 ± 0.03

Fuente: (Cantrell, Rohde, & Damiani, 2017)

Analizando la información de la tabla, extraída de esta investigación, se puede concluir que la orientación y posición al imprimir afectó en varias propiedades mecánicas de las probetas.

Se puede ver que los valores de tensión de rotura (Strain at Failure) son directamente proporcionales a la densidad de energía de deformación (Strain Energy Density). Esto quiere decir que el esfuerzo realizado por las máquinas de ensayos utilizadas gastó menos energía con las diferentes orientaciones y por ende un menor esfuerzo. El módulo de Young (Young's Modulus) varía entre 1910 y 2050 MPa, esto quiere decir que hubo un comportamiento anisotrópico.

Del mismo modo se realizó el análisis del comportamiento de las probetas sometidas a esfuerzo cortante, así mismo con diferentes orientaciones de impresión, mostrando los resultados en las siguientes curvas:

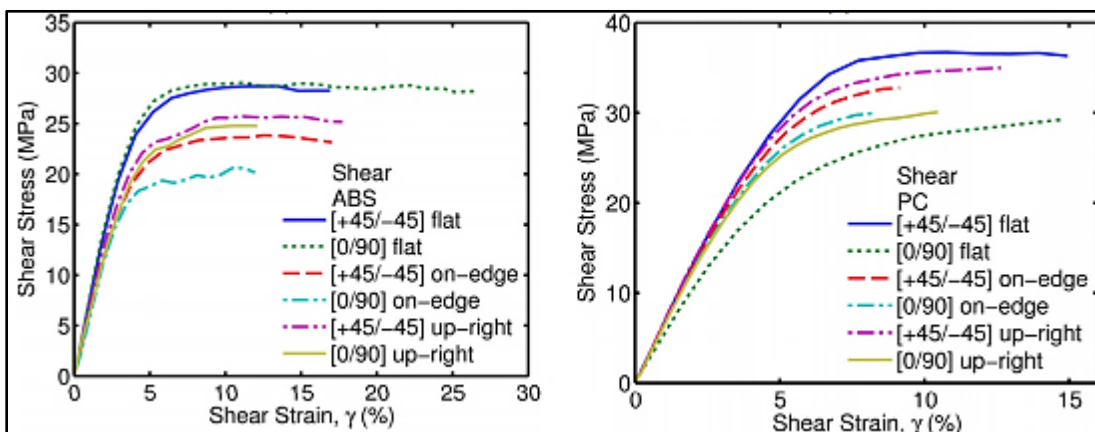


Figura 6 Esfuerzos cortantes para ABS y PC a diferentes orientaciones de impresión.

Fuente: (AFIZAH, N , & IBRAHIM, 2017)

Acerca de la tecnología DLP también existen estudios experimentales sobre las propiedades mecánicas en relación con los parámetros de configuración en búsqueda de una optimización. Los autores de este estudio utilizaron la impresora B9 Creators cuya tecnología es DLP y la resina utilizada fue la B9R-1-Red específicamente diseñada para este modelo de impresora, además esta resina se usa para la fabricación de moldes de silicona del tipo RTV (Room Temperature Vulcanizing), la cual se solidifica a temperatura ambiente. (AFIZAH, N , & IBRAHIM, 2017)

Los parámetros en estudio fueron solo dos, el espesor de capa y el tiempo de exposición a la luz del proyector.

Los espesores de capa que se configuraron son de 50, 70, 100 y 150 μm mientras que los tiempos de exposición fueron de 3, 6, 9 y 12 s.

En cuanto a los ensayos, se hicieron dos del tipo destructivo, un ensayo de tracción y uno de flexión. Los resultados de esta investigación se resumen en las tablas 3 y 4.

Tabla 3

Esfuerzos de tracción para diferentes espesores y tiempo de curado.

Exposure Time (sec)	Layer Thickness			
	50 μm	70 μm	100 μm	150 μm
	Tensile Strength (N/mm^2)			
3	8.51	8.01	6.44	5.55
6	8.63	8.26	6.76	5.88
9	8.98	8.43	7.01	5.96
12	7.68	7.52	5.99	4.75

Fuente: (AFIZAH, N , & IBRAHIM, 2017)

Tabla 4

Esfuerzos de flexión para diferentes espesores de capa y tiempos de exposición.

Exposure Time (sec)	Layer Thickness			
	50 μm	70 μm	100 μm	150 μm
	Flexural Strength (N/mm^2)			
3	16.10	10.87	5.72	5.21
6	16.47	10.92	5.99	5.30
9	18.39	11.03	6.46	5.61
12	15.42	7.26	4.80	4.57

Fuente: (AFIZAH, N , & IBRAHIM, 2017)

Para poder analizar más fácilmente se elaboraron, en esta investigación, gráficas con los datos obtenidos para cada tipo de ensayo (ver figuras 7 y 8).

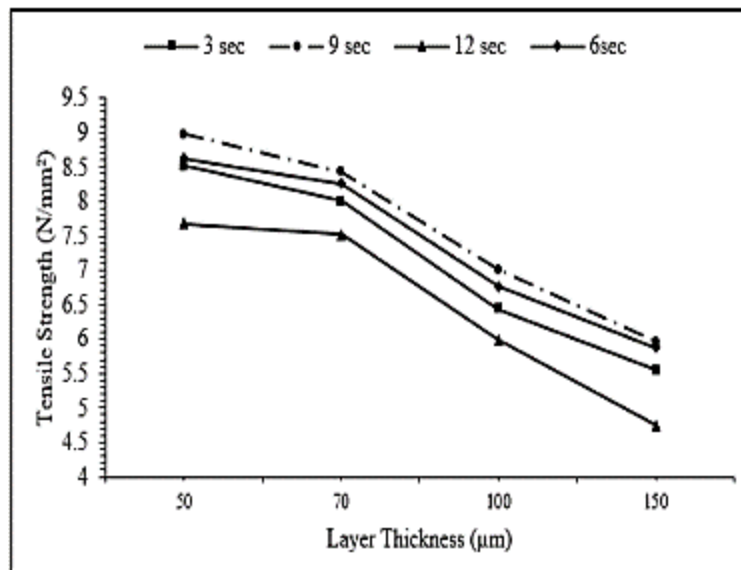


Figura 7 Esfuerzo de tracción vs espesor de capa para diferentes tiempos de exposición.

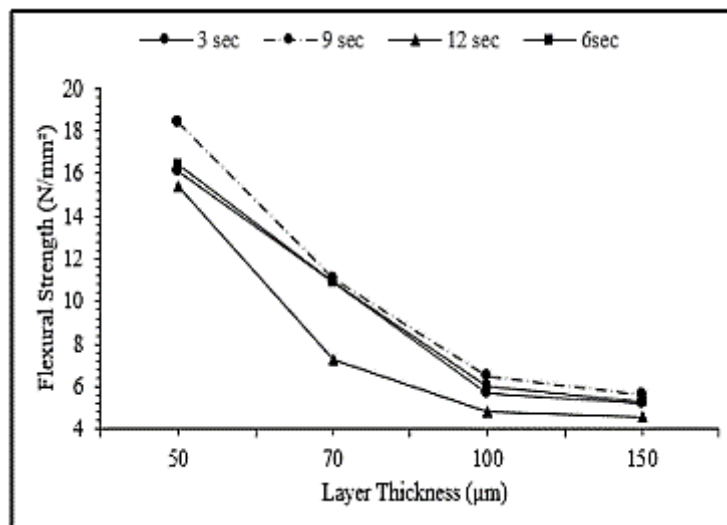


Figura 8 Esfuerzo flector vs espesor de capa para diferentes tiempos de exposición.

En conclusión, se puede decir que las mejores propiedades mecánicas, tanto para tracción como para flexión, se dieron para un tiempo de exposición de 9 segundos y con un espesor de capa de 50µm, mientras que los peores resultados se dieron para un tiempo de exposición de 12 segundos y un espesor de capa de 150µm.

Como criterio personal, se puede decir que estos resultados se obtienen debido a que, al tener tiempos de exposiciones muy prolongados, la resina se solidifica por completo y no se puede tener una fusión de capas, formando elementos más

uniformes y capas bien adheridas, como lo que se obtuvo a los 9 segundos. En cuanto al espesor de la capa, mientras más anchas son las capas, sucede un fenómeno similar a tener tiempo de exposición muy prolongado, ya que para lograr capas de mayor espesor la resina se ve obligada a secarse en el ambiente mientras alcanza su espesor final, por lo que no se lograría tampoco un elemento uniforme.

2.1.1 Historia de la impresión 3D

Los primeros pasos de la impresión 3D empezaron con Charles Hull, en 1984, al inventar el método de estereolitografía (SLA – Stereolithography), el cual se basa en la aplicación de resina en moldes, la cual es curada mediante luz ultravioleta hasta su solidificación. En el mismo año fundó la empresa 3DSystems y fue la principal empresa en promover y utilizar ese proceso a nivel industrial.

En 1989, Scott Crump funda la empresa Stratasys e inventa una nueva tecnología de impresión 3D, denominada Modelado por Deposición Fundida (FDM-Fused Deposition Modeling) que consiste en fundir un filamento de polímero (ABS, PLA, PVC, nylon, etc.) mediante superposición de capas, que se solidifican mientras continúa el proceso, hasta formar un elemento tridimensional deseado. Esta tecnología abarató los costos de producción en impresión 3D.

Seguido de esto se fundaron otras empresas importantes como Z Corporation, fundada por estudiantes del MIT, la misma que fue adquirida en el 2012 por 3DSystems quien era su principal patrocinador. Hasta el año 2006 las impresoras 3D eran muy costosas de adquirir con las empresas actuales, y es cuando el Dr. Bowyer, de la Universidad de Bath en Inglaterra, fabrica una impresora 3D capaz de imprimir la mayoría de partes de las que estaba fabricada. El proyecto fue denominado RepRap, y representó una revolución para un mercado más doméstico y también una de las más importantes consecuencias, dar paso a la entrada del Open Source y mejorar la accesibilidad para un mayor número de emprendedores, siendo una de las más notables empresas la Makerbot Industries con su modelo, la Makerbot.

La Makerbot es el proyecto OpenSource con mayor impacto en la impresión 3D, surge con la intervención de una comunidad muy grande donde cada usuario se lo considera un maker, todos podían aportar con soluciones e ideas para su fabricación,

y cuya misión era crear una impresora que pueda ser ensamblada por cualquier persona.

A partir de esto surgen los modelos Makerbot Cupcake y la Thing O-Matic (más moderna). Hasta el año 2013 se distribuyeron alrededor de 6000 unidades entre ambos modelos. A partir del 2012 la empresa Makerbot Industries toma un rumbo más comercial y se aleja de Open Source lo que ocasiona una tensión entre la comunidad Maker y Open Source. Makerbot Industries utiliza sus modelos Replicator para entrar al mercado y a partir de este momento comienza a crecer grandemente la popularidad de la impresión 3D.

2.2 Procedimiento para imprimir en 3D

El procedimiento se divide esencialmente en los siguientes pasos:

- **Modelación Digital** En esta etapa se crea un modelo 3D de lo que se desee construir, para su creación se requiere utilizar un software CAD (Diseño Asistido por Computador).
- **Exportación** Una vez que se haya creado el prototipo deseado se procede a generar el archivo en un formato adecuado (por lo general "STL"), este tipo de archivo contendrá la información geométrica del modelo.
- **Rebanado** En esta etapa se convierte el modelo digital a código G el cual contiene la información necesaria de los comandos que maneja y entiende la impresora 3D.
- **Conexión** Para la comunicación entre la impresora y el ordenador se puede hacer mediante cable USB o se puede copiar el código G en una tarjeta de memoria y colocarle directamente en la impresora.
- **Impresión** Se prepara la Impresora 3D y se manda a imprimir.
- **Acabado** Se procede a eliminar las partes adicionales creadas como los soportes.

2.3 Tecnologías de la impresión 3D

Hasta el momento existen distintos métodos disponibles para imprimir en 3D, la principal diferencia se halla en la forma en que se utilizan las distintas capas para la creación de piezas.

Tabla 5
Métodos de impresión 3d y sus características.

Tipo	Tecnologías	Materiales
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (ABS, PLA), metales eutécticos, materiales comestibles.
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF3)	Casi cualquier aleación de metal
Granulado	Sinterizado de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación de metal
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de Titanio
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplástico, polvos metálicos, polvos cerámicos.
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
Laminado	Laminado capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, Capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles.
	Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles

2.3.1 Tecnología FDM

FDM son las siglas de *Fused Deposition Modeling*, que traducido al español significa Modelo por Deposición Fundida. Las impresoras 3D que trabajan con esta tecnología se encargan de construir objetos capa a capa, el filamento termoplástico se calienta llegando a tener una consistencia semi-líquida y es extruido para la fabricación de la pieza. La

fabricación aditiva se encarga de crear objetos por medio de sucesión de capas desde la parte inferior hacia arriba, todo esto es contrario a los procesos tradicionales en los cuales se retira material de un bloque para llegar a obtener la pieza deseada.

La impresión 3D comienza con el calentamiento de la máquina (200 °C), necesario para la fusión de la materia. Una vez la máquina se calienta, un filamento de materia, del orden de 0.1 mm de diámetro, es extruido en una plataforma a través de una extrusora que se desplaza en los 3 ejes – x, y, z. La plataforma desciende de un nivel cada vez que una capa es aplicada, hasta finalizar la impresión del objeto. Los materiales para el proceso de fabricación son:

- Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)
- Poliláctico (PLA)
- Policarbonato (PC)
- Policaprolactona (PCL)
- Polifenilsulfona (PPSU)
- Polieterimida (PEI)

2.3.1.1 Material ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno es un plástico resistente al impacto, se lo considera un termoplástico amorfo, es decir cuando está sometido a temperaturas elevadas se deforma y se vuelve maleable o a su vez puede llegar a derretirse, en cambio al momento de enfriarse se endurece. El ABS está constituido por tres bloques:

- Acrilonitrilo aporta rigidez, dureza, estabilidad a elevadas temperaturas y resistencia a ataques químicos.
- Butadieno aporta tenacidad a temperaturas bajas y resistencia al impacto.
- Estireno aporta resistencia mecánica, dureza, rigidez y brillo.

Entre las propiedades que puede destacar el ABS tenemos primero que es un material resistente a temperaturas extremas, en especial cuando se trata de temperaturas bajo cero, con lo que se convierte en un material interesante e inalterable puesto que el ABS no se vuelve quebradizo como otros materiales sometidos a esas temperaturas; este material absorbe poca cantidad de agua y puede ser recubierto fácilmente con capas metálicas al ser receptivo a los baños de metales.

Propiedades Físico – Mecánicas Physical & Mechanical Properties	
Alargamiento a la Rotura (%) <i>Elongation at break (%)</i>	45
Coefficient de Fricción <i>Coefficient of friction</i>	0,5
Módulo de Tracción (GPa) <i>Tensile modulus (GPa)</i>	2,1-2,4
Resistencia a la Tracción (MPa) <i>Tensile strength (MPa)</i>	41-45
Resistencia al Impacto Izod (J m ⁻¹) <i>Izod impact strength (J m⁻¹)</i>	200-400
Absorción de Agua - en 24 horas (%) <i>Water absorption - over 24 hours (%)</i>	0.3-0.7
Densidad (g cm ⁻³) <i>Density (g cm⁻³)</i>	1,05
Resistencia a la Radiación <i>Radiation resistance</i>	Acceptable <i>Fair</i>
Resistencia a los Ultra-violetas <i>Resistance to Ultra-violet</i>	Mala <i>Poor</i>

Figura 9 Propiedades físicas y mecánicas del ABS

Fuente: (Siim and Co., S.L., 2012)

2.3.1.2 Material PLA

El Ácido Poli-láctico se trata de un polímero biodegradable derivado del ácido láctico, el cual es un material muy versátil que se lo fabrica por medio de recursos renovables al 100% entre ellos están: trigo, remolacha, maíz y más que son ricos en almidón. El ácido posee las mismas características e incluso mejores que algunos plásticos que se derivan del petróleo.

En las aplicaciones que más se usa el PLA se encuentra: la industria médica, textil y el empaquetado. En la industria textil utilizado para tapicería y toldos; en la medicina se usa para implantes en los huesos o en tejidos.

Características del PLA como material:

- Polímero permanente e inodoro.
- Resistente a la grasa y humedad.
- Su aspecto es claro y brillante.
- Su módulo de elasticidad es similar al polietileno.
- Posee inflamabilidad muy baja.
- Su rango de temperatura de impresión se encuentra entre 190-220°C.

Tabla 6*Propiedades físicas y mecánicas del PLA*

Densidad (g/cm³)	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 (°C)	60
Temperatura de deflexión del calor (°C)	65
Módulo de corte (GPa)	2.4
Capacidad calorífica específica (J/kg-K)	1800
Resistencia a la tracción (Mpa)	50

Tabla 7*Comparativa de propiedades físicas y características entre ABS y PLA*

ABS	PLA
Temperatura de extrusión: ~ 240 ° C	Temperatura de extrusión: ~ 200 ° C
Requiere cama caliente > 70 ° C	Poca temperatura de cama caliente
Funciona bastante bien sin refrigeración de capa.	Se beneficia enormemente de refrigeración de capa durante la impresión
Peor adherencia, se necesita cinta de poliamida o laca.	Buena adherencia a una gran variedad de superficies
Resistente a temperaturas altas	Poco resistente a temperaturas altas
Propenso a las grietas, delaminación y deformación	Propenso a la ondulación de las equinas y salientes.
Más flexible	Más frágil
Se pueden unir piezas usando adhesivos o disolventes (acetona o MEK)	Se poden unir piezas usando adhesivos específicos
Los humos son desagradables y nocivos en áreas cerradas	Humos no nocivos y olor más agradable
Polímero derivado del petróleo	Polímero de origen vegetal

2.3.2 Tecnología DLP

DLP es la abreviatura de Digital Light Processing, traducido al español Procesamiento Digital por Luz. Las impresoras que trabajan con esta tecnología se encargan de construir objetos capa a capa utilizando un proyector de luz, similar a un proyector de video, bajo una cuba con resina fotosensible.

El haz de luz va formando un patrón con la forma de la pieza a elaborar, este patrón endurece por capas la superficie de la resina y un mecanismo va desplazando la resina endurecida hacia afuera de la cuba, extrayendo las capas endurecidas y formando de esa manera las piezas deseadas.

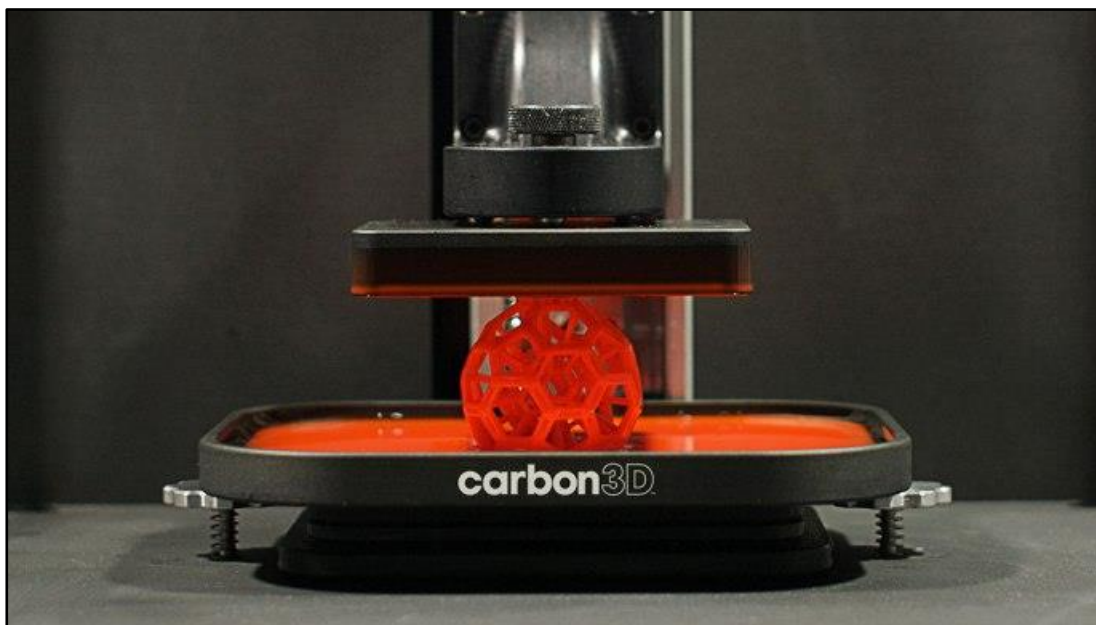


Figura 10 Impresión tridimensional mediante DLP de un elemento.

Fuente: (Kalodny, 2015)

Los materiales para la impresión 3D por DLP son por lo general resinas plásticas fotopoliméricas que pueden ser curadas por luz UV. Tienen una gama muy amplia de materiales dependiendo del fabricante y las impresoras a utilizar. 3D Systems tiene su marca de resinas fotopoliméricas, VisiJet® (HXX, 2015) con 8 variedades de resina;

- Flex
- Tough
- Clear
- Black
- Impact

- HiTemp
- e-Stone™
- SL Jewel

La mayoría de los fabricantes tienen disponible la ficha técnica (data sheets) de sus resinas, como podemos ver en la figura 11, correspondiente a la resina Clear de la empresa Formlabs.

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Postcured ³	Green ²	Postcured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	5510 psi	9380 psi	ASTM D 638-10
Young's Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	234 ksi	402 ksi	ASTM D 638-10
Elongation at Failure	12%	6.2%	12%	6.2%	ASTM D 638-10
Flexural Properties					
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa	181 ksi	320 ksi	ASTM C 790-10
Impact Properties					
Notched IZOD	16 J/m	25 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.46 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
Temperature Properties					
Heat deflection temp. @ 264 psi	42.7 °C	58.4 °C	108.9 °F	137.1 °F	ASTM D 648-07
Heat deflection temp. @ 66 psi	49.7 °C	73.1 °C	121.5 °F	163.6 °F	ASTM D 648-07
NOTES:					
¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings and temperature.					
² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, without additional treatments.					
³ Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Clear settings and post-cured with 1.25 mW/cm ² of 405 nm LED light at 60 °C for 60 minutes.					

Figura 11 Ficha técnica de resinas estándar Formlabs.

Fuente: (Formlabs, 2016)

2.3.2.1 Cámara de Curado

El curado se lo realiza al exponer la resina a luz UV, dentro de una cámara donde el elemento impreso en 3D recibe constante y uniformemente luz en la mayor parte del cuerpo.

El post-curado es un proceso que incrementa las propiedades mecánicas y un mejor acabado superficial en resinas fotosensibles. El curado de la resina, por ejemplo, incrementa su resistencia y en resinas flexibles incluso la puede duplicar. La temperatura, intensidad de luz, tiempos de exposición, etc. son factores que influyen en el secado completo de la resina y las propiedades mecánicas respectivas a estos factores. (Zguris, 2017)

- **Radiación Ultravioleta**

Este tipo de luz es de radiación electromagnética y posee una longitud de onda más corta que la luz visible, se encuentra aproximadamente entre los 400nm y los 15nm.

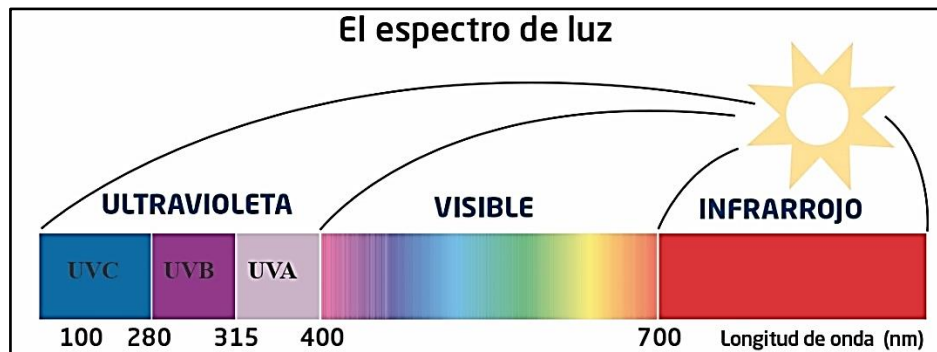


Figura 12 Espectro de luz y rangos de longitud de onda

Fuente: (Wikiwand, s.f.)

Esta radiación se caracteriza por tener una gran actividad fotoeléctrica y fotoquímica.

- **Leyes ópticas de luz UV**

- **Reflexión:** La reflexión que los rayos UV generan cambian dependiendo de la superficie. En superficies brillantes es donde ocurre la mayor reflexión, en superficies pulidas la reflexión es especular, cuando se tiene superficies irregulares la reflexión es difusa y cuando las superficies son oscuras la reflexión que se genera es la menor.

- **Dispersión:** Existe cuando la reflexión y la refracción ocurren en un medio irregular.

- **Transmisión:** Los rayos UV no requieren de un medio para ser transmitidos

- **Absorción:** Al ser absorbidos los rayos UV, estos son capaces de producir interacciones entre la energía y las moléculas, ya sea por disociación o excitación molecular.

2.4 Metodologías para el diseño de experimentos.

2.4.1 Metodología de superficie de respuesta

El método de superficie de respuestas, RSM por sus siglas del inglés *Response Surface Methodology*, se usa para explorar la relación entre una variable y un conjunto de variables. Lo que se busca con este método es definir la configuración de factores que optimicen la respuesta. Los métodos de superficie de respuesta sirven para:

- Hallar la configuración de factores que produzcan la mejor respuesta
- Hallar la configuración de factores para satisfacer las especificaciones del proceso.
- Buscar nuevas condiciones para que el proceso obtenga una mayor calidad con respecto a las condiciones actuales.

2.4.1.1 Modelos de RSM

En el diseño de superficie de respuesta tiene como objetivo ajustar modelos a los datos predefinidos, utilizando los siguientes términos:

- Lineal
- Lineales + cuadrados
- Lineal + interacción de 2 factores
- Cuadrático completo

2.4.1.2 Gráficas de RSM

Las gráficas proporcionadas por la superficie de respuesta permiten inspeccionar, de una forma visual, las respuestas para ciertas zonas de los distintos niveles de cada factor de interés y apreciar su sensibilidad a factores de tratamiento. Las superficies de respuesta permiten observar el comportamiento de la combinación de niveles de los factores, con el fin de alcanzar la optimización del experimento.

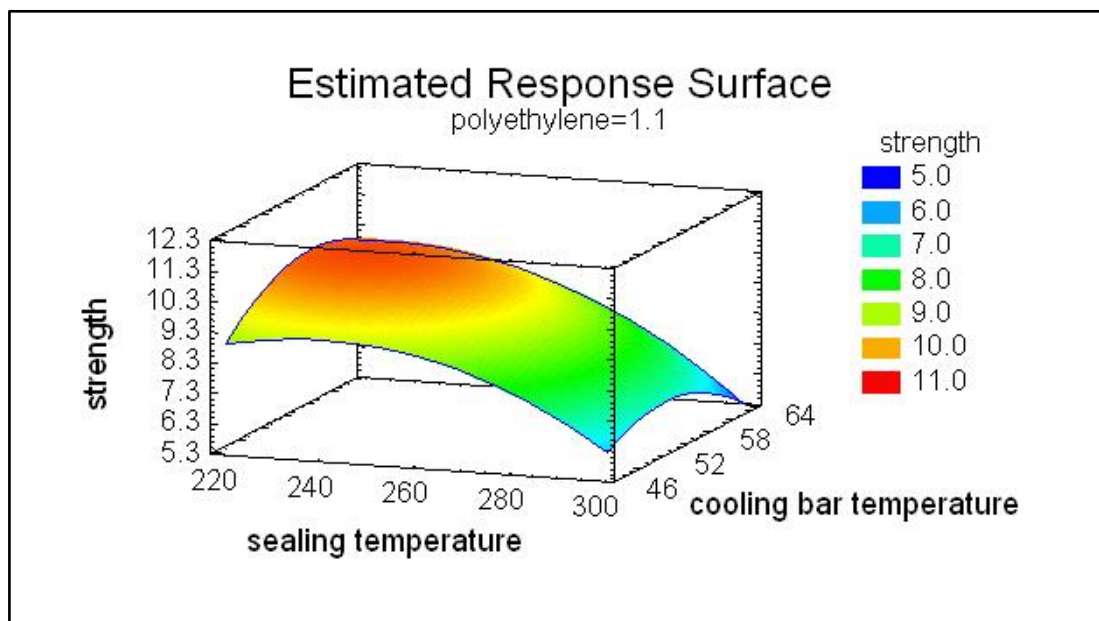


Figura 13 Ejemplo de un gráfico de superficie de respuesta

Fuente: (Statgraphics.Net, 2011)

La gráfica de respuesta se trata de una superficie sólida en un espacio tridimensional, a su vez si no se tiene claro el contenido de la gráfica se puede optar por la gráfica de contornos de la superficie, en la cual se trazan líneas de respuesta en el plano y cada contorno pertenece a una altura específica de la superficie de respuesta.

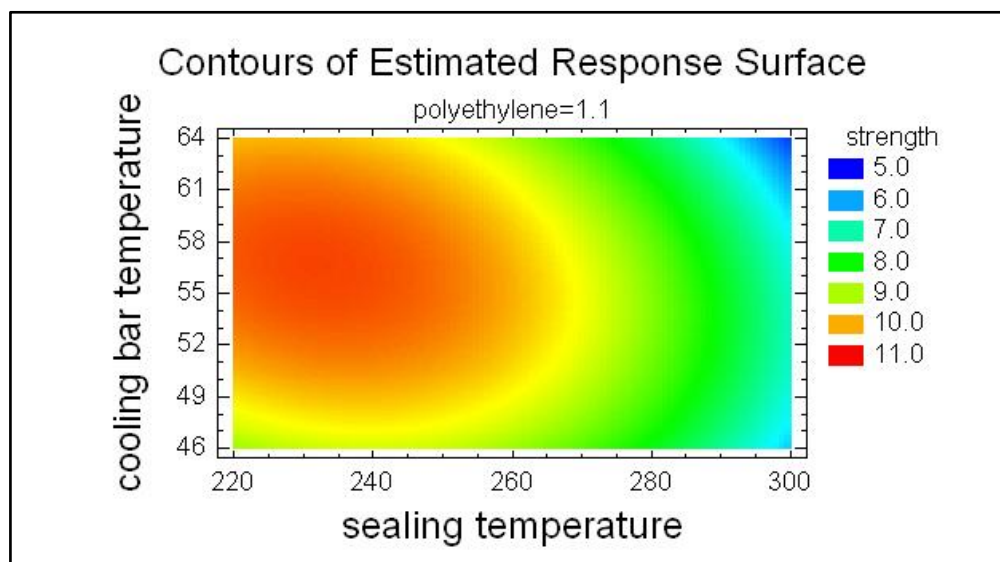


Figura 14 Ejemplo de gráfica de contorno

Fuente: (Statgraphics.Net, 2011)

2.4.1.3 Optimización de respuesta

Se utiliza la optimización de respuestas para hallar la combinación de los valores de factores que en conjunto optimizan la respuesta, y a su vez que satisfagan los requisitos de todas las respuestas. La gráfica de optimización suele ser dinámica, dependiendo de la herramienta estadística utilizada (software), con lo que es posible interactuar con los parámetros durante el análisis de sensibilidad y, probablemente, poder optimizar una solución final.

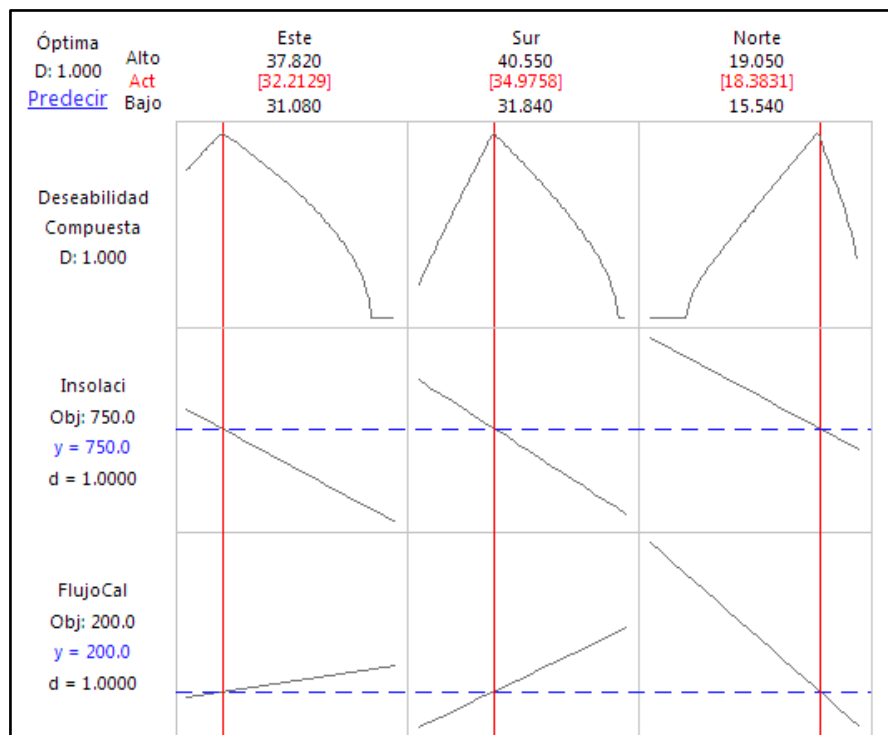


Figura 15 Ejemplo de gráfica de optimización de RSM

Fuente: (Soporte de Minitab 18, 2017)

En donde:

- Las líneas rojas que se muestran en forma vertical representan el valor de los factores actuales.
- Las líneas azules que se muestran en forma horizontal representan las respuestas que se obtienen con la configuración actual de cada factor.

2.4.2 Metodología de Taguchi

La metodología de Taguchi (arreglo ortogonal), permite diseñar experimentos en los cuales se requiere solo una fracción de las combinaciones factoriales completas. Se habla de un arreglo ortogonal puesto que el diseño se encuentra balanceado, es decir que los niveles de los factores se ponderan equitativamente.

La metodología de Taguchi se basa en la importancia del control de la calidad, utilizando el diseño de experimentos (DOE).

2.4.2.1 Arreglos Ortogonales

Para el diseño de parámetros y saber el número de experimentos a realizar, la herramienta más utilizada son los diseños factoriales fraccionados, pero cuando los factores a considerar aumentan, aumentan también las interacciones y las complicaciones para establecer las condiciones específicas a experimentar.

El arreglo ortogonal se compara con una factorial fraccionada, es decir que conserva el concepto de ortogonalidad y contrastes.

Taguchi planteó una serie de arreglos particulares que fueron denotados por la expresión:

$$L_{a(b)C}$$

En donde:

a= Es el número de pruebas que se tomará.

b= Son los diferentes niveles a los que se tomará cada factor.

c= Número de efectos independientes a analizar.

L27 (3**13)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Figura 16 Arreglo ortogonal L27(3)13

Fuente: (Soporte de Minitab 18, 2017)

En el arreglo ortogonal cada columna representa un factor del diseño el cual puede tener dos o más niveles cada uno; y cada fila representa una corrida con cada uno de los valores de los factores. En este caso se escoge un arreglo L27(3)5 que quiere decir 27 corridas, con 5 factores de 3 niveles cada uno.

- **Valor p**

Este valor determina si se rechaza la hipótesis nula, los valores de p se encuentran entre 0 y 1. El valor p es la probabilidad de obtener una estadística de prueba que obtenga un valor tan extremo como el valor calculado, siempre y cuando la hipótesis nula sea verdadera. El valor de significancia es de 0.05.

- **R-cuad**

Representa el valor porcentual de variación de la variable de respuesta, relacionado con más de una variable predictora. Cuan más alto sea el valor de R-cuad, el modelo se ajustará más a los datos. El valor se encuentra entre 0 y 100%

- **Valor F**

Si el valor de F es muy grande nos dice que el término o el modelo es significativo y se lo debe considerar.

2.5 Dureza Shore D

La Dureza shore se trata de una escala de medida de la dureza elástica que presentan los materiales. El ensayo de dureza shore D permite diagnosticar la dureza superficial que presenta el material por medio de la medición de la profundidad que consigue una punta de acero normalizada en el momento que se presiona contra el material.

En este ensayo el indentador penetra el material ensayado para posteriormente medir el rebote que queda registrado mostrándonos la dureza. Mientras menor sea la profundidad de penetración, más grande será la dureza del material. El durómetro se utiliza principalmente para medir materiales duros y muy duros, la escala shore D tiene una amplia gama de medición que va de 0 a 100 HD, algunos de los materiales más comunes y las durezas respectivas que tienen, se encuentran en la tabla 8.

Tabla 8*Materiales comunes respecto a su dureza en escala Shore D*

Dureza Shore D	Materiales
5	Correa de Bungee, manguera para radiadores
15	Vinilo para sillas, suela para tenis deportivos
25	Manguera de jardín, patito de goma
35	Enchufe del cable de extensión, Tupperware
45	Correa de vinil para reloj
55	Caucho de los rodillos para impresión
65	Ruedas de patines, polietileno
75	ABS
85	Mucha Dureza
95	Laminados para muebles de cocina

2.6 Probetas y materiales

Los materiales que serán utilizados son Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), Ácido Poliláctico (PLA), para la tecnología FDM, y resina fotosensible, para la tecnología DLP. Las dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción siguen los lineamientos de la norma ASTM D-638-02 (ver figuras 17 y 18), utilizada para obtener datos de las propiedades de tensión para el control y especificación de materiales plásticos, específicamente se elige el espécimen tipo IV para FDM y tipo V para DLP. El espesor es 4 mm para ambas.

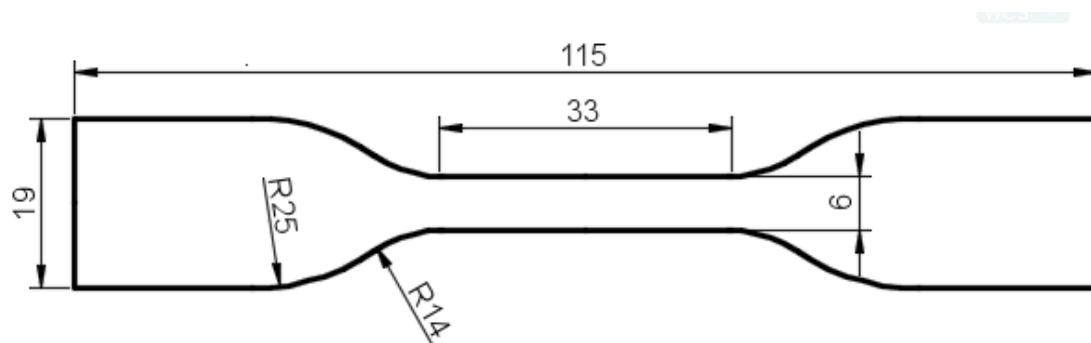


Figura 17 Dimensiones de probeta de tracción para tecnología FDM

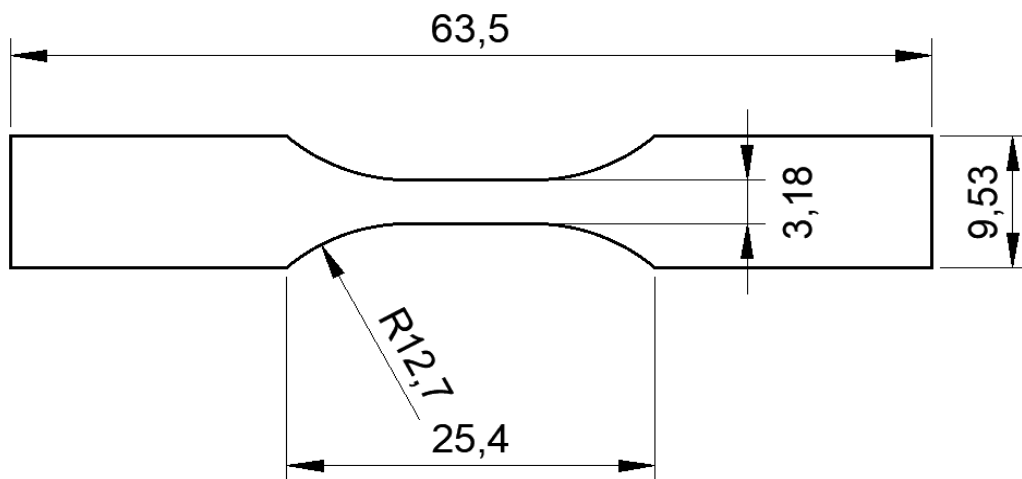


Figura 18 Dimensiones de probeta de tracción para tecnología DLP

Para el ensayo de flexión se utilizará la norma ASTM D790-17, la cual se utiliza para obtener las propiedades de flexión de materiales plásticos reforzados y no reforzados, así como de materiales aislantes eléctricos. Las dimensiones de la probeta fueron definidas mediante esta norma, y se aprecian en las figuras 19 y 20. El espesor es de 3.2 mm para ambas.

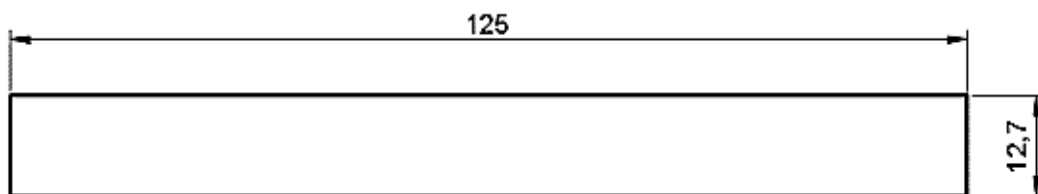


Figura 19 Dimensiones de probeta de flexión para tecnología FDM.

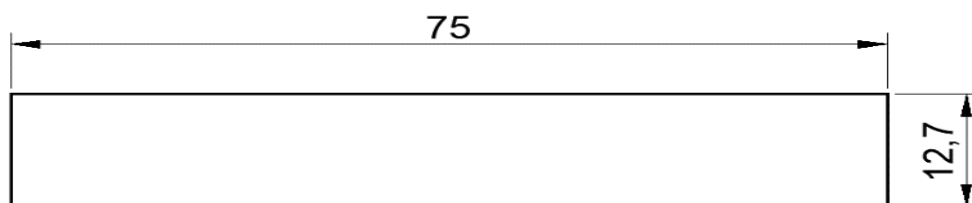


Figura 20 Dimensiones de probeta de flexión para tecnología DLP.

Para el ensayo de dureza se utilizan las mismas probetas utilizadas en los ensayos de flexión en ambas tecnologías de impresión.

2.7 Equipo a utilizar

2.7.1 Impresoras 3D

2.7.1.1 MakerBot Replicator 2X

Para la impresión de las probetas en ABS y PLA se utiliza la impresora MakerBot Replicator 2X, ver figuras 1 y 21, una impresora experimental para profesionales. Cuenta con doble extrusor y esta optimizada para impresión en filamento de ABS y material disolvente (PVA) de 1.75mm de diámetro, posee conexión directa por cable USB o también por tarjeta SD removible.

Las dimensiones máximas de impresión son de 246 x 152 x 155 mm y tiene una resolución de 100 micrones.

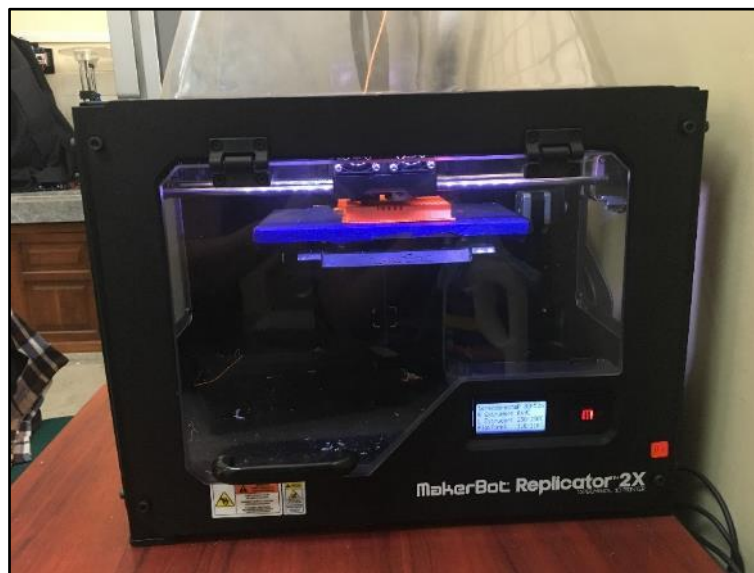


Figura 21 Impresora MakerBot Replicator 2X utilizada

2.7.1.2 Impresora DLP genérica

Para la impresión de las probetas de resina, se utiliza la impresora con tecnología DLP, propiedad de Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Esta impresora, vista en figura 22, fue elaborada como proyecto de tesis en el año 2015 por dos estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica, por lo que es considerada una impresora genérica.

Las dimensiones máximas de impresión son de 100 x 75 x 100 mm y tiene una resolución de ± 0.1 mm con una velocidad máxima de impresión es de 0.1 mm de capa por cada 10 segundos. El tipo de conexión que tiene la impresora es mediante cable

USB de impresora, el cual conecta el Arduino con el computador, y un cable VGA que proyecta la imagen de la pantalla mediante el proyector instalado, modelo ACER X1240 (Almeida & Castillo, 2015).

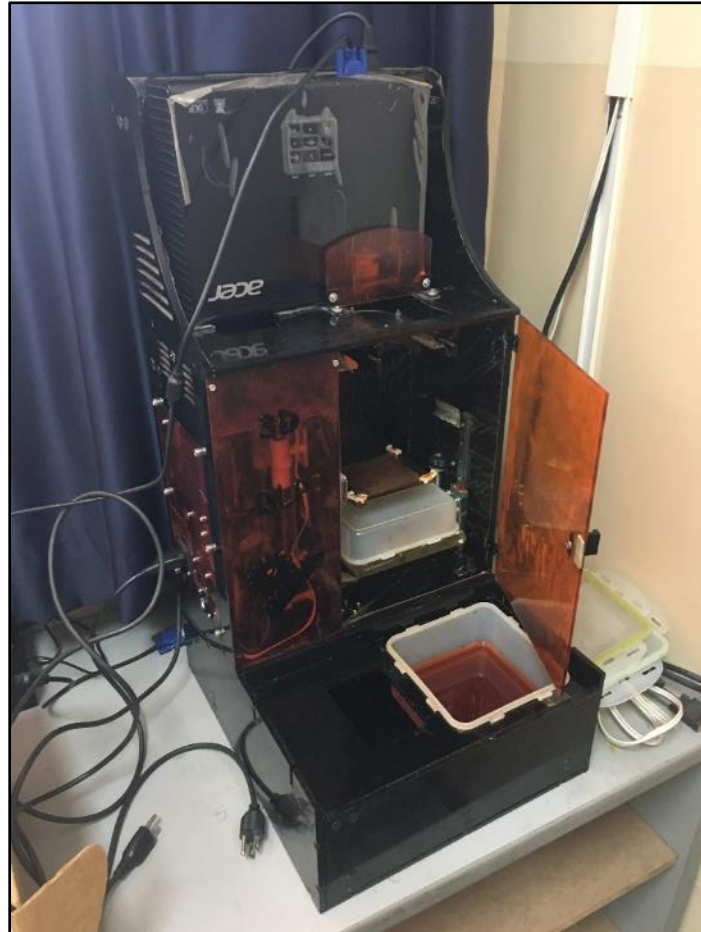


Figura 22 Impresora DLP utilizada

2.7.2 Equipos para ensayos

2.7.2.1 Máquina de ensayos universales MTS

Para realizar los ensayos de flexión y tracción se utiliza la máquina de ensayos universales MTS modelo T-5002, ver figura 23, del laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

La máquina tiene una capacidad máxima de 5000 N de fuerza, suficiente para los ensayos requeridos para los polímeros que se utiliza en impresión 3D.



Figura 23 Máquina de ensayos universales MTS T-5002

2.7.2.2 Durómetro portátil INSIZE Shore D

Para los ensayos de dureza, se utiliza un durómetro portátil INSIZE en escala Shore D. El durómetro es del laboratorio de metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

El durómetro tiene las siguientes características:

- Golpe de Punta: 0-2.5mm
- Rango: 0-100HD
- Apreciación: ± 1 HD
- Dimensiones: 115x60x25 (mm)
- Peso neto: 0.5kg



Figura 24 Durómetro Shore D utilizado

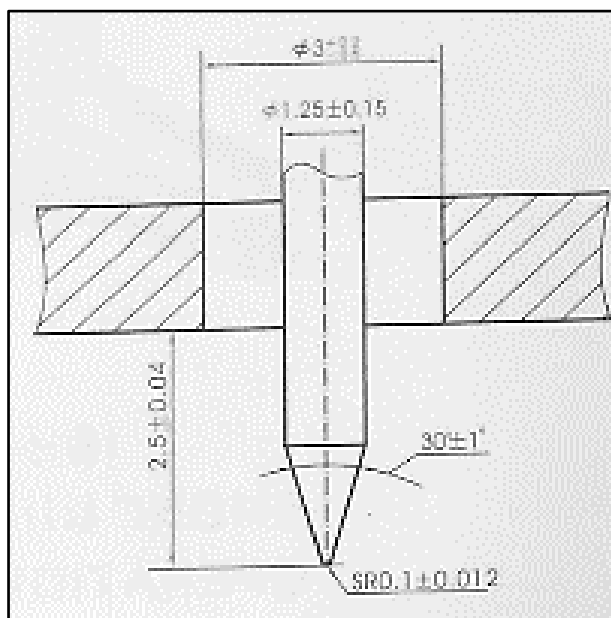


Figura 25 Indentador del durómetro

CAPÍTULO III

3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

3.1 Definición

“El diseño de experimentos (DOE) es una técnica estadística que se basa en organizar y diseñar una serie de experimentos de forma que con el mínimo número de pruebas se consiga extraer información útil para obtener conclusiones que permitan optimizar la configuración de un proceso o producto.” (Bernal, 2012)

3.2 Metodología

En el diseño de experimentos se eligen los factores que serán utilizados en el estudio de la tesis, en este caso serán los parámetros de impresión que pueden afectar directa o indirectamente a los elementos, estos establecerán los límites. Una vez establecido lo anterior, se debe diseñar el plan de pruebas, el cual variará dependiendo del número de factores a considerar. Los parámetros han sido escogidos considerando los parámetros más relevantes que se han evidenciado en otros estudios. Se establece usar tres niveles de estudio por cada factor, para evaluar la influencia de cada parámetro en las propiedades mecánicas.

Tabla 9

Parámetros definidos para la experimentación.

PARÁMETROS POR VARIAR			
Perímetros y capas			
Alto de capa [mm]	0,20	0,25	0.30
Alto de primera capa [mm]	0,20	0,25	0.30
Número de perímetros	2	3	4
Número de capas sólidas	Superior		3
[mm]	Inferior		3
Control de relleno			
Densidad de relleno [%]	25%	50%	75%
Patrón de relleno	Lineal, diamante y hexagonal		

3.2.1 Parámetros de fabricación en impresoras 3D por medio de tecnología FDM

Una vez realizado el diseño de la pieza en un software CAD y exportado el archivo con el formato .STL, se procede a configurar los parámetros que se requieran en el software para la impresora 3D. El software permite tener libertad para configurar los parámetros deseados en el momento de la impresión.

3.2.2 Parámetros relacionados con perímetros y capas

- **Altura Capa:** aquí se define la altura que tendrán las capas de la pieza, se debe considerar que mientras mayor sea la altura de la capa, menor será la calidad tendrá la pieza; y mientras menor sea la altura de la capa, se conseguirá una mejor calidad de pieza. Esta define la calidad de la pieza en el eje Z, más no define el nivel de detalle en los otros ejes X e Y. Este parámetro tiene que tener relación con el diámetro de la boquilla del extrusor, no es recomendable imprimir altura de capas superiores al 80% del diámetro de la boquilla ni menor al 40% de la misma.



Figura 26 Diferencia de acabado a diferentes alturas de capa

Fuente: (ikasLab, 2015)

- **Perímetros:** aquí se define el número de perímetros o paredes que tendrá la pieza, es decir el número de capas laterales. (Es recomendable colocarlo como múltiplo del tamaño de nuestro extrusor (Nozzle), es decir, para nuestro extrusor de 0.4 con un valor de 0.8 generará 2 perímetros y así sucesivamente.)

3.2.3 Parámetros para controlar el relleno:

- **Porcentaje de Relleno:** Aquí se define el tanto por ciento que se desea tener en la pieza, este parámetro se lo expresa en formato decimal, se puede escoger 0% para piezas huecas y 100% para piezas completamente macizas. Se debe tomar en consideración que el porcentaje de relleno es proporcional al tiempo y al material que se use para la creación de la pieza.

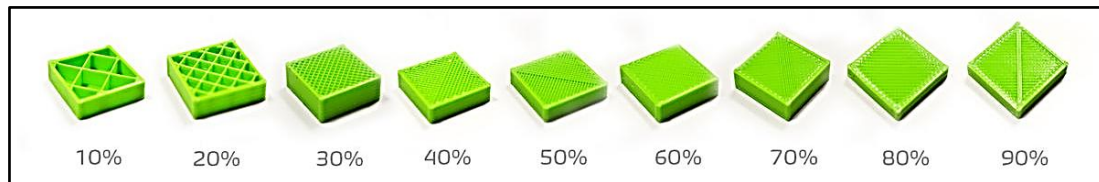


Figura 27 Impresión a diferentes porcentajes de relleno

Fuente: (ikasLab, 2015)

- **Patrón de Relleno:** Se selecciona el tipo de relleno deseado para las capas a excepción de la capa superior e inferior; dentro de los tipos de relleno tenemos rectilíneos, en panal de abeja, concéntrico.
- **Relleno superior e inferior:** Se definirá el tipo de relleno tanto en las capas superiores como en las inferiores.
- **Capa Sólida:** Nos permite seleccionar el número de capas de relleno nosotros deseamos una capa sólida.

3.3 Experimento para ensayos de flexión

3.3.1 Experimento con tecnología FDM

Para la experimentación con tecnología FDM se eligen los factores antes definidos y se eligen los niveles para cada factor. Los niveles y factores, organizados en la tabla 10, han sido seleccionados en base a las investigaciones mencionadas en el capítulo 2. Los factores de densidad y patrón de relleno se eligieron con el afán de abarcar cuartiles en el rango de relleno y las configuraciones más comunes en las impresoras de tecnología FDM.

Tabla 10

Valor de cada nivel según el factor para tecnología FDM.

Factores	Niveles		
	1	2	3
Alto de capa	0.2	0.25	0.3
Alto primera capa	0.2	0.25	0.3
Número de Perímetros	2	3	4
Densidad de relleno	25	50	75
Patrón de relleno	Lineal	Hexagonal	Diamante

Según la metodología Taguchi, el único arreglo que se ajusta para 5 factores y 3 niveles es el L27(3)5, el mismo que se encuentra definido en la tabla 11.

Tabla 11

Formulario de flexión para FDM. Arreglo ortogonal L27(3)5.

No.	Alto de capa	Alto primera capa	Número de perímetros	Densidad de relleno	Patrón de relleno	Tiempo estimado [min]	Fuerza máxima [N]
1	1	1	1	1	1		
2	1	1	1	1	2		
3	1	1	1	1	3		
4	1	2	2	2	1		
5	1	2	2	2	2		
6	1	2	2	2	3		
7	1	3	3	3	1		
8	1	3	3	3	2		
9	1	3	3	3	3		
10	2	1	2	3	1		
11	2	1	2	3	2		
12	2	1	2	3	3		
13	2	2	3	1	1		
14	2	2	3	1	2		
15	2	2	3	1	3		

Continúa 

16	2	3	1	2	1
17	2	3	1	2	2
18	2	3	1	2	3
19	3	1	3	2	1
20	3	1	3	2	2
21	3	1	3	2	3
22	3	2	1	3	1
23	3	2	1	3	2
24	3	2	1	3	3
25	3	3	2	1	1
26	3	3	2	1	2
27	3	3	2	1	3

Los valores 1, 2 y 3, en la tabla 11 representan los niveles de cada factor para la experimentación en FDM, los mismos que están descritos en la tabla 10 con los valores correspondientes a cada factor.

3.3.2 Experimento con tecnología DLP

Para la experimentación con la tecnología DLP se toma en cuenta 2 factores con 3 niveles, los mismos que se encuentran en la tabla 12. Estos factores fueron seleccionados de acuerdo con las limitaciones de configuración que la impresora DLP utilizada (figura 23) tiene actualmente.

Tabla 12

Valor de cada nivel según el factor para tecnología DLP

Factores	Niveles		
	1	2	3
Tiempo de Curado [s]	6	3	9
Tiempo Post Curado [s]	4	5	6

De acuerdo con la cantidad de factores y niveles que están definidos, el arreglo que se elige según la metodología Taguchi es un L9(3)2, el cual se encuentra en la tabla 13.

Tabla 13*Formulario de flexión para DLP. Arreglo ortogonal L9(3)2*

No.	Tiempo curado	Tiempo Post Curado	Fuerza Máxima [N]
1	1	1	
2	1	2	
3	1	3	
4	2	1	
5	2	2	
6	2	3	
7	3	1	
8	3	2	
9	3	3	


3.4 Experimento para ensayos de dureza

3.3.1 Experimento con tecnología FDM

Para realizar los ensayos de dureza en las probetas impresas con tecnología FDM se utiliza el mismo arreglo que se usó para la flexión, con la diferencia que el resultado es dureza en lugar de fuerza de flexión. La tabla 14 es en donde se registrarán los resultados.

Tabla 14*Formulario de dureza para FDM. Arreglo ortogonal L27(3)5.*

No.	Alto de capa	Alto primera capa	Número de perímetros	Densidad de relleno	Patrón de relleno	Dureza Máxima Shore D
1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	1	2	
3	1	1	1	1	3	
4	1	2	2	2	1	
5	1	2	2	2	2	
6	1	2	2	2	3	

Continúa 

7	1	3	3	3	1
8	1	3	3	3	2
9	1	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1
11	2	1	2	3	2
12	2	1	2	3	3
13	2	2	3	1	1
14	2	2	3	1	2
15	2	2	3	1	3
16	2	3	1	2	1
17	2	3	1	2	2
18	2	3	1	2	3
19	3	1	3	2	1
20	3	1	3	2	2
21	3	1	3	2	3
22	3	2	1	3	1
23	3	2	1	3	2
24	3	2	1	3	3
25	3	3	2	1	1
26	3	3	2	1	2
27	3	3	2	1	3

3.3.2 Experimento con tecnología DLP

Para los ensayos de dureza en DLP se procede igual que en FDM, con la diferencia de que el arreglo es un L9(3)2 que está en la tabla 15.

Tabla 15

Formulario de dureza para DLP. Arreglo ortogonal L9(3)2

No.	Tiempo curado	Tiempo Post Curado	Dureza Máxima Shore D
1	1	1	
2	1	2	
3	1	3	
4	2	1	
5	2	2	
6	2	3	
7	3	1	

Continúa 

8	3	2
9	3	3

3.5 Metodología Taguchi

3.5.1 Ensayos de flexión en PLA

Tabla 16

Registro de fuerza máxima en ensayo de flexión. Material: PLA

No.	Alto de capa	Alto primera capa	Número de perímetros	Densidad de relleno	Patrón de relleno	Tiempo estimado [min]	Fuerza máxima [N]
1	1	1	1	1	1	11	55.021
2	1	1	1	1	2	11	36.849
3	1	1	1	1	3	11	39.280
4	1	2	2	2	1	13	56.367
5	1	2	2	2	2	13	38.944
6	1	2	2	2	3	12	28.201
7	1	3	3	3	1	14	56.872
8	1	3	3	3	2	14	53.843
9	1	3	3	3	3	13	51.319
10	2	1	2	3	1	14	58.050
11	2	1	2	3	2	14	45.598
12	2	1	2	3	3	13	48.627
13	2	2	3	1	1	12	34.580
14	2	2	3	1	2	12	54.348
15	2	2	3	1	3	12	57.208
16	2	3	1	2	1	12	49.510
17	2	3	1	2	2	13	41.230
18	2	3	1	2	3	12	48.627
19	3	1	3	2	1	13	41.560
20	3	1	3	2	2	14	51.534
21	3	1	3	2	3	13	50.814
22	3	2	1	3	1	14	68.313
23	3	2	1	3	2	14	34.076

Continúa 

24	3	2	1	3	3	13	63.097
25	3	3	2	1	1	13	30.540
26	3	3	2	1	2	13	30.216
27	3	3	2	1	3	13	31.726

3.5.1.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Alto de Capa	2	72.33	36.17	0.37	0.696
Primera Capa	2	106.72	53.36	0.55	0.589
Perímetros	2	439.64	219.82	2.26	0.137
Densidad de Relleno	2	696.54	348.27	3.58	0.052
Patrón de Relleno	2	228.80	114.40	1.17	0.334
Error	16	1558.42	97.40		
Total	26	3102.45			

3.5.1.2 Resumen del modelo

S R-cuad.
9.86920 49.77%

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	FUERZA	Ajuste	Resid	Resid	est.
13	34.58	52.27	-17.69	-2.33	R
23	34.08	51.59	-17.51	-2.31	R

Residuo grande R

3.5.1.3 Análisis del modelo

Debido a que el valor más pequeño de p es igual a 0.052 correspondiente al factor densidad de relleno, se evidencia que este factor es el más influyente en la resistencia de la probeta. El valor R-cuad muestra un ajuste del 49.77% de los datos con el modelo experimental.

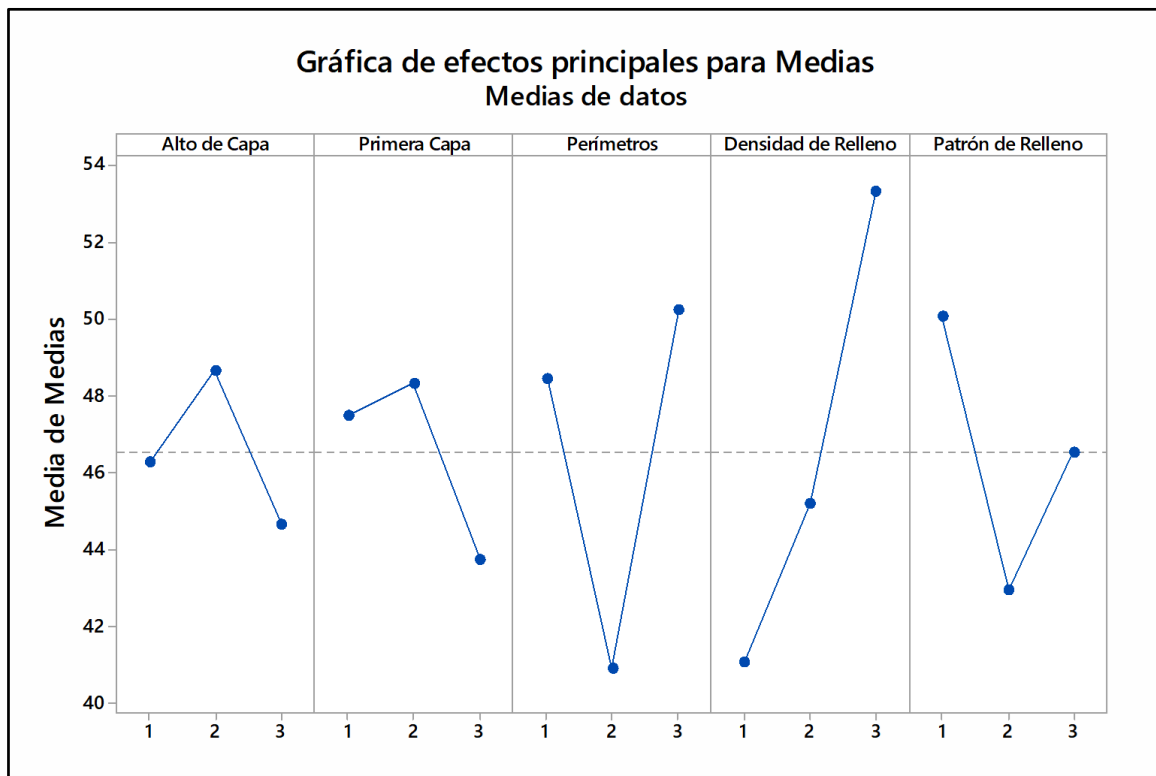


Figura 28 Gráfica de efectos principales para flexión en PLA

Se puede ver en la figura 29 que, según el análisis de promedios realizado en el DOE, los valores óptimos reflejados hacia las propiedades mecánicas de las probetas se obtendrían con la configuración descrita en la tabla 17.

Tabla 17

Configuración para fuerza máxima a flexión en PLA con metodología Taguchi

Factor	Nivel óptimo
Alto de capa	2 (0.25 mm)
Alto de primera capa	2 (0.25 mm)
Perímetros	3 (4)
Densidad de relleno	3 (75%)
Patrón de relleno	1 (Lineal)

El diseño predice que esta sería la mejor configuración para obtener las probetas con la mayor resistencia a la flexión.

3.5.1.4 Análisis de interacción de factores para flexión. Material: PLA

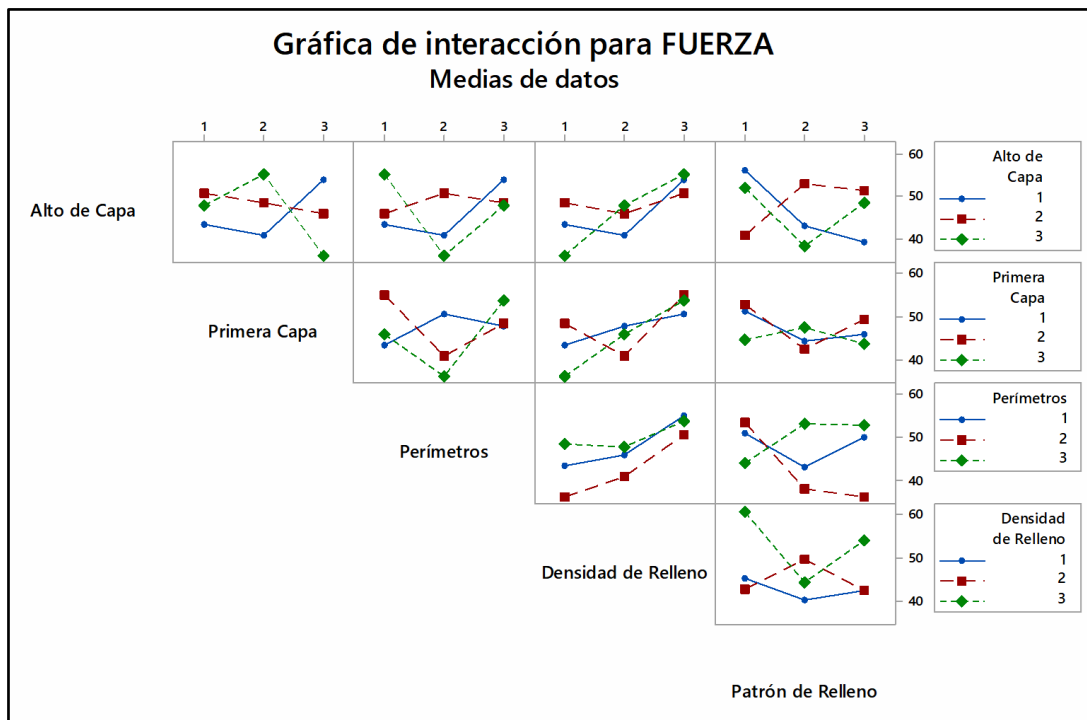


Figura 29 Gráfica de interacción de factores para fuerza en PLA

- **Alto de capa vs Primera capa**

En el nivel 1 y 3 del alto de capa se tiene una interacción fuerte respecto a los niveles 2 y 3 de primera capa, y se tiene una interacción en los niveles 2 y 3 respecto a los niveles 1 y 2 de primera capa.

- **Alto de capa vs Perímetros**

Solo se tiene una interacción significativa en el nivel 2 y 3 de los perímetros con respecto al alto de capa 2 y 3. A nivel 3 de perímetros se llega a tener valores similares por lo que no es significativo.

- **Alto de capa vs Densidad de relleno**

La única diferencia significativa se tiene a nivel 1 de la densidad de relleno, con una interacción significativa entre alto de capa 1-3.

- **Alto de capa vs Patrón de relleno**

Se tiene una interacción significativa entre el alto de capa 1-3 y 2-3 respecto a los niveles 1 y 2 del patrón de relleno.

- **Primera capa vs Perímetros**

A nivel 1 de perímetros hay una diferencia significativa de primera capa nivel 2 respecto a las demás. Se tiene también una interacción significativa de la primera capa en el nivel 1 y 2 respecto a los perímetros 1 y 2.

- **Primera capa vs Densidad de relleno**

No existe una interacción significativa en ninguno de los niveles, pero si hay una diferencia significativa entre nivel 1 y 2 de primera capa respecto al nivel 1 de la densidad de relleno.

- **Primera capa vs Patrón de relleno**

Prácticamente no se tiene interacciones ni diferencias significativas.

- **Perímetros vs Densidad de relleno**

No se tiene ningún tipo de interacción ni diferencias significativas.

- **Perímetros vs Patrón de relleno**

Se tiene una interacción significativa entre los niveles 2 y 3 de perímetros respecto a 1 y 2 del patrón de relleno. El tramo 2-3 no presenta ninguna interferencia significativa, pero si una diferencia significativa entre el nivel 2 con los demás, siendo este el menor.

- **Densidad de relleno vs Patrón de relleno**

Se tiene una diferencia significativa a nivel 1 de densidad de relleno siendo el nivel 3 de patrón de relleno el mayor significativamente comparado con 1 y 2. En cuanto a las interacciones de factores, no se encontró ninguna interacción significativa.

3.5.2 Ensayos de flexión en ABS

Tabla 18

Registro de fuerza máxima en ensayo de flexión. Material: ABS

No	Alto de capa	Alto primera capa	Número de perímetros	Densidad de relleno	Patrón de relleno	Tiempo estimado [min]	Fuerza máxima [N]
1	1	1	1	1	1	11	19.597
2	1	1	1	1	2	11	37.053
3	1	1	1	1	3	11	37.221
4	1	2	2	2	1	13	24.414

Continúa 

5	1	2	2	2	2	13	32.023
6	1	2	2	2	3	12	18.601
7	1	3	3	3	1	14	31.894
8	1	3	3	3	2	14	22.587
9	1	3	3	3	3	13	27.569
10	2	1	2	3	1	14	26.69
11	2	1	2	3	2	14	30.06
12	2	1	2	3	3	13	28.732
13	2	2	3	1	1	12	27.569
14	2	2	3	1	2	12	25.742
15	2	2	3	1	3	12	26.407
16	2	3	1	2	1	12	27.071
17	2	3	1	2	2	13	17.122
18	2	3	1	2	3	12	29.728
19	3	1	3	2	1	13	30.393
20	3	1	3	2	2	14	28.234
21	3	1	3	2	3	13	25.078
22	3	2	1	3	1	14	22.158
23	3	2	1	3	2	14	19.137
24	3	2	1	3	3	13	26.355
25	3	3	2	1	1	13	14.268
26	3	3	2	1	2	13	17.458
27	3	3	2	1	3	13	18.969

3.5.2.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Alto de Capa	2	144.685	72.342	2.44	0.119
Primera Capa	2	188.163	94.081	3.17	0.069
Perímetros	2	68.933	34.466	1.16	0.338
Densidad de Relleno	2	7.234	3.617	0.12	0.886
Patrón de Relleno	2	12.131	6.066	0.20	0.817
Error	16	474.860	29.679		
Total	26	896.006			

3.5.2.2 Resumen del modelo

S R-cuad.
 5.44782 47.00%
 Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	FUERZA	Ajuste	Resid	Resid est.	R
1	19.60	30.55	-10.95	-2.61	

Residuo grande R

3.5.2.3 Análisis del modelo

Debido a que el valor más pequeño de p es igual a 0.069 correspondiente al factor primera capa, se evidencia que este factor es el más influyente en la resistencia de la probeta. El valor R-cuad muestra un ajuste del 47.00% de los datos con el modelo experimental.

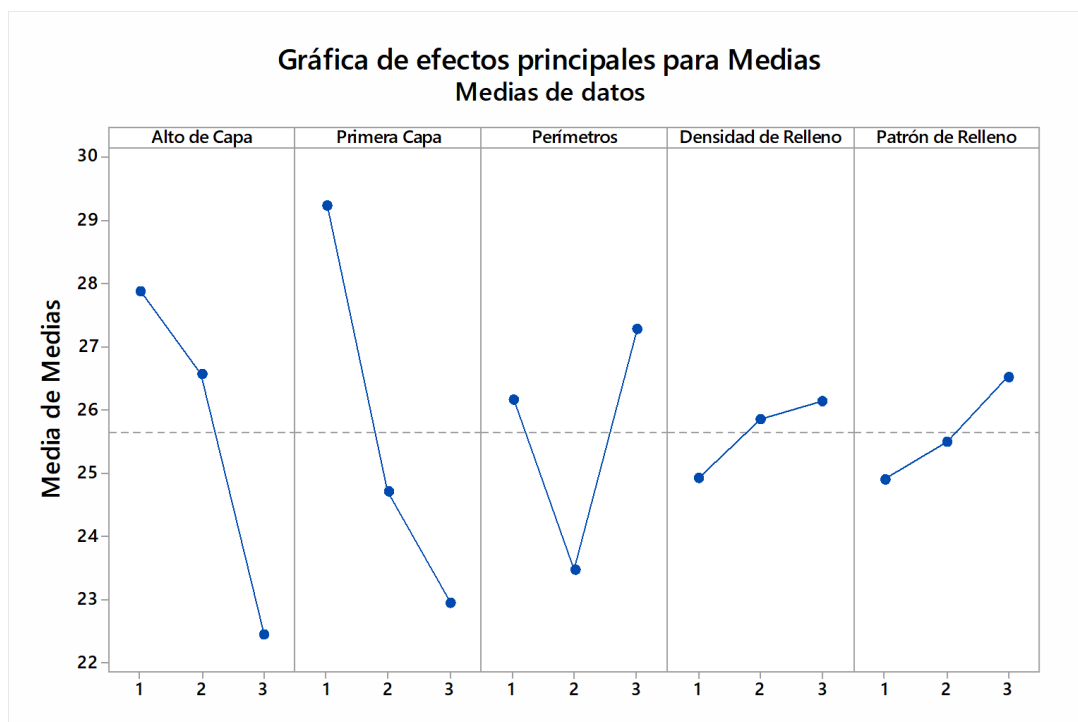


Figura 30 Gráfica de efectos principales para dureza en ABS

Se puede ver en la figura 30 que, según el análisis de medias realizado en el DOE, para tener las mejores propiedades mecánicas de las probetas de ABS se debería imprimir con la configuración descrita en la tabla 19.

Tabla 19

Configuración para fuerza máxima a flexión en ABS con metodología Taguchi

Factor	Nivel óptimo
Alto de capa	1 (0.20 mm)
Alto de primera capa	1 (0.20 mm)
Perímetros	3 (4)
Densidad de relleno	3 (75%)
Patrón de relleno	3 (Diamante)

El diseño predice que esta sería la mejor configuración para obtener las probetas con la mayor resistencia a la flexión, sin embargo, esto en la realidad puede verse afectado por el equipo de trabajo y el método como se realizó el ensayo, ya que el DOE no incluye un análisis de desviación estándar para cada configuración de probetas a ser ensayadas previo a la definición del resultado del esfuerzo.

3.5.2.4 Análisis de interacción de factores para flexión. Material: ABS

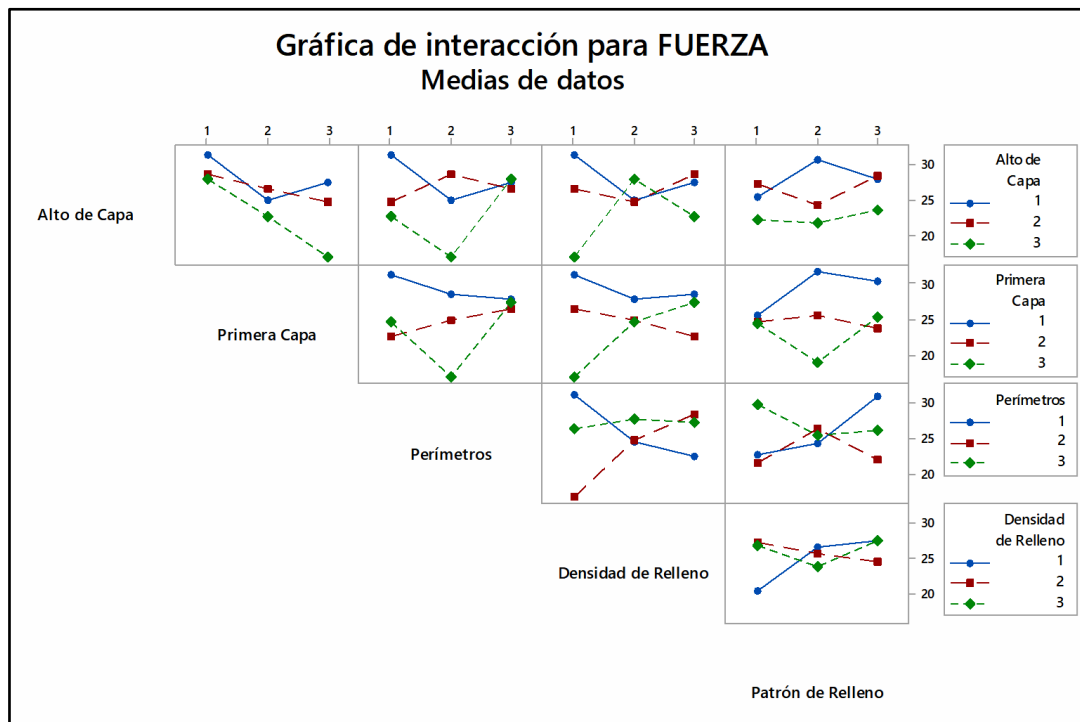


Figura 31 Gráfica de interacción de factores para fuerza en ABS

- **Alto de capa vs Primera capa**

No se encuentra ninguna interacción, pero se tiene una diferencia significativa en el nivel 3 respecto a alto de capa 1 con alto de capa 3.

- **Alto de capa vs Perímetros**

La única integración se da a nivel 1 y 2 de los perímetros respecto al nivel de alto de capa 1 y 2.

- **Alto de capa vs Densidad de relleno**

Existe una interacción fuerte de la capa 3 con las otras capas para los niveles 2 y 3 de la densidad de relleno. Además, existe una diferencia significativa en el nivel 1 de la densidad de relleno, pero no tiene interacción.

- **Alto de capa vs Patrón de relleno**

Solo existe una diferencia significativa a nivel 2 del patrón de relleno.

- **Primera capa vs Perímetros**

No existen interacciones, pero si una diferencia significativa a nivel 2 de perímetros.

- **Primera capa vs Densidad de relleno**

No existe interacción significativa, pero existe una diferencia significativa a nivel 1 de la densidad de relleno.

- **Primera capa vs Patrón de relleno**

No existen interacciones, pero existe una diferencia significativa a nivel 2 del patrón de relleno entre los 3 niveles de primera capa.

- **Perímetros vs Densidad de relleno**

Existe una interacción entre los perímetros 1 y 3 respecto a los niveles 1 y 2 de densidad de relleno.

- **Perímetros vs Patrón de relleno**

Existe una interacción entre perímetros 1 y 2 respecto a los niveles 1 y 2 de patrón de relleno. Además, también existe una diferencia significativa a nivel 1 de patrón de relleno, entre el perímetro 3 con los perímetros 1 y 2

- **Patrón de relleno vs Densidad de relleno**

Existe una diferencia significativa entre la densidad de relleno 2 y 3 con respecto al nivel 1 de patrón de relleno.

3.5.3 Ensayos de flexión en resina

Tabla 20

Registro de fuerza máxima de flexión. Material: Resina

No.	Tiempo curado	Tiempo Post Curado	Fuerza Máxima [N]
1	1	1	28.938
2	1	2	32.204
3	1	3	30.464
4	2	1	27.675
5	2	2	21.637
6	2	3	22.889
7	3	1	30.793
8	3	2	30.793
9	3	3	38.203

3.5.3.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo Curado	2	133.846	66.923	4.94	0.083
Tiempo Post Curado	2	8.091	4.046	0.30	0.757
Error	4	54.165	13.541		
Total	8	196.103			

3.5.3.2 Resumen del modelo

S	R-cuad.
3.67986	72.38%

3.5.3.3 Análisis del modelo

Debido a que el valor más pequeño de p es igual a 0.083 correspondiente al factor tiempo de curado, se evidencia que este factor es el más influyente en la resistencia de la probeta. El valor R-cuad muestra un ajuste del 72.38% de los datos con el modelo experimental.

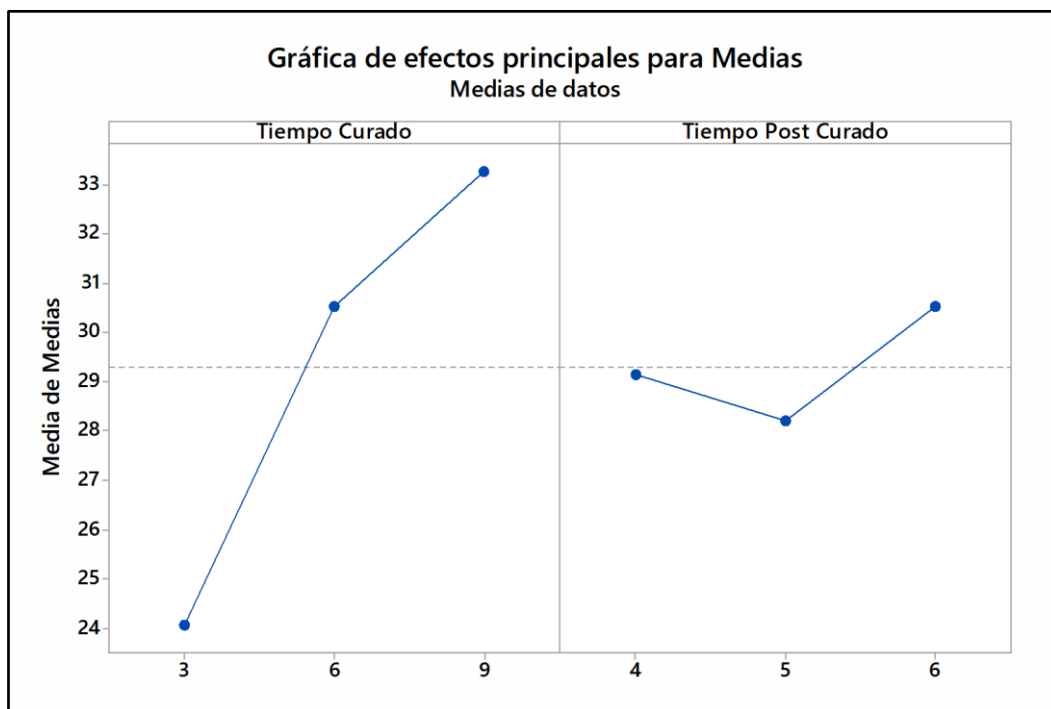


Figura 32 Gráfica de efectos principales para flexión en resina

Se puede ver en la figura 32 que, según el análisis de promedios realizado en el DOE, los valores óptimos reflejados hacia las propiedades mecánicas de las probetas se obtendrían con la configuración descrita en la tabla 21.

Tabla 21

Configuración para fuerza máxima a flexión en resina con metodología Taguchi

Factor	Nivel óptimo
Tiempo de curado	3 (9 s)
Tiempo de post curado	3 (6 s)

El diseño predice que esta sería la mejor configuración para obtener las probetas de resina con la mayor resistencia mecánica a la flexión.

3.5.3.4 Análisis de interacción de factores para flexión. Material: Resina

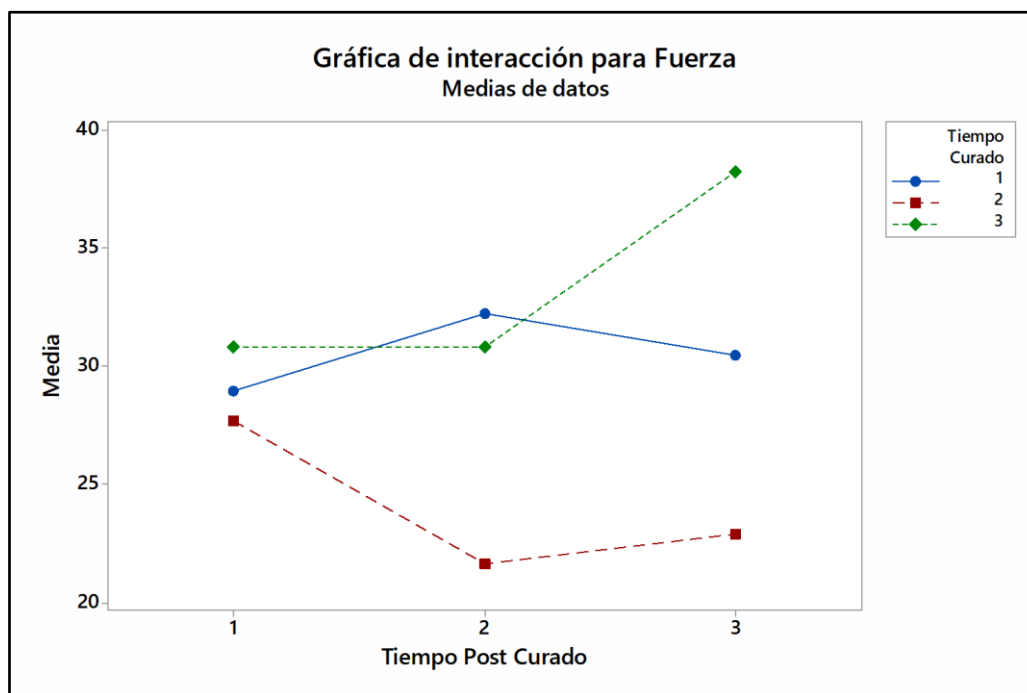


Figura 33 Gráfica de interacción de factores para fuerza en resina

No hay una interacción fuerte respecto a ninguno de los niveles de tiempo de post curado, pero hay una diferencia significativa entre los 3 niveles de tiempo de curado respecto al nivel 3 de tiempo de post curado. A nivel 2 de tiempo de post curado se puede ver una diferencia significativa entre el tiempo de curado 2 con los tiempos de curado 1 y 3.

3.5.4 Ensayo de dureza en PLA

Tabla 22

Registro de dureza máxima en ensayo Shore D. Material: PLA

No.	Alto de capa	Alto primera capa	Número de perímetros	Densidad de relleno	Patrón de relleno	Dureza Shore D
1	1	1	1	1	1	73.00
2	1	1	1	1	2	68.67
3	1	1	1	1	3	66.00
4	1	2	2	2	1	75.67
5	1	2	2	2	2	73.00
6	1	2	2	2	3	71.67
7	1	3	3	3	1	77.33
8	1	3	3	3	2	76.00

Continúa



9	1	3	3	3	3	72.33
10	2	1	2	3	1	78.67
11	2	1	2	3	2	75.00
12	2	1	2	3	3	73.33
13	2	2	3	1	1	66.67
14	2	2	3	1	2	76.67
15	2	2	3	1	3	74.33
16	2	3	1	2	1	69.33
17	2	3	1	2	2	74.67
18	2	3	1	2	3	74.33
19	3	1	3	2	1	73.67
20	3	1	3	2	2	79.67
21	3	1	3	2	3	73.00
22	3	2	1	3	1	74.00
23	3	2	1	3	2	66.67
24	3	2	1	3	3	76.00
25	3	3	2	1	1	74.67
26	3	3	2	1	2	67.00
27	3	3	2	1	3	75.00

3.5.4.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Alto de Capa	2	4.971	2.486	0.16	0.853
Primera Capa	2	2.823	1.412	0.09	0.913
Perímetros	2	45.045	22.523	1.46	0.262
Densidad de Relleno	2	47.959	23.979	1.55	0.242
Patrón de Relleno	2	3.070	1.535	0.10	0.906
Error	16	247.300	15.456		
Total	26	351.169			

3.5.4.2 Resumen del modelo

S R-cuad.
3.93145 29.58%

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	Dureza	Ajuste	Resid	Resid	
			est.		
13	66.67	73.02	-6.36	-2.10	R

Residuo grande R

3.5.4.3 Análisis del modelo

Debido a que el valor más pequeño de p es igual a 0.242 correspondiente al factor densidad de relleno, se evidencia que este factor es el más influyente en la dureza de la probeta. El valor R -cuad muestra un ajuste del 29.58% de los datos con el modelo experimental, con lo cual se tiene un modelo que no se ajusta a los datos de dureza obtenidos.

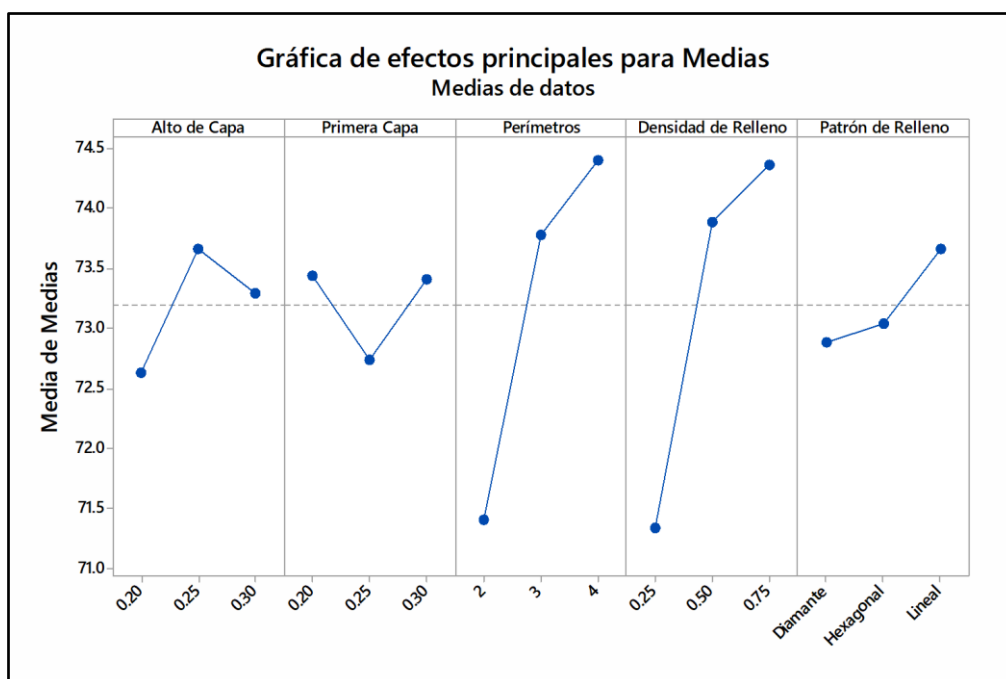


Figura 34 Gráfica de efectos principales para dureza en resina

Se puede ver en la figura 34 que, según el análisis de promedios realizado en el DOE, los valores óptimos reflejados hacia dureza de las probetas se obtendrían con la siguiente configuración de impresión:

Tabla 23

Configuración para máxima dureza en PLA con metodología Taguchi

Factor	Nivel óptimo
Alto de capa	2 (0.25 mm)
Alto de primera capa	1 (0.20 mm)
Perímetros	3 (4)
Densidad de relleno	3 (75%)
Patrón de relleno	3 (Diamante)

El diseño predice que esta sería la mejor configuración para obtener las probetas con la mayor dureza cuando se imprime en PLA.

3.5.4.4 Análisis de interacción de factores para dureza. Material: PLA

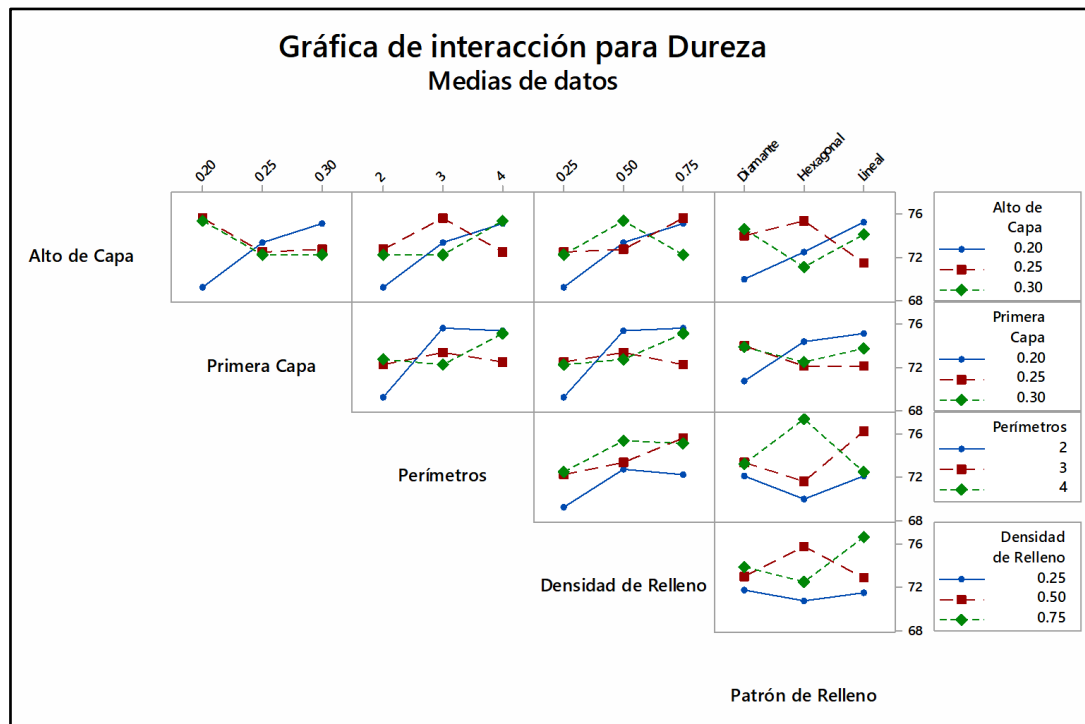


Figura 35 Gráfica de interacción de factores para dureza en PLA

- **Alto de capa vs Primera capa**

En el nivel 2 y 3 de alto de capa con respecto al nivel 1 del mismo factor poseen una interacción fuerte pero no significativa, en los niveles 1 y 2 de primera capa.

- **Alto de capa vs Perímetros**

Se tiene una interacción significativa de los niveles 1 y 3 del alto de capa con respecto al nivel 2 del mismo factor, en los niveles 2 y 3 de perímetros.

- **Alto de capa vs Densidad de relleno**

Se tiene una interacción significativa de los niveles 1 y 2 del alto de capa con respecto al nivel 3 del mismo factor, en los niveles 2 y 3 de perímetros.

- **Alto de capa vs Patrón de relleno**

Se tiene una interacción significativa entre los niveles de alto de capa 2 y 3 con respecto a todos los niveles del patrón de relleno.

- **Primera capa vs Perímetros**

Se tiene una interacción significativa de los niveles 2 y 3 de primera capa con respecto al nivel 1 del mismo factor, en los niveles 1 y 2 de perímetros, siendo esta significativa. Además, existe una interacción fuerte entre 2 y 3 de primera capa en los niveles 2 y 3 de perímetros.

- **Primera capa vs Densidad de relleno**

Se tiene una interacción significativa de los niveles 2 y 3 de primera capa con respecto al nivel 1 del mismo factor, en los niveles 1 y 2 de densidad de relleno, siendo esta significativa. Además, existe una interacción entre 2 y 3 de primera capa en los niveles 2 y 3 de densidad de relleno.

- **Primera capa vs Patrón de relleno**

Se tiene una interacción significativa de los niveles 2 y 3 de primera capa con respecto al nivel 1 del mismo factor, en los niveles 2 y 3 de patrón de relleno, siendo esta significativa.

- **Perímetros vs Densidad de relleno**

Únicamente existe una interacción no significativa en los niveles 2 y 3 de perímetros con respecto a los niveles 2 y 3 de densidad de relleno.

- **Perímetros vs Patrón de relleno**

Se tiene una interacción significativa del nivel 3 y el nivel 2 de perímetros con respecto al nivel 1 y 2 de patrón de relleno.

- **Densidad de relleno vs Patrón de relleno**

Se tiene una interacción significativa de los niveles 2 y 3 de densidad de relleno con respecto a todos los niveles de patrón de relleno.

3.5.5 Ensayo de dureza en ABS

Tabla 24

Registro de dureza máxima en ensayo Shore D. Material: ABS

No.	Alto de capa	Alto primera capa	Número de perímetros	Densidad de relleno	Patrón de relleno	Dureza Shore D
1	1	1	1	1	1	61.00
2	1	1	1	1	2	72.67
3	1	1	1	1	3	75.00
4	1	2	2	2	1	62.33

Continúa



5	1	2	2	2	2	69.33
6	1	2	2	2	3	62.67
7	1	3	3	3	1	68.33
8	1	3	3	3	2	67.67
9	1	3	3	3	3	66.67
10	2	1	2	3	1	70.00
11	2	1	2	3	2	67.00
12	2	1	2	3	3	71.00
13	2	2	3	1	1	61.67
14	2	2	3	1	2	60.00
15	2	2	3	1	3	65.00
16	2	3	1	2	1	64.00
17	2	3	1	2	2	64.00
18	2	3	1	2	3	69.67
19	3	1	3	2	1	68.00
20	3	1	3	2	2	70.00
21	3	1	3	2	3	64.67
22	3	2	1	3	1	57.33
23	3	2	1	3	2	63.00
24	3	2	1	3	3	65.33
25	3	3	2	1	1	62.33
26	3	3	2	1	2	66.67
27	3	3	2	1	3	66.33

3.5.5.1 Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Alto de Capa	2	27.292	13.6461	1.17	0.336
Primera Capa	2	154.626	77.3128	6.63	0.008
Perímetros	2	2.379	1.1893	0.10	0.904
Densidad de Relleno	2	1.885	0.9424	0.08	0.923
Patrón de Relleno	2	61.465	30.7325	2.63	0.103
Error	16	186.683	11.6677		
Total	26	434.329			

3.5.5.2 Resumen del modelo

S R-cuad.
3.41580 57.02%

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	Dureza	Ajuste	Resid	Resid	est.
1	61.00	67.46	-6.46	-2.46	R

Residuo grande R

3.5.5.3 Análisis del modelo

Debido a que el valor más pequeño de p es igual a 0.008 correspondiente al factor primera capa, se evidencia que este factor es el más influyente en la dureza de la probeta. El valor R -cuad muestra un ajuste del 57.02% de los datos con el modelo experimental, con lo cual se tiene un modelo que no se ajusta a los datos de dureza obtenidos.

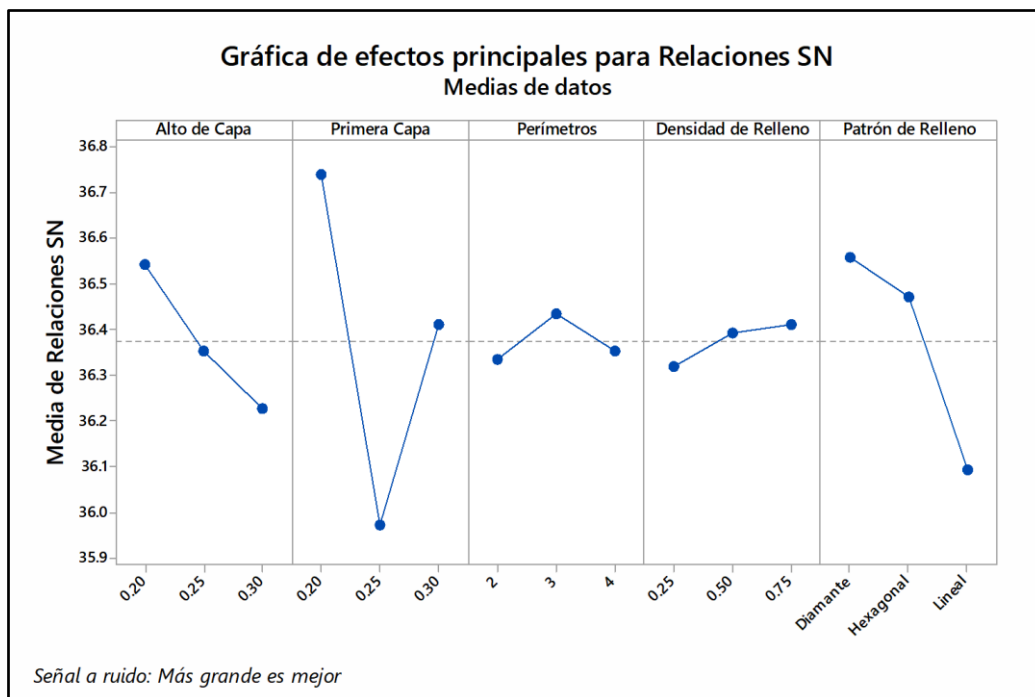


Figura 36 Gráfica de efectos principales para dureza en ABS

Se puede ver en la figura 36 que, según el análisis de promedios realizado en el DOE, los valores óptimos reflejados hacia dureza de las probetas se obtendrían con la configuración descrita en la tabla 25.

Tabla 25

Configuración para máxima dureza en ABS con metodología Taguchi

Factor	Nivel óptimo
Alto de capa	1 (0.20 mm)
Alto de primera capa	1 (0.20 mm)
Perímetros	2(3)
Densidad de relleno	3 (75%)
Patrón de relleno	1 (Lineal)

El diseño predice que esta sería la mejor configuración para obtener las probetas con la mayor dureza cuando se imprime en ABS.

3.5.5.4 Análisis de interacción de factores para Dureza. Material: ABS

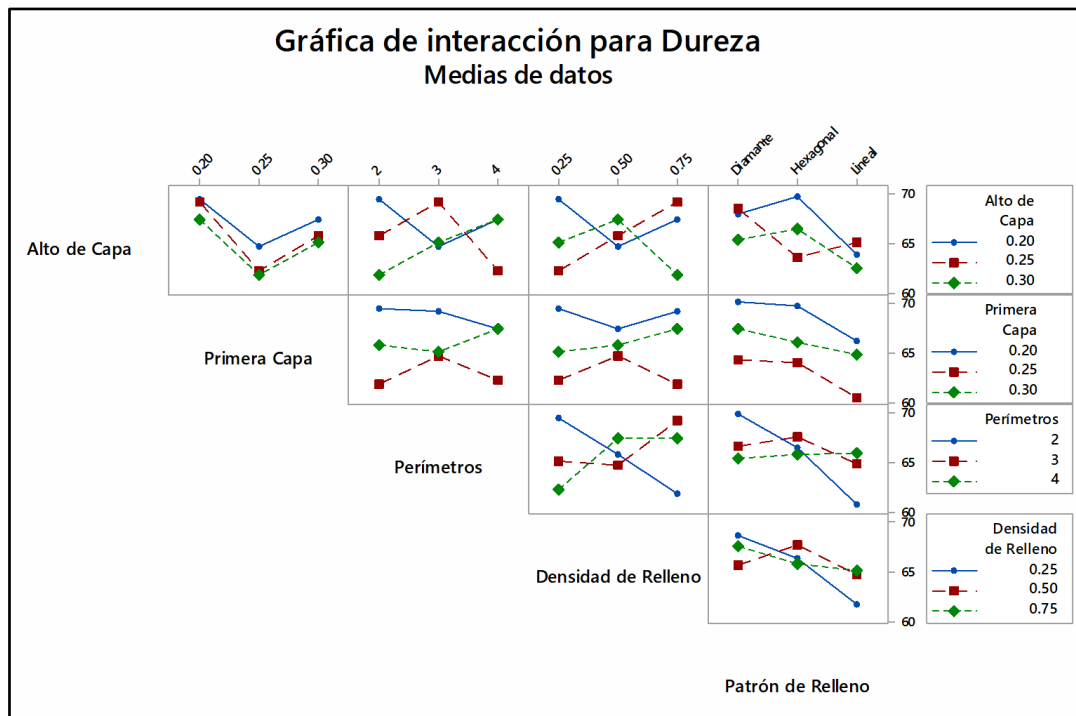


Figura 37 Gráfica de interacción de factores para dureza en ABS

- **Alto de capa vs Primera capa**

No se tiene ninguna interacción en ningún nivel, tanto en alto de capa como en primera capa.

- **Alto de capa vs Perímetros**

Se tiene una interacción significativa del nivel 1 del alto de capa con respecto al nivel 2 del mismo factor, en los tres niveles de perímetros.

- **Alto de capa vs Densidad de relleno**

Se tiene una interacción significativa de los niveles 2 y 3 del alto de capa con respecto al nivel 1 del mismo factor, en los niveles 1 y 2 de densidad de relleno; también se tiene una interacción significativa del nivel 3 con respecto al nivel 1 de alto de capa en los niveles 2 y 3 de densidad de relleno.

- **Alto de capa vs Patrón de relleno**

Se tiene una interacción significativa entre los niveles de alto de capa 2 y 3 con respecto a todos los niveles del patrón de relleno.

- **Primera capa vs Perímetros**

No se tiene ninguna interacción en ningún nivel, tanto en primera capa como en perímetros.

- **Primera capa vs Densidad de relleno**

No se tiene ninguna interacción en ningún nivel, tanto en primera capa como en densidad de relleno

- **Primera capa vs Patrón de relleno**

No se tiene ninguna interacción en ningún nivel, tanto en primera capa como en patrón de relleno.

- **Perímetros vs Densidad de relleno**

Se tiene una interacción significativa del nivel 2 y el nivel 3 de perímetros con respecto a los niveles de densidad de relleno.

- **Perímetros vs Patrón de relleno**

Se tiene una interacción significativa del nivel 1 y el nivel 2 de perímetros con respecto al nivel 2 y 3 de patrón de relleno; además se tiene una interacción significativa del nivel 2 y el nivel 3 de perímetros con respecto al nivel 1 y 2 de patrón de relleno

- **Densidad de relleno vs Patrón de relleno**

Se tiene una interacción de los niveles 2 y 3 de densidad de relleno con respecto a todos los niveles de patrón de relleno.

3.5.6 Ensayo de dureza en resina

Tabla 26

Registro de dureza máxima en ensayo Shore D. Material: Resina

N°	Tiempo curado	Tiempo Post Curado	Dureza
1	1	1	76.00
2	1	2	71.00
3	1	3	74.67
4	2	1	73.67
5	2	2	74.33
6	2	3	73.67
7	3	1	79.33
8	3	2	79.67
9	3	3	81.67

3.5.6.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo Curado	2	80.222	40.111	13.13	0.017
Tiempo Post Curado	2	4.680	2.340	0.77	0.523
Error	4	12.220	3.055		
Total	8	97.122			

3.5.6.2 Resumen del modelo

S R-cuad.
1.74786 87.42%

3.5.6.3 Análisis del modelo

Debido a que el valor más pequeño de p es igual a 0.017 correspondiente al factor tiempo curado, se evidencia que este factor es el más influyente en la dureza de la probeta. El valor R-cuad muestra un ajuste del 87.42% de los datos con el modelo experimental.

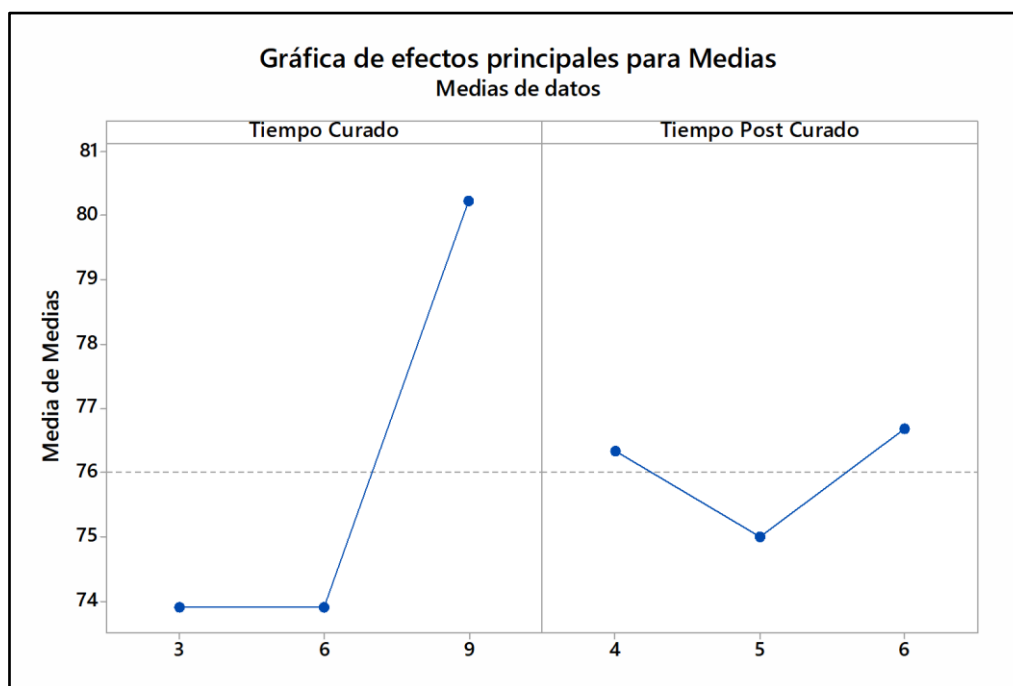


Figura 38 Gráfica de efectos principales para dureza en resina

Se puede ver en la figura 38 que, según el análisis de promedios realizado en el DOE, los valores más óptimos reflejados hacia dureza de las probetas se obtendría con la configuración descrita en la tabla 27:

Tabla 27

Configuración para máxima dureza en resina con metodología Taguchi

Factor	Nivel óptimo
Tiempo de curado	3 (9 s)
Tiempo post curado	3 (6 s)

El diseño predice que esta sería la mejor configuración para obtener las probetas con la mayor dureza cuando se imprime en resina.

3.5.6.4 Análisis de interacción de factores para Dureza. Material: Resina

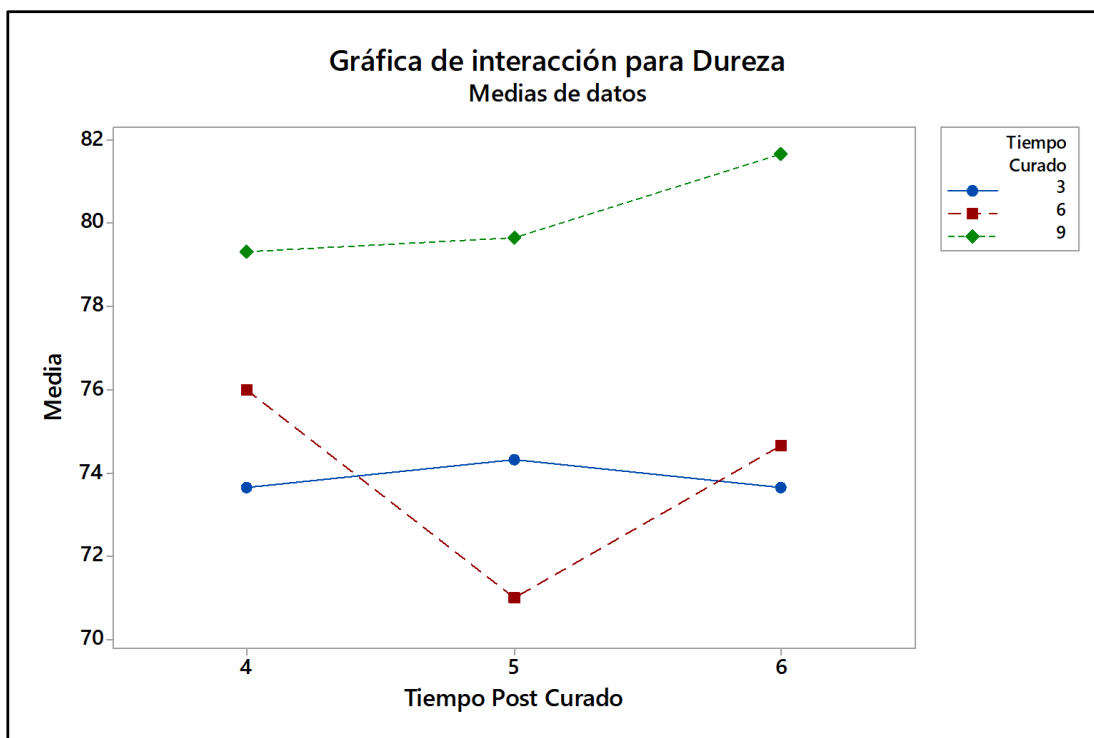


Figura 39 Gráfica de interacción de factores para dureza en resina

Se tiene una interacción significativa del nivel 1 y el nivel 2 de tiempo de curado con respecto a todos los niveles de tiempo post curado.

3.6 Metodología de Superficie de Respuesta

3.6.1 Ensayo de flexión en PLA

Los datos que se analizaron son los mismos datos del arreglo L27(3)5 de la metodología Taguchi, los mismos que se encuentran en la tabla 15.

3.6.1.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	18	2680.21	148.900	2.82	0.069
Lineal	6	990.08	165.013	3.13	0.070
Alto de Capa	1	12.20	12.202	0.23	0.644
Primera Capa	1	62.16	62.161	1.18	0.309
Perímetros	1	14.36	14.356	0.27	0.616
Densidad de Relleno	1	672.55	672.552	12.74	0.007
Patrón de Relleno	2	228.80	114.402	2.17	0.177
Cuadrado	4	553.96	138.490	2.62	0.114
Alto de Capa*Alto de Capa	1	60.13	60.133	1.14	0.317
Primera Capa*Primera Capa	1	44.56	44.557	0.84	0.385
Perímetros*Perímetros	1	425.28	425.283	8.06	0.022
Densidad*Densidad	1	23.99	23.985	0.45	0.519
Interacción de 2 factores	8	1136.17	142.022	2.69	0.092
Alto de Capa*Patrón	2	268.86	134.432	2.55	0.139
Primera Capa*Patrón	2	10.98	5.490	0.10	0.902
Perímetros*Patrón	2	638.81	319.405	6.05	0.025
Densidad*Patrón	2	217.52	108.759	2.06	0.190
Error	8	422.25	52.781		
Total	26	3102.45			

3.6.1.2 Resumen del modelo

S	R-cuad.
7.26503	86.39%

3.6.1.3 Análisis del modelo

El mejor ajuste que se obtiene es del 86.39% cuando el término elegido, en el software estadístico, es el cuadrático completo. En este caso se consideran todos los modelos posibles, los cuales son:

- Lineal
- Cuadrado
- Interacción de 2 factores

3.6.1.4 Análisis de superficies y contornos

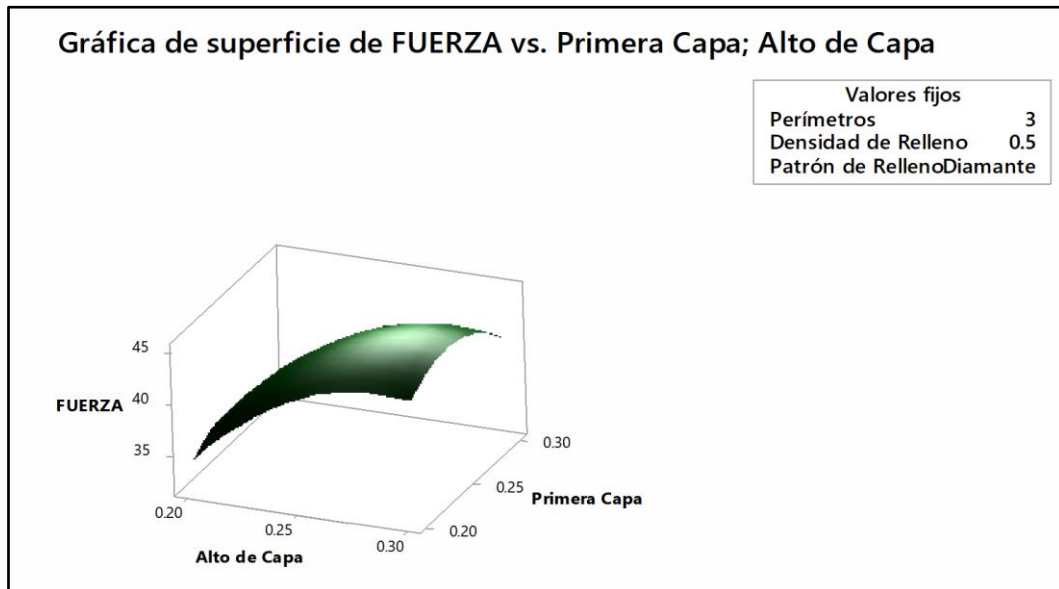


Figura 40 Gráfica de superficie. Primera capa vs alto de capa en PLA

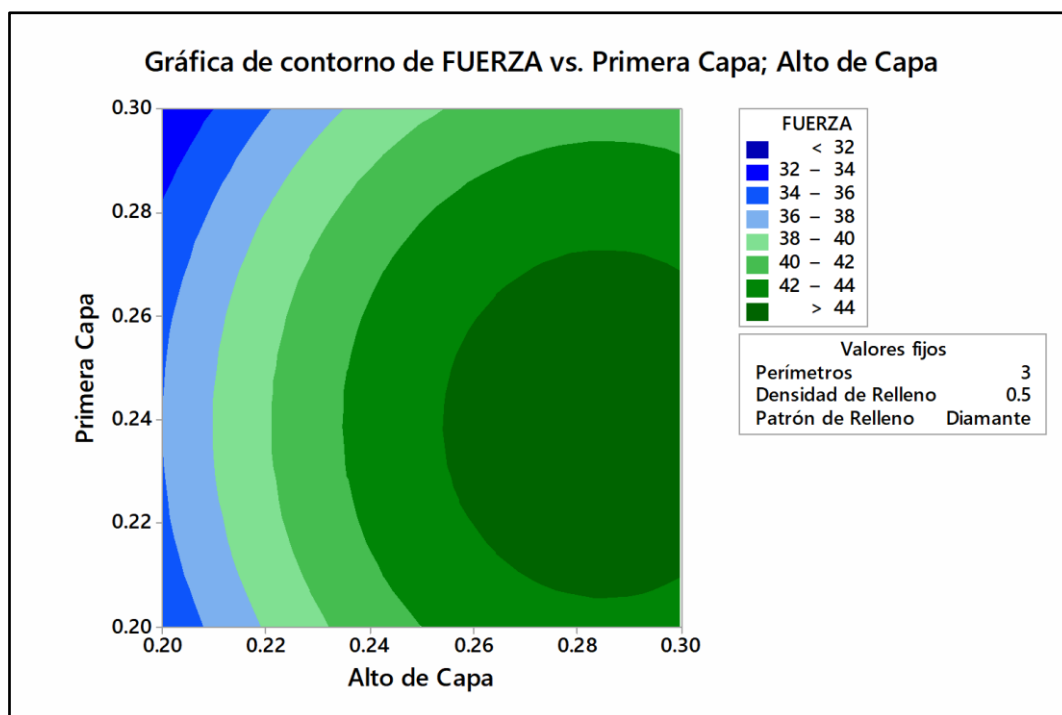


Figura 41 Gráfica de contorno. Primera capa vs alto de capa en PLA

- **Primera capa vs alto de capa**

Al examinar las figuras 40 y 41 resulta evidente que la superficie donde se encuentra la máxima fuerza está comprendida por el rango de primera capa, entre 0.21 y 0.27 mm, y el alto de capa entre 0.26 y 0.30mm. Además, al examinar la figura

41 se observa que el proceso puede ser más sensible a los cambios del alto de capa, que a los cambios de la primera capa.

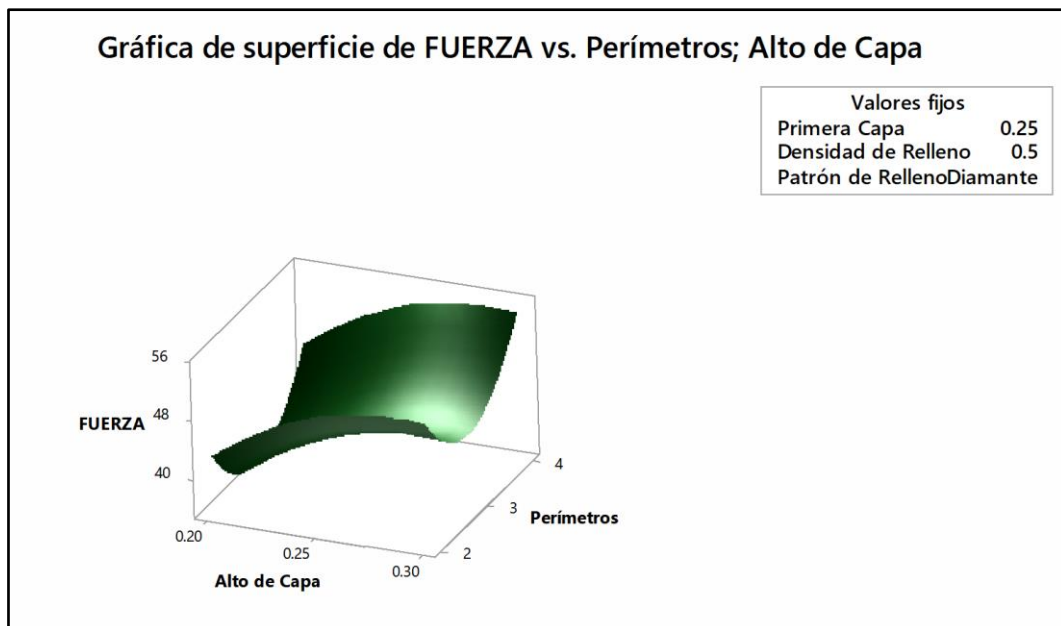


Figura 42 Gráfica de superficie. Perímetros vs alto de capa en PLA

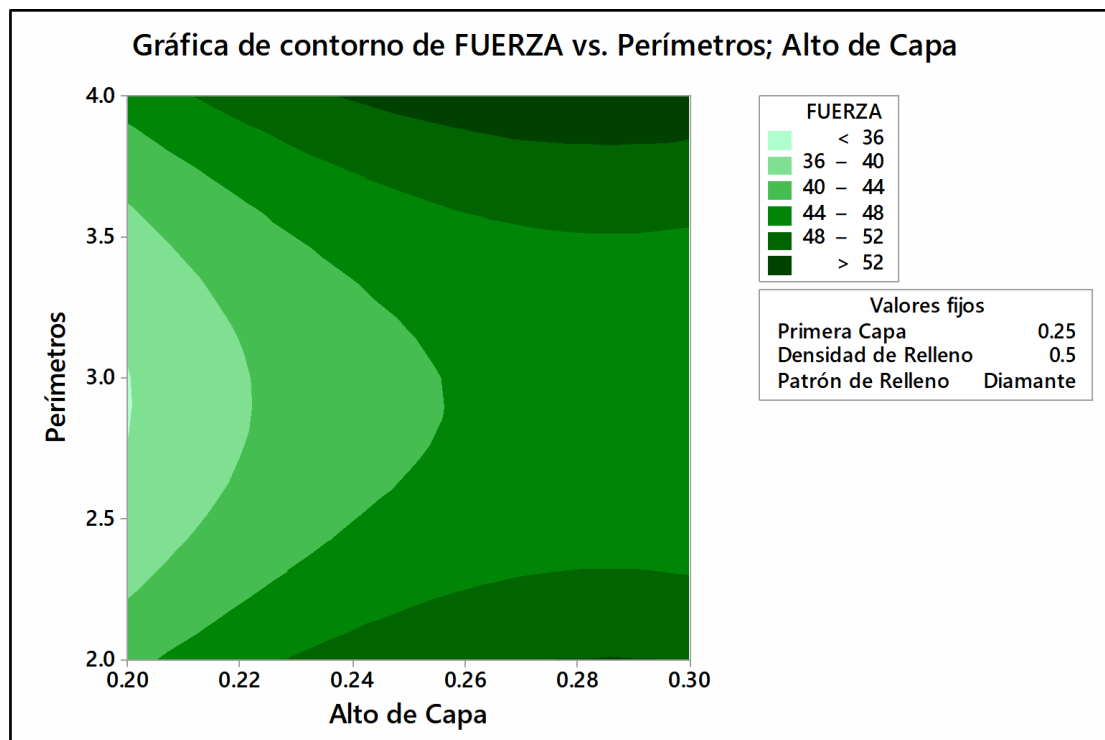


Figura 43 Gráfica de contorno. Perímetros vs alto de capa en PLA

- **Perímetros vs alto de capa**

Al examinar las figuras 42 y 43 resulta evidente que la superficie donde se encuentra la máxima fuerza está comprendida por el rango de alto de capa, entre 0.28

y 0.30 mm, y valor de 4 perímetros. Además, al examinar la gráfica de la figura 43 se observa que no hay una sensibilidad considerable entre los factores.

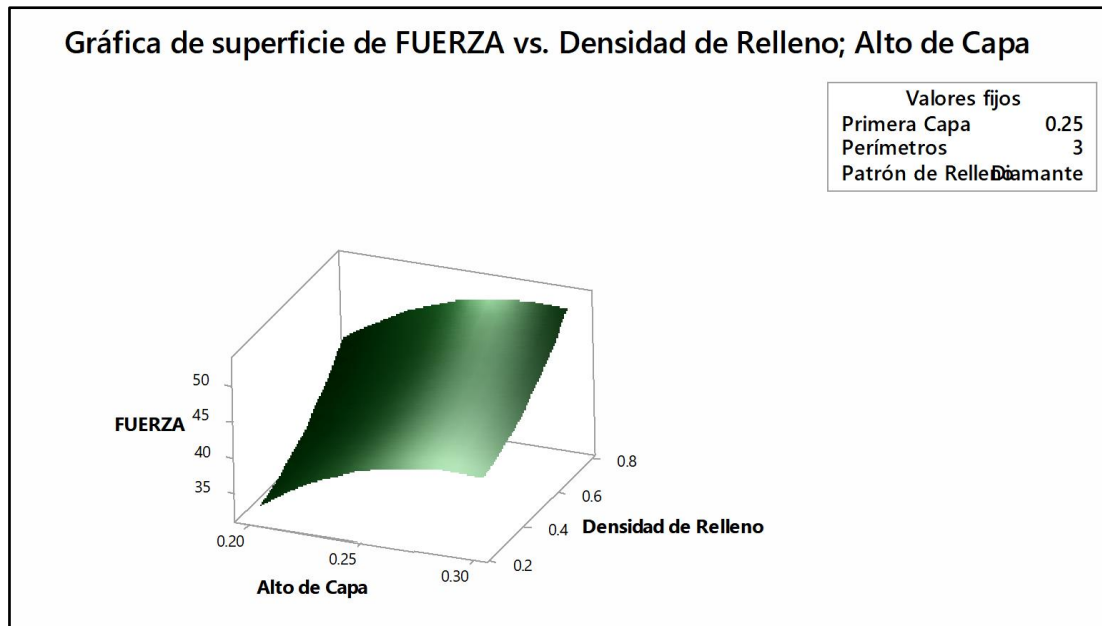


Figura 44 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs alto de capa en PLA.

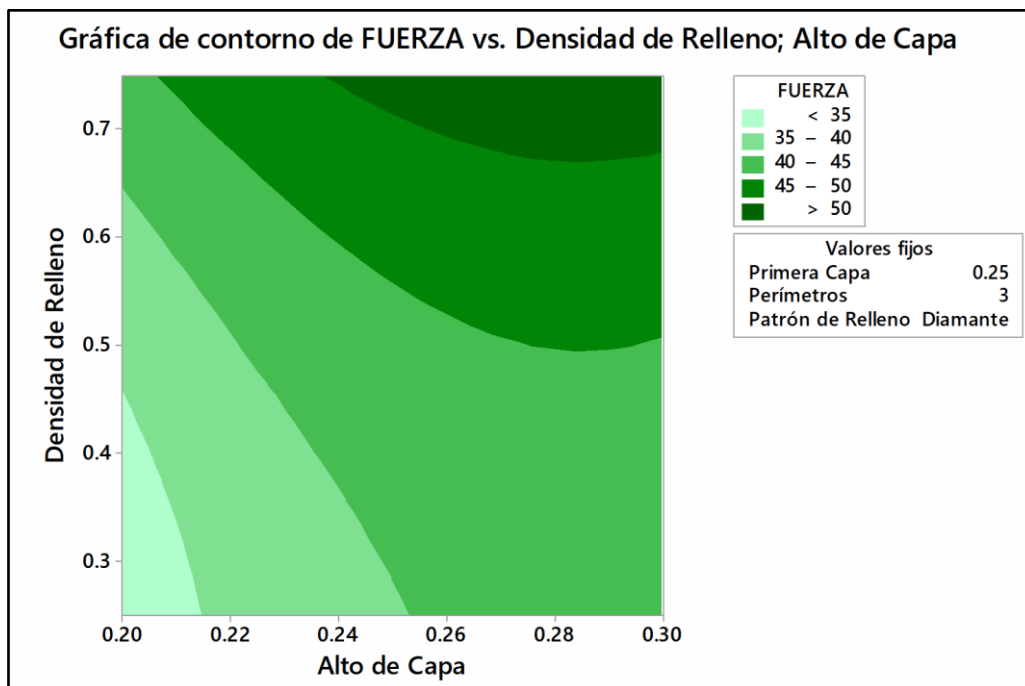


Figura 45 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs alto de capa en PLA.

- **Densidad de relleno vs alto de capa**

Al examinar las figuras 44 y 45 resulta evidente se obtiene la máxima fuerza a medida que la densidad de relleno aumenta y en este caso el alto de capa no es

relevante. Además, al examinar la gráfica de la figura 45 se observa que no hay una sensibilidad tan significativa entre los factores.

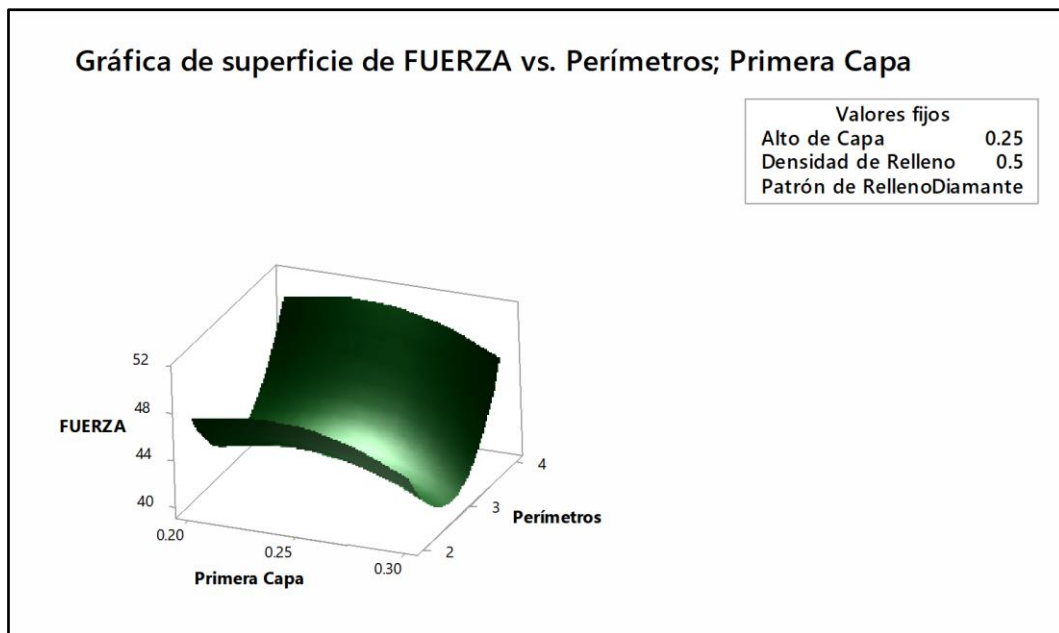


Figura 46 Gráfica de superficie. Perímetros vs primera capa en PLA.

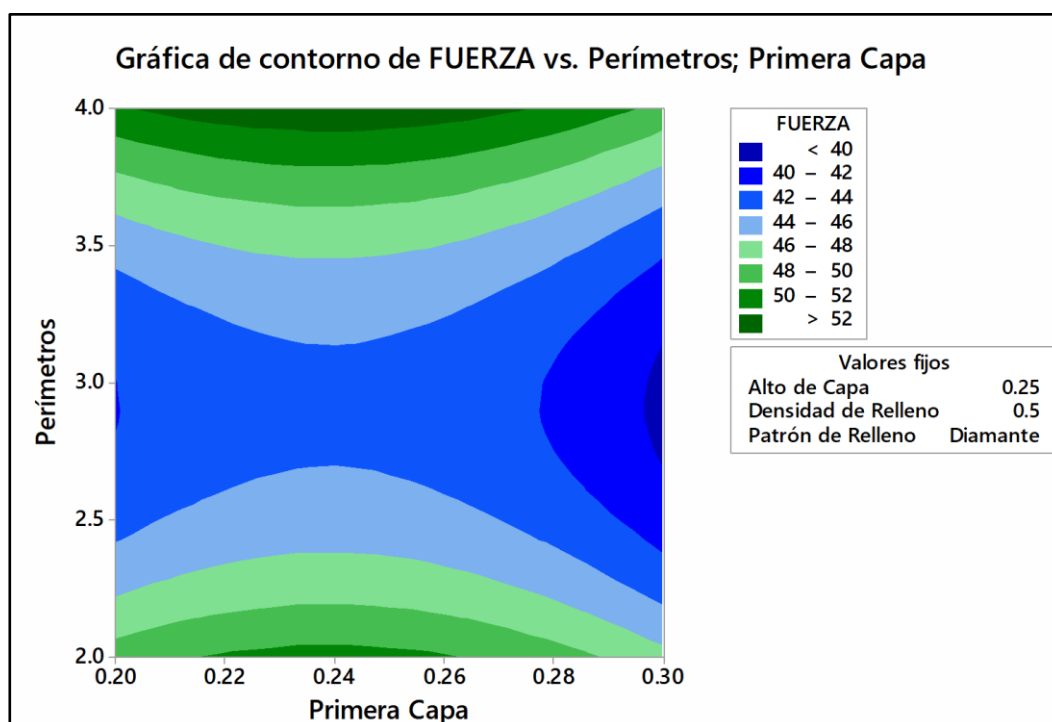


Figura 47 Gráfica de contorno. Perímetros vs primera capa en PLA.

- **Perímetros vs primera capa**

Al examinar las figuras 46 y 47 resulta evidente que el punto donde se encuentra la máxima fuerza está corresponde al valor de 4 perímetros y aproximadamente 0.24

mm el valor de la primera capa. Además, al examinar la figura 47, se observa que existe una sensibilidad muy considerable al cambio del número de perímetros.

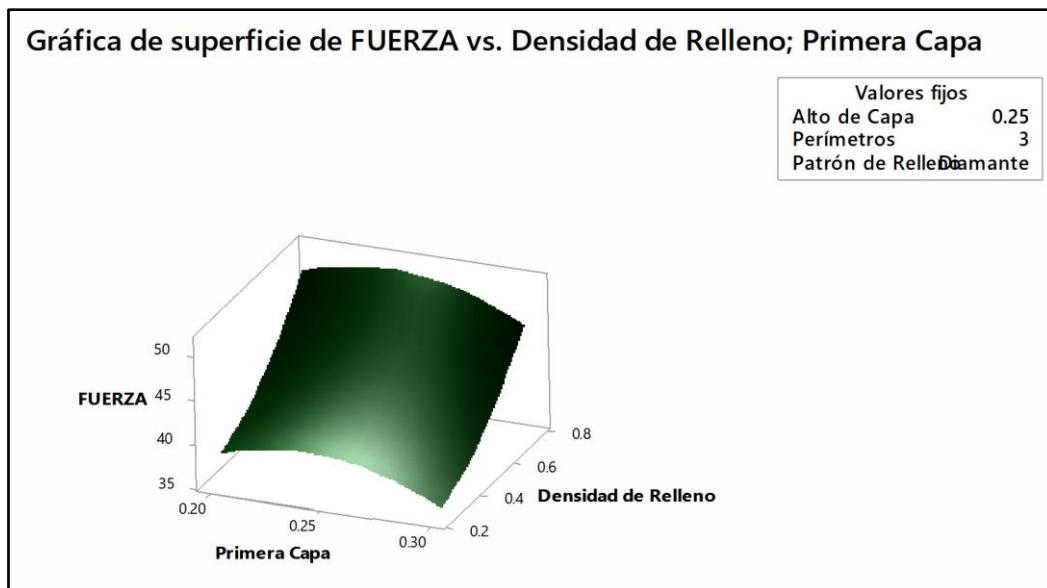


Figura 48 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs primera capa en PLA

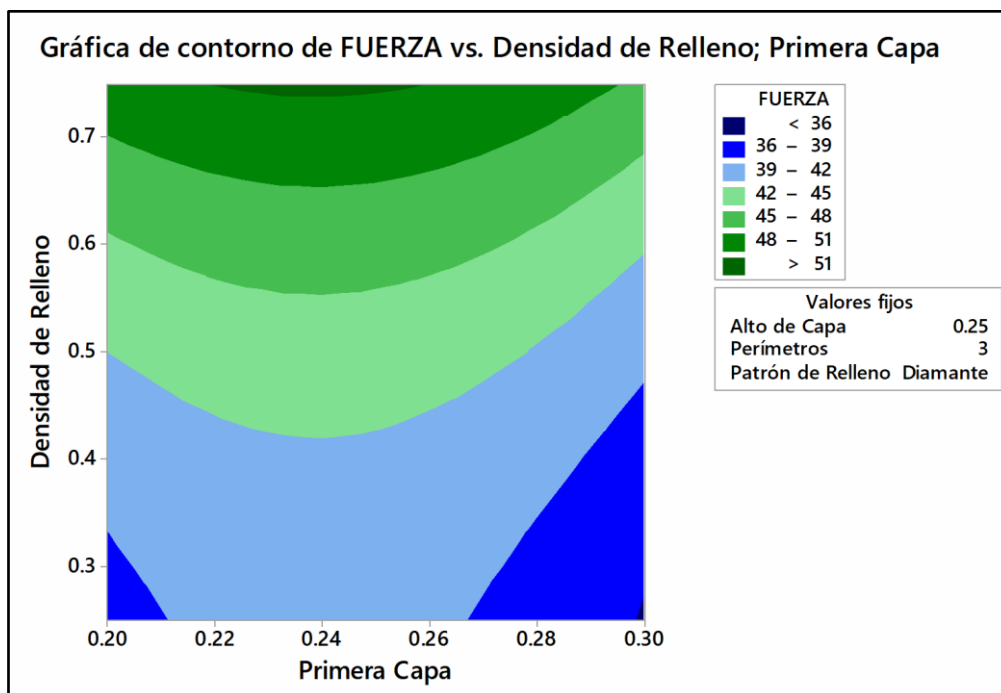


Figura 49 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs primera capa en PLA.

- **Densidad de relleno vs primera capa**

Al examinar las figuras 48 y 49 resulta evidente que la superficie donde se maximiza la fuerza se encuentra en el punto de mayor densidad de relleno (75%) y un valor de

0.24 mm de la primera capa. Además, al examinar la figura 49 se puede ver la alta sensibilidad de la densidad de relleno.

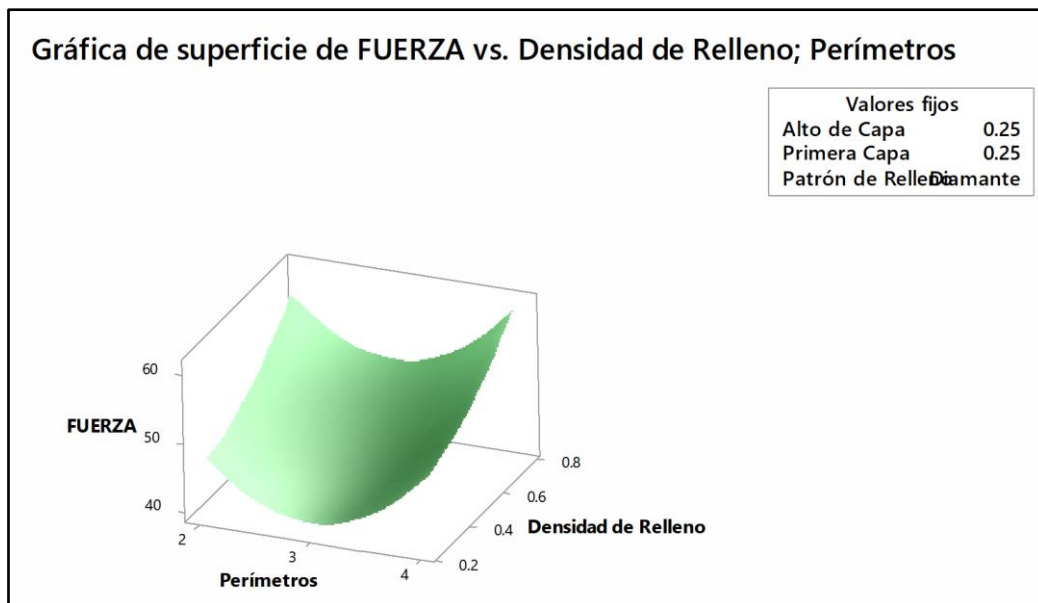


Figura 50 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs perímetros en PLA.

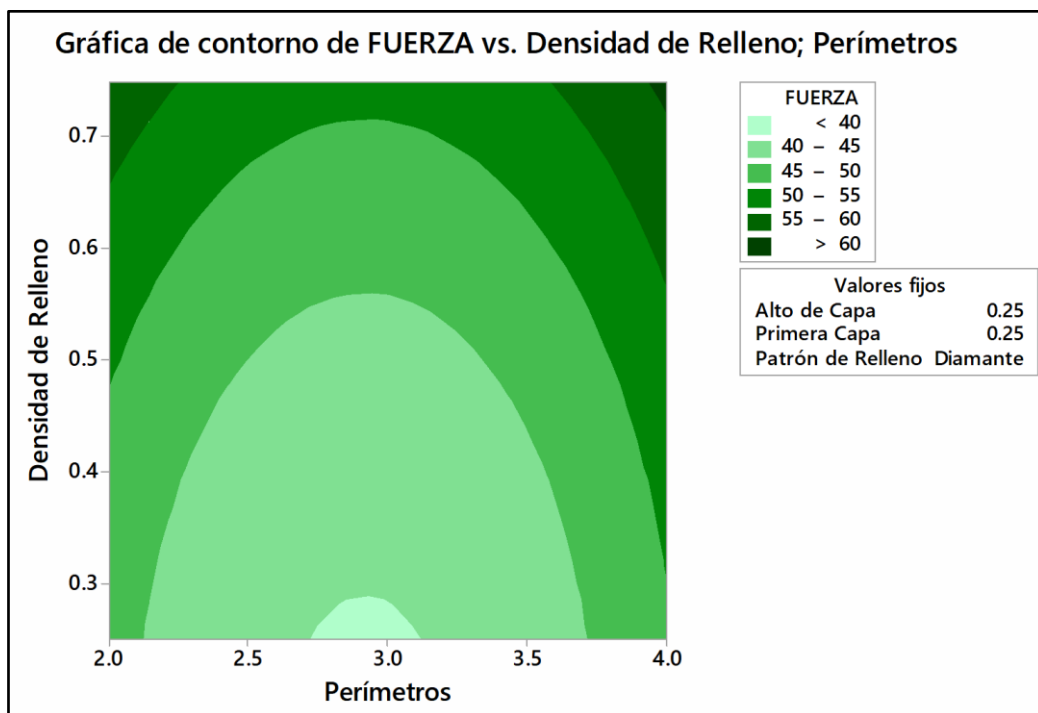


Figura 51 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs perímetros en PLA.

- **Densidad de relleno vs perímetros**

Al examinar las figuras 50 y 51 resulta evidente que la superficie donde se maximiza la fuerza se encuentra en el punto de mayor densidad de relleno (75%) y para los valores de 2 y 4 perímetros. Además, al examinar figura 51 se puede ver la alta

sensibilidad que presenta la densidad de relleno, principalmente para los valores de 2 y 4 perímetros.

3.4.1.5 Predicción de optimización

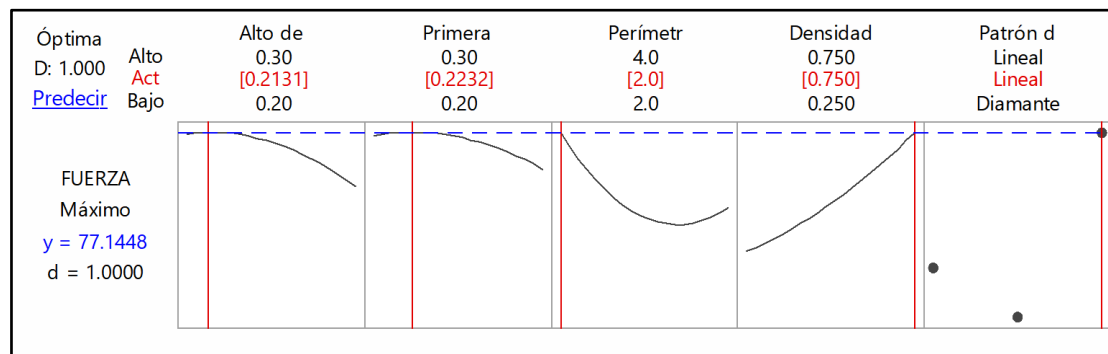


Figura 52 Gráfica de optimización de flexión en PLA con RSM

Se puede ver en la figura 52 que los valores óptimos para obtener la mayor resistencia a la flexión en las probetas de PLA, se obtendría con la siguiente configuración de impresión:

Tabla 28

Configuración para fuerza máxima en PLA

Factor	Valor óptimo
Alto de capa	0.213 mm
Alto de primera capa	0.223 mm
Perímetros	2
Densidad de relleno	75%
Patrón de relleno	Lineal

3.6.2 Ensayo de flexión en ABS

3.6.2.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	18	725.952	40.331	1.90	0.179
Lineal	6	333.883	55.647	2.62	0.104
Alto de Capa	1	132.894	132.894	6.25	0.037
Primera Capa	1	176.670	176.670	8.31	0.020
Perímetros	1	5.590	5.590	0.26	0.622

Densidad de	1	6.598	6.598	0.31	0.593
Patrón de Relleno	2	12.131	6.066	0.29	0.759
Cuadrado	4	87.262	21.816	1.03	0.450
Alto de Capa*Alto de Capa	1	11.791	11.791	0.55	0.478
Primera Capa*Primera Capa	1	11.493	11.493	0.54	0.483
Perímetros*Perímetros	1	63.343	63.343	2.98	0.123
Densidad*Densidad	1	0.636	0.636	0.03	0.867
Interacción de 2 factores	8	304.807	38.101	1.79	0.213
Alto de Capa*Patrón	2	28.995	14.497	0.68	0.533
Primera Capa*Patrón	2	104.597	52.298	2.46	0.147
Perímetros*Patrón	2	103.725	51.863	2.44	0.149
Densidad*Patrón	2	67.490	33.745	1.59	0.263
Error	8	170.054	21.257		
Total	26	896.006			

3.6.2.2 Resumen del modelo

S	R-cuad.
4.61050	81.02%

3.6.2.3 Análisis del modelo

El mejor ajuste que se obtiene es del 81.02% cuando el término elegido, en el software estadístico, es el cuadrático completo. En este caso se consideran todos los modelos posibles, los cuales son:

- Lineal
- Cuadrado
- Interacción de 2 factores

3.6.2.4 Análisis de superficies y contornos

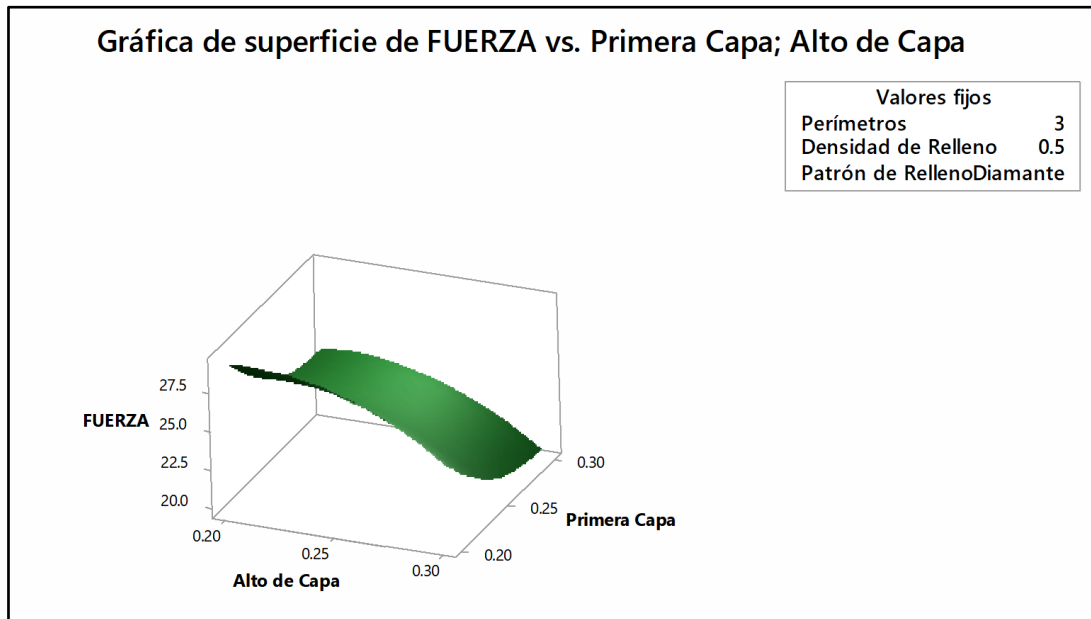


Figura 53 Gráfica de superficie. Primera capa vs alto de capa en ABS

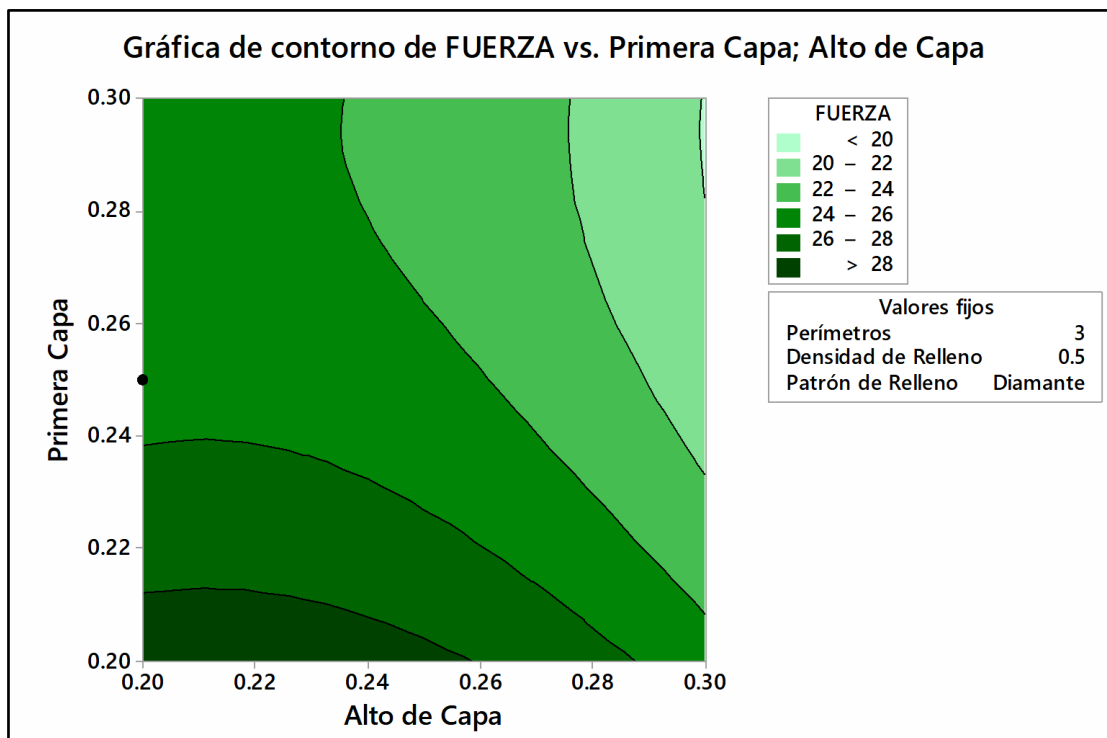


Figura 54 Gráfica de contorno. Primera capa vs alto de capa en ABS

- **Primera capa vs alto de capa**

Al examinar las figuras 53 y 54 resulta evidente que el punto óptimo es muy cercano a primera capa de 0.20mm y alto de capa 0.20 mm, y que la respuesta es máxima en

este punto. Además, al examinar la figura 54, se observa que el proceso puede ser sensible a los cambios de la primera capa que a los cambios de el alto de capa.

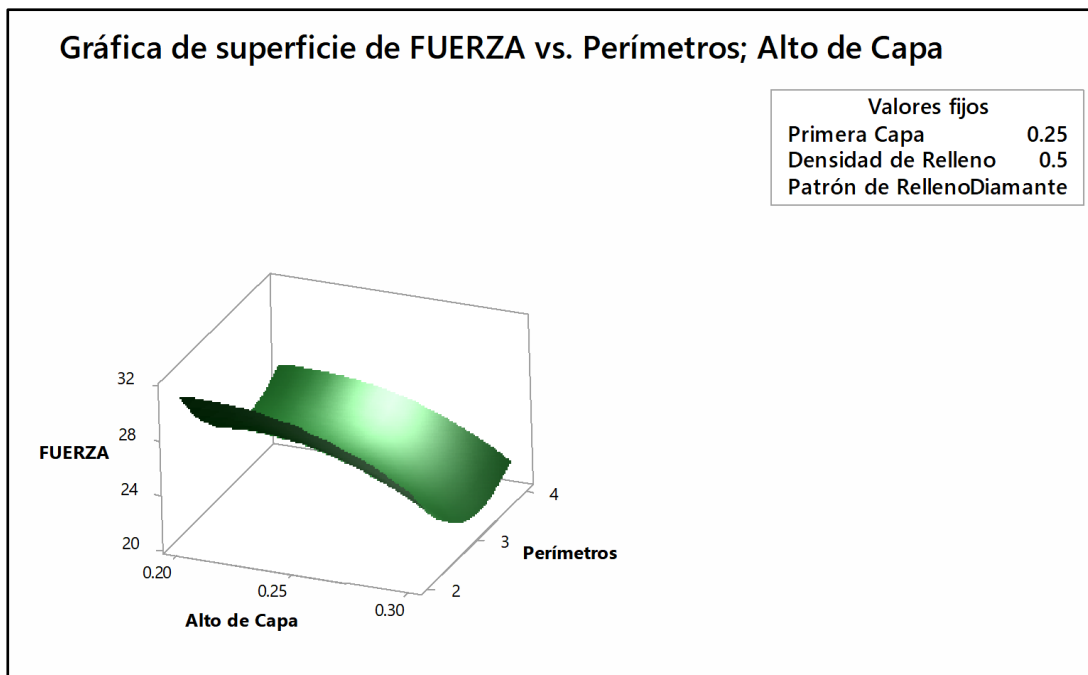


Figura 55 Gráfica de superficie. Perímetros vs alto de capa en ABS

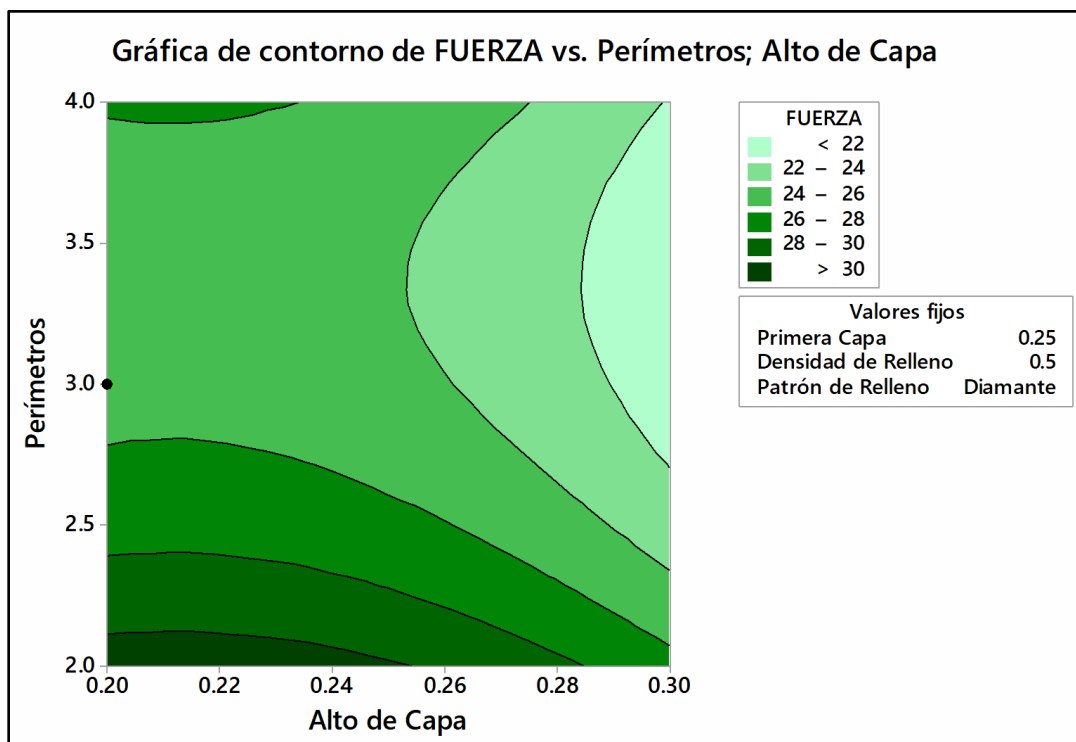


Figura 56 Gráfica de contorno. Perímetros vs alto de capa en ABS

- **Perímetros vs alto de capa**

Al examinar las figuras 55 y 56 resulta evidente que el punto donde se maximiza la fuerza es muy cercano al del alto de capa de 0.20mm y un valor de 2 perímetros. Además, al examinar la figura 56, se observa que el proceso puede ser sensible a los cambios de perímetros.

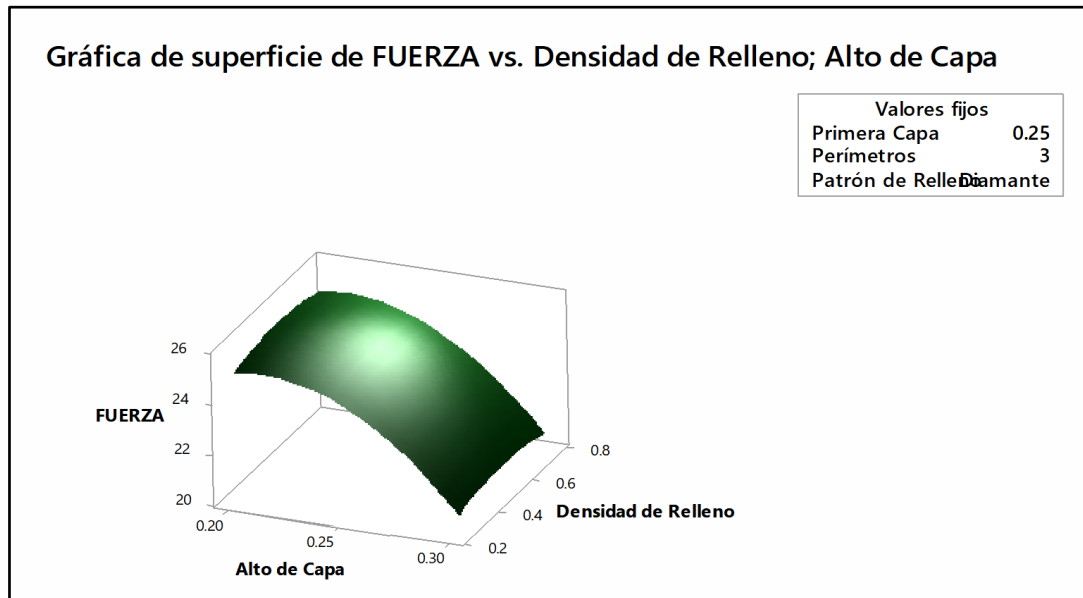


Figura 57 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs alto de capa en ABS

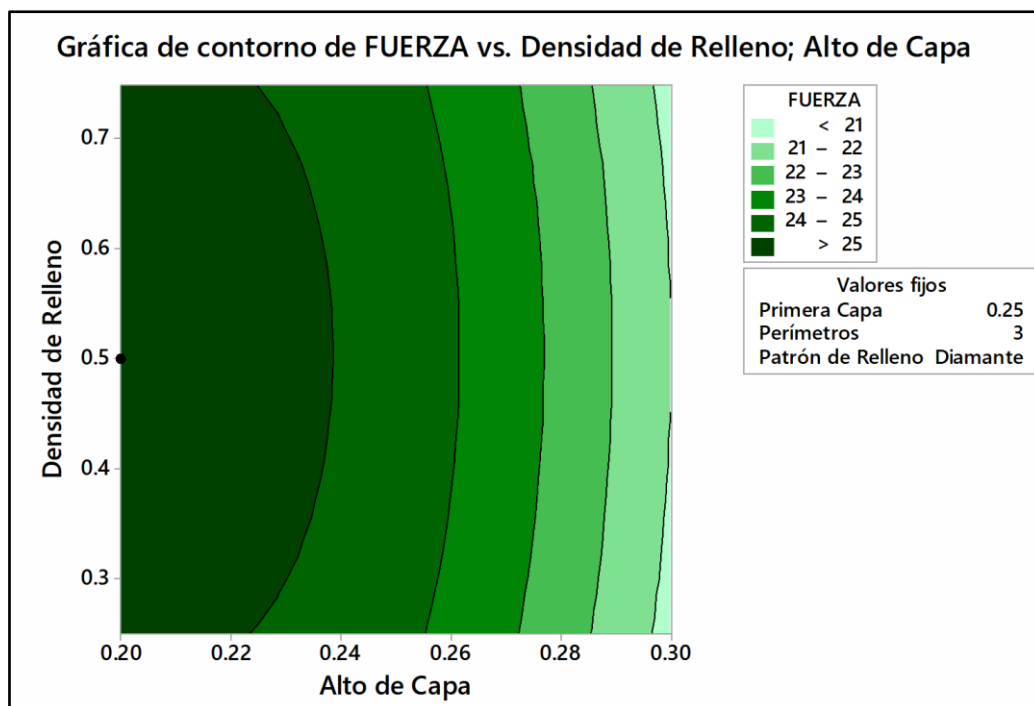


Figura 58 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs alto de capa en ABS

- **Densidad de relleno vs alto de capa**

Al examinar las figuras 57 y 58 resulta evidente que la superficie donde se maximiza la fuerza se encuentra en el rango del alto de capa entre 0.20 y 0.24 mm y un valor de 75% de densidad de relleno o superior. Además, al examinar la figura 58, se observa que el proceso es altamente sensible al cambio del alto de capa.

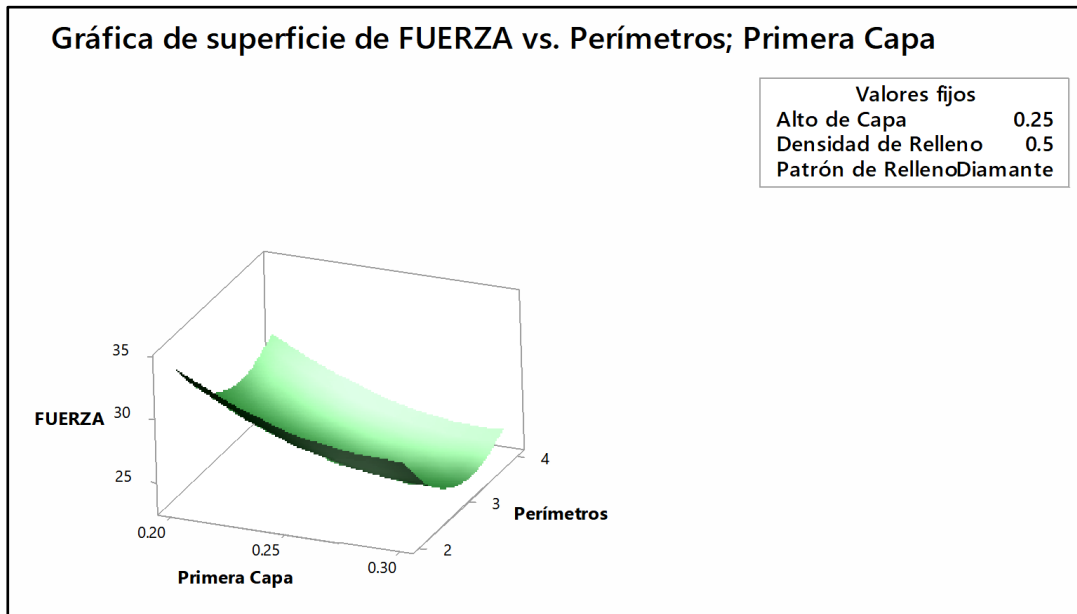


Figura 59 Gráfica de superficie. Perímetros vs primera capa en ABS

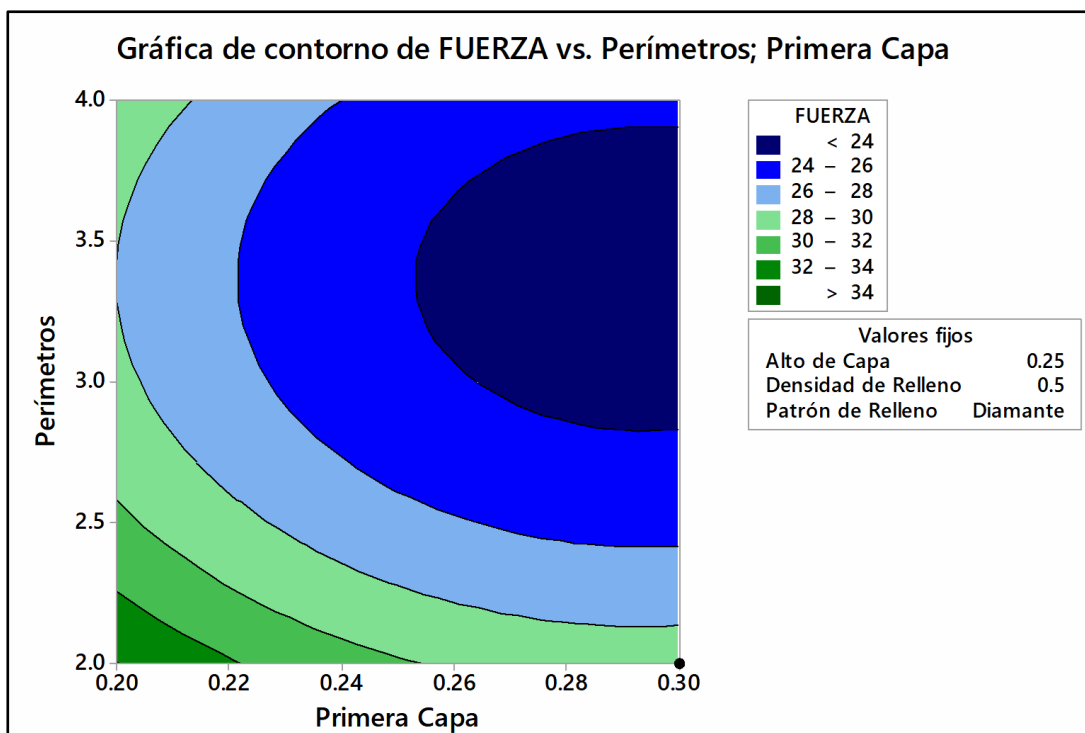


Figura 60 Gráfica de contorno. Perímetros vs primera capa en ABS

- **Perímetros vs primera capa**

Al examinar las figuras 59 y 60 resulta evidente que el punto donde se maximiza la fuerza es muy cercano con una primera capa de 0.20mm y un valor de 2 perímetros. Además, al examinar la figura 60 se observa que el proceso puede ser sensible a los cambios de la primera capa.

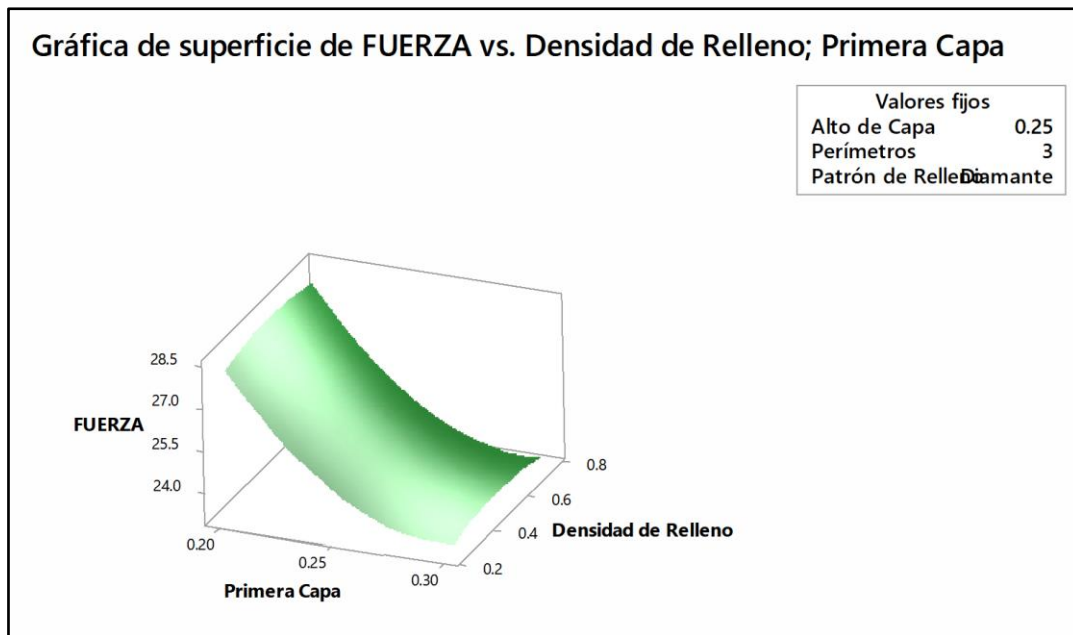


Figura 61 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs primera capa en ABS

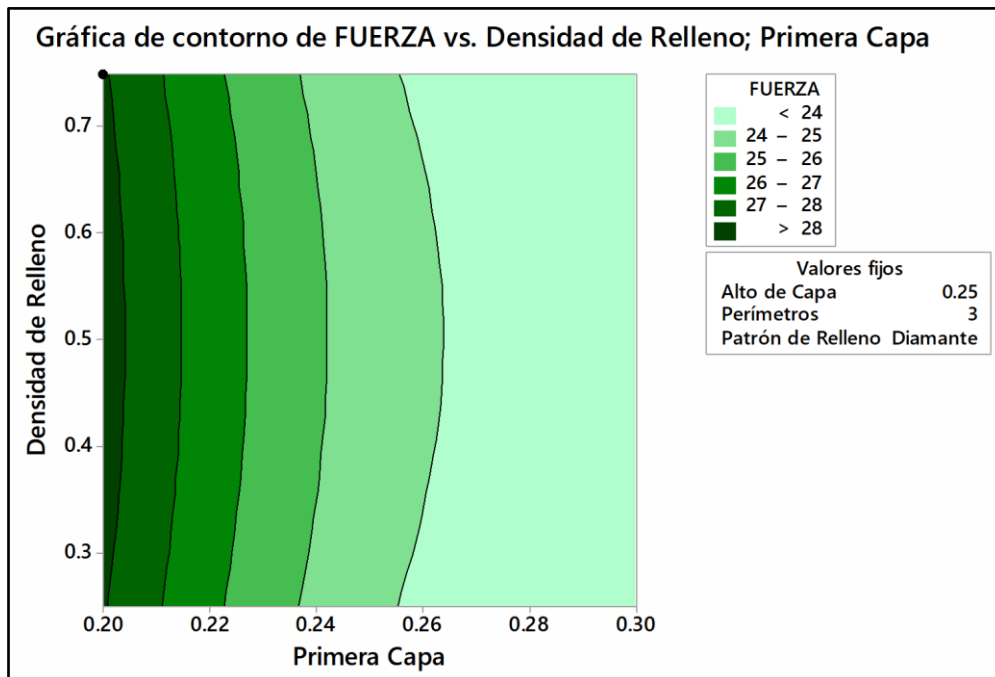


Figura 62 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs primera capa en ABS

- Densidad de relleno vs primera capa

Al examinar las figuras 61 y 62 resulta evidente que la superficie donde se maximiza la fuerza se encuentra en el punto de la primera capa de 0.20mm y cualquier valor de densidad de relleno en el rango de 20% a 75%. Además, al examinar la figura 62, se observa que el proceso es altamente sensible al cambio de la primera capa.

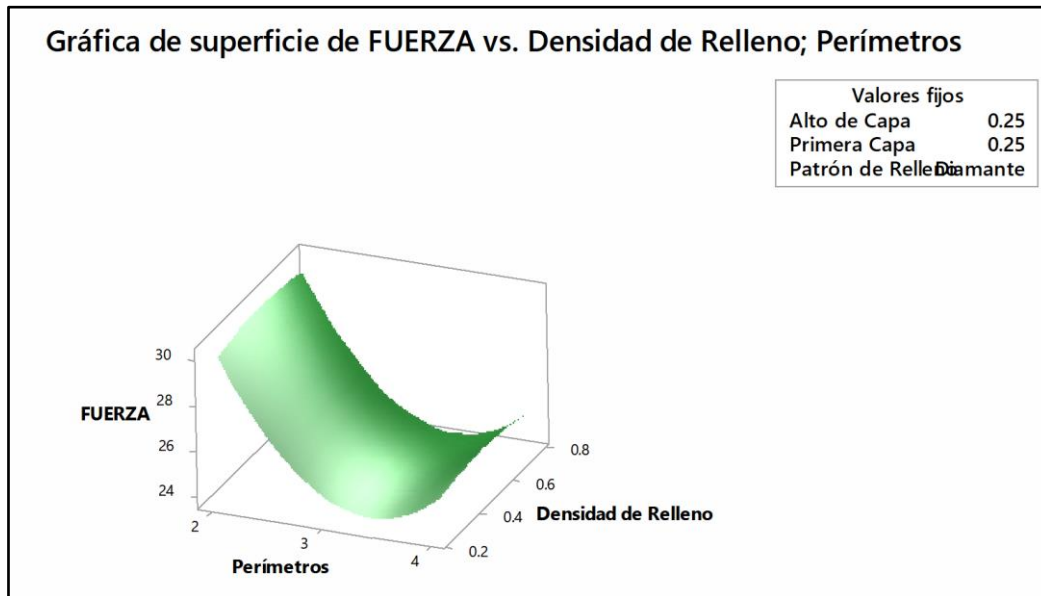


Figura 63 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs perímetros en ABS

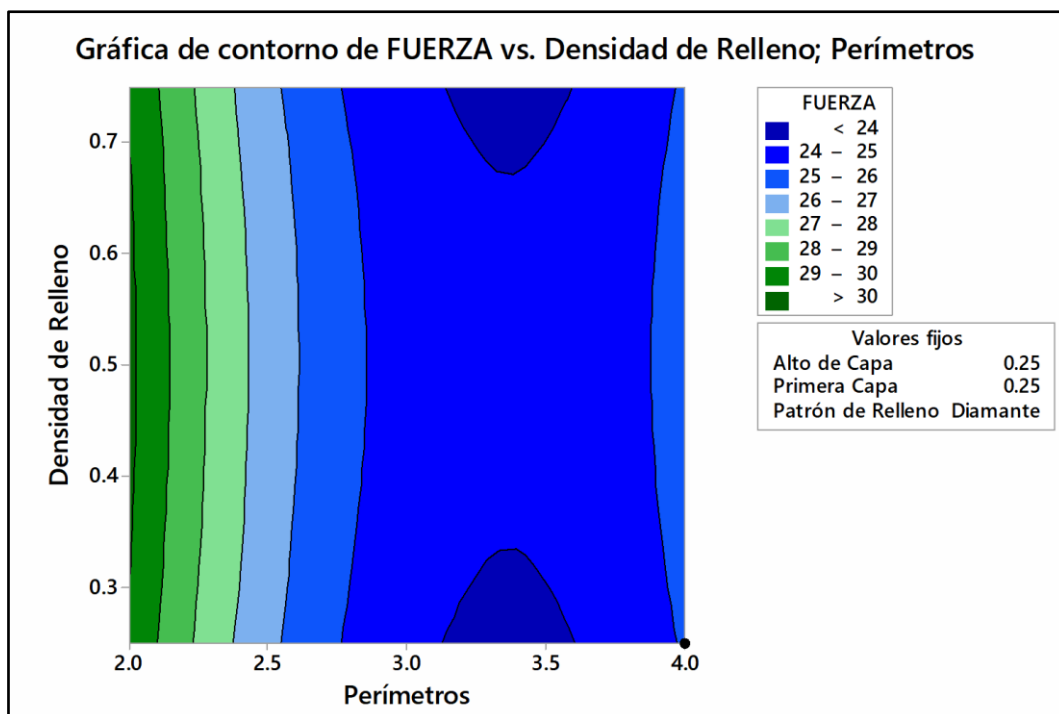


Figura 64 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs perímetros en ABS

- **Densidad de relleno vs perímetros**

Al examinar las figuras 63 y 64 resulta evidente que la superficie donde se maximiza la fuerza se encuentra en el valor de 2 perímetros y cualquier valor de densidad de relleno en el rango de 20% a 75%. Además, al examinar la figura 64, se observa que el proceso es altamente sensible al cambio del número de perímetros.

3.4.2.5 Predicción de optimización

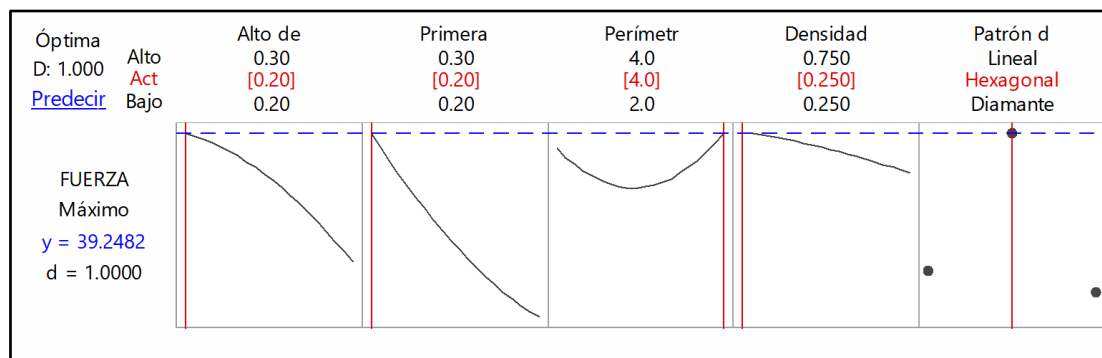


Figura 65 Gráfica de optimización de flexión en ABS con RSM

Se puede ver en la figura 65 que los valores óptimos para obtener la mayor resistencia a la flexión en las probetas de ABS, se obtendría con la siguiente configuración de impresión:

Tabla 29

Configuración para fuerza máxima en ABS con RSM

Factor	Valor óptimo
Alto de capa	0.20 mm
Alto de primera capa	0.20 mm
Perímetros	4
Densidad de relleno	25%
Patrón de relleno	Hexagonal

3.6.3 Ensayo de flexión en resina

3.6.3.1 Análisis de varianza

Modelo	5	179.123	35.825	6.33	0.080
Lineal	2	129.720	64.860	11.46	0.039
Tiempo Curado	1	126.850	126.850	22.41	0.018
Tiempo PC	1	2.870	2.870	0.51	0.528
Cuadrado	2	12.217	6.109	1.08	0.444
Tiempo Curado*Tiempo Curado	1	6.996	6.996	1.24	0.347
Tiempo PC*Tiempo PC	1	5.221	5.221	0.92	0.408
Interacción de 2 factores	1	37.186	37.186	6.57	0.083
Tiempo Curado*Tiempo PC	1	37.186	37.186	6.57	0.083
Error	3	16.980	5.660		
Total	8	196.103			

3.6.3.2 Resumen del modelo

S R-cuad.
2.37907 91.34%

3.6.3.3 Análisis del modelo

El mejor ajuste que se obtiene es del 91.34% cuando el término elegido, en el software estadístico, es el cuadrático completo. En este caso se consideran todos los modelos posibles, los cuales son:

- Lineal
- Cuadrado
- Interacción de 2 factores

3.6.3.4 Análisis de superficies y contornos

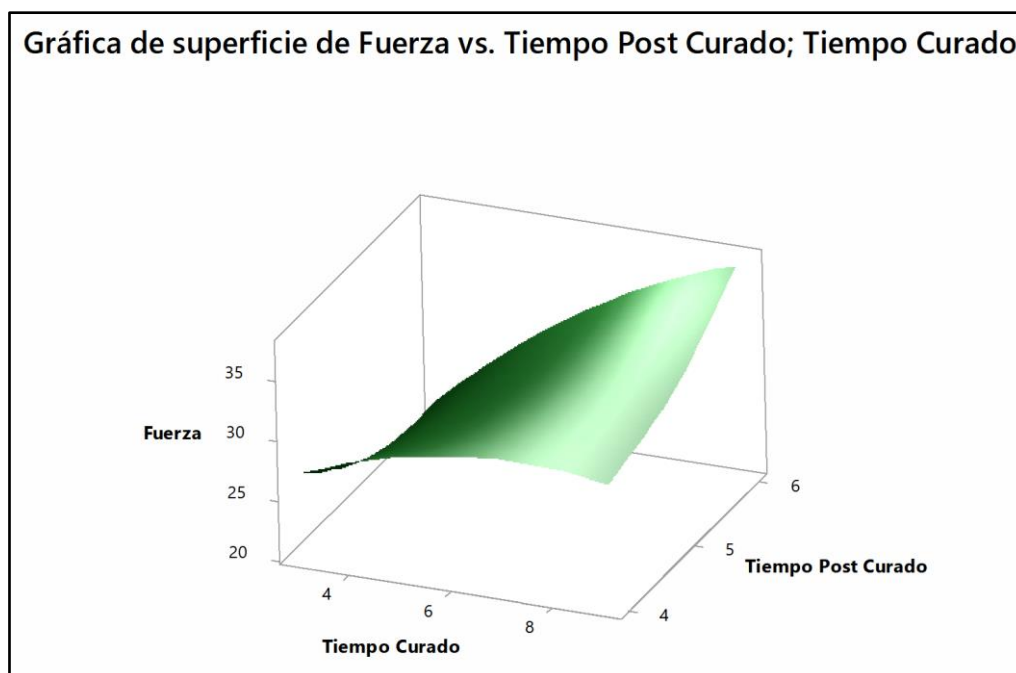


Figura 66 Gráfica de superficie. Tiempo curado vs tiempo post curado en resina

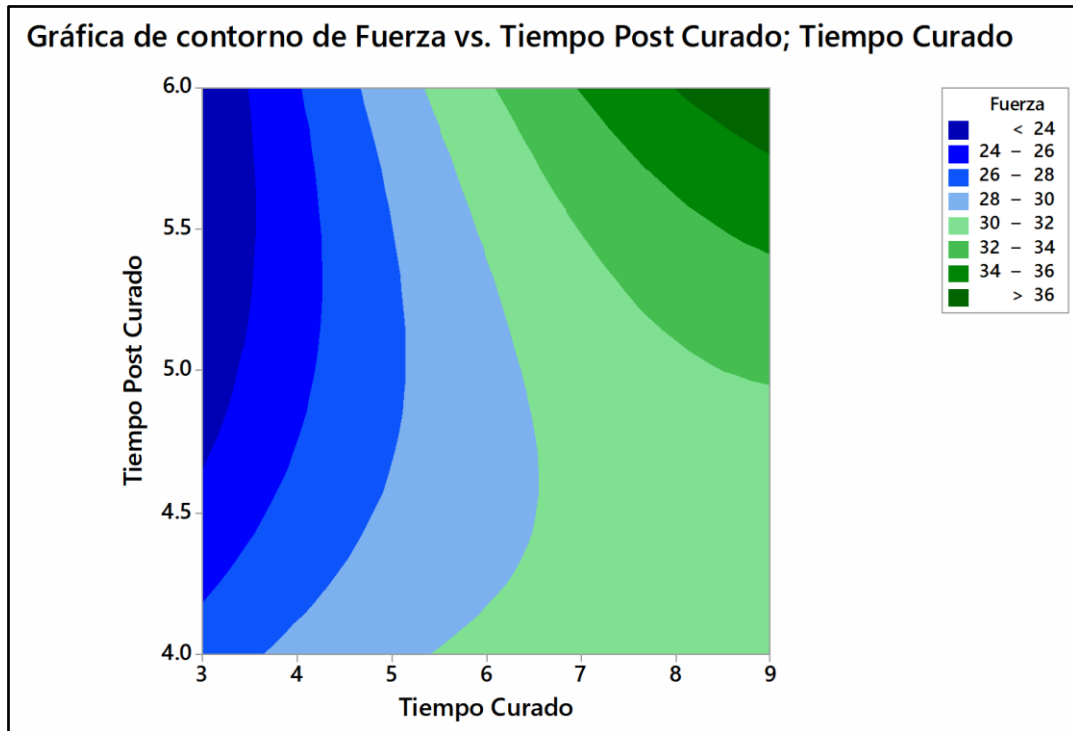


Figura 67 Gráfica de contorno. Tiempo curado vs tiempo post curado en resina

Al examinar las figuras 66 y 67 resulta evidente que el punto óptimo está cuando el tiempo de curado es 9 segundos y el tiempo de post curado 6 segundos. Además, al examinar la figura 67, se observa que el proceso es más sensible con los cambios del tiempo de curado.

3.4.3.5 Predicción de optimización

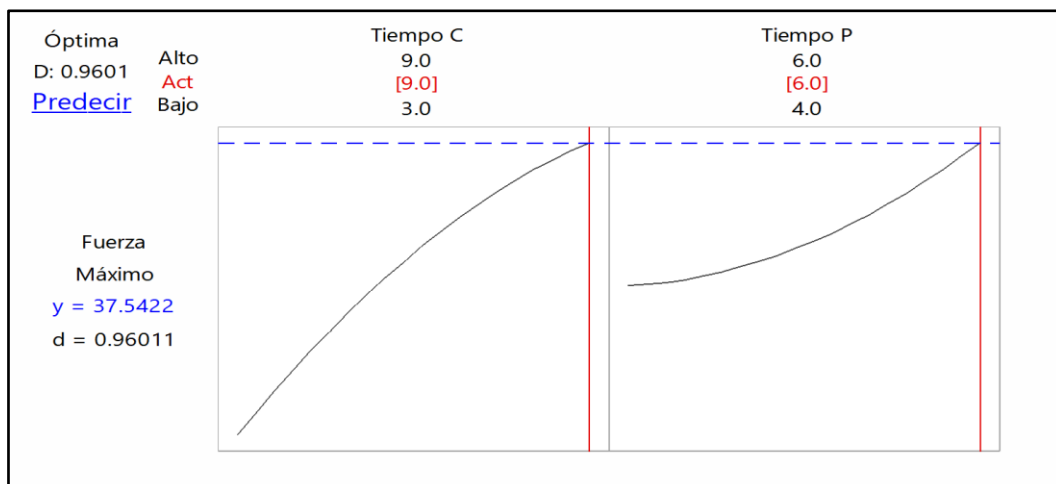


Figura 68 Gráfica de optimización de flexión en resina con RSM

Se puede ver en la figura 68 que los valores óptimos para obtener la mayor resistencia a la flexión en las probetas de resina, se obtendría con la siguiente configuración de impresión:

Tabla 30
Configuración para fuerza máxima en resina con RSM

Factor	Valor óptimo
Tiempo Curado	9 s
Tiempo Post Curado	6 s

3.6.4 Ensayo de dureza en PLA

3.6.4.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	18	218.041	12.1134	0.73	0.727
Lineal	6	87.082	14.5137	0.87	0.554
Alto de Capa	1	2.000	2.0000	0.12	0.738
Primera Capa	1	0.006	0.0062	0.00	0.985
Perímetros	1	40.500	40.5000	2.43	0.157
Densidad de Relleno	1	41.506	41.5062	2.49	0.153
Patrón de Relleno	2	3.070	1.5350	0.09	0.913
Cuadrado	4	16.786	4.1965	0.25	0.900
Alto de Capa*Alto de Capa	1	2.971	2.9712	0.18	0.684
Primera Capa*Primera Capa	1	2.817	2.8169	0.17	0.692
Perímetros*Perímetros	1	4.545	4.5453	0.27	0.615
Densidad*Densidad	1	6.453	6.4527	0.39	0.551
Interacción de 2 factores	8	114.173	14.2716	0.86	0.583
Alto de Capa*Patrón de Relleno	2	36.037	18.0185	1.08	0.384
Primera Capa*Patrón de Relleno	2	22.531	11.2654	0.68	0.535
Perímetros*Patrón de Relleno	2	44.778	22.3889	1.35	0.314
Densidad*Patrón de Relleno	2	10.827	5.4136	0.33	0.731
Error	8	133.128	16.6409		
Total	26	351.169			

3.6.4.2 Resumen del modelo

S R-cuad.
4.07933 62.09%

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	Dureza	Ajuste	Resid	Resid	est.	R
17	74.67	69.47	5.20	2.09		R
25	74.67	70.01	4.66	2.24		R

Residuo grande R

3.6.4.3 Análisis del modelo

El mejor ajuste que se obtiene es del 62.09% cuando el término elegido, en el software estadístico, es el cuadrático completo. En este caso se consideran todos los modelos posibles, los cuales son: Lineal, cuadrado e interacción de 2 factores.

3.6.4.4 Análisis de superficies y contornos

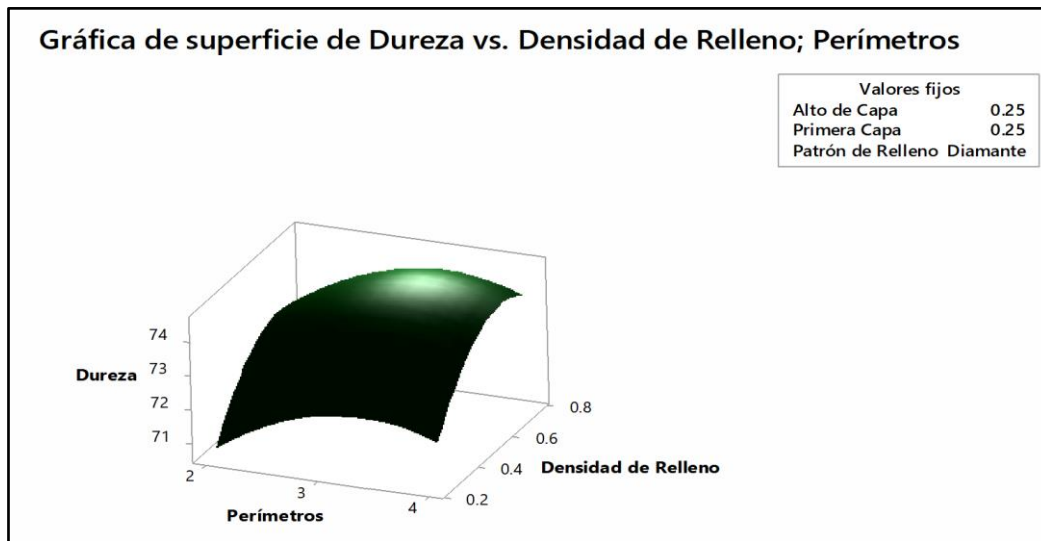


Figura 69 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs perímetros en PLA

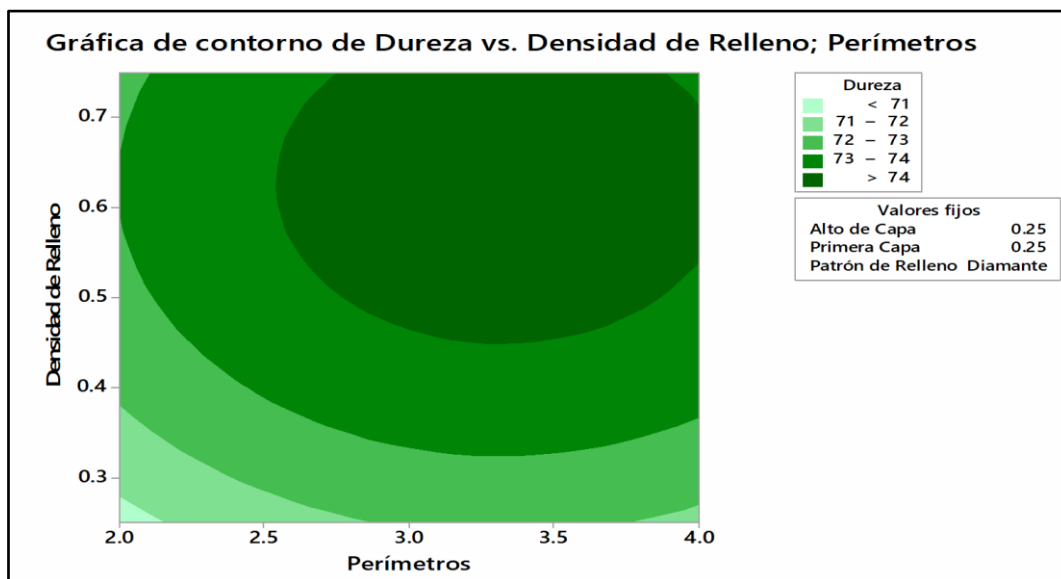


Figura 70 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs perímetros en PLA

- **Densidad de relleno vs perímetros**

Al examinar las figuras 69 y 70 resulta evidente que la superficie donde se encuentra la máxima dureza Shore D está comprendida por el rango densidad de relleno, entre 46% y 75%, y el número de perímetros adecuados se encontraría en el rango de 3-4 perímetros. Además, al examinar la figura 70 se observa que el proceso puede ser más sensible a los cambios de porcentaje de densidad de relleno, que a los cambios de perímetros.

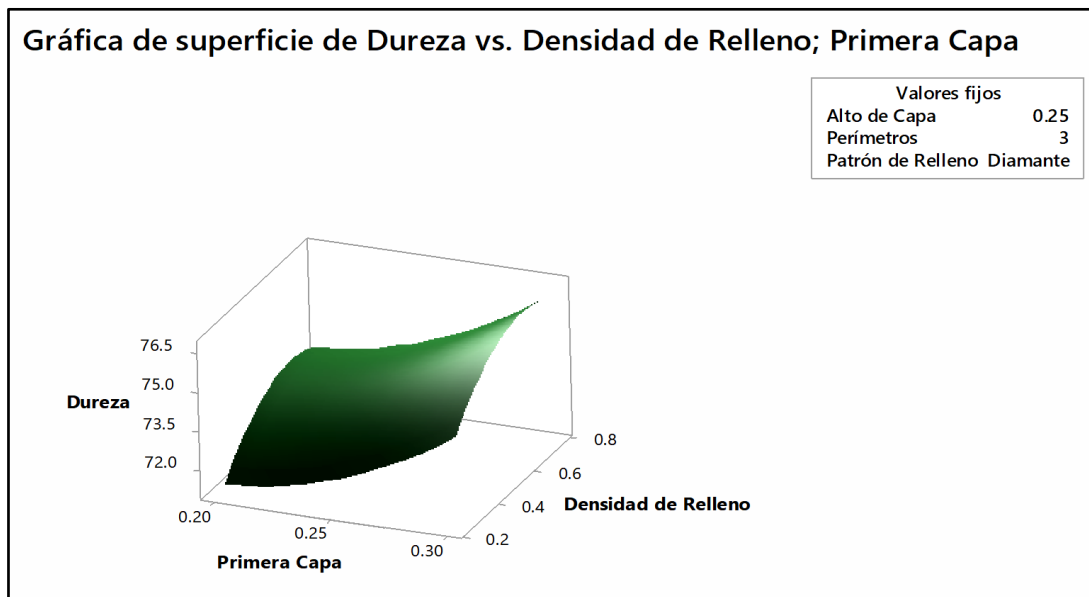


Figura 71 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs primera capa en PLA

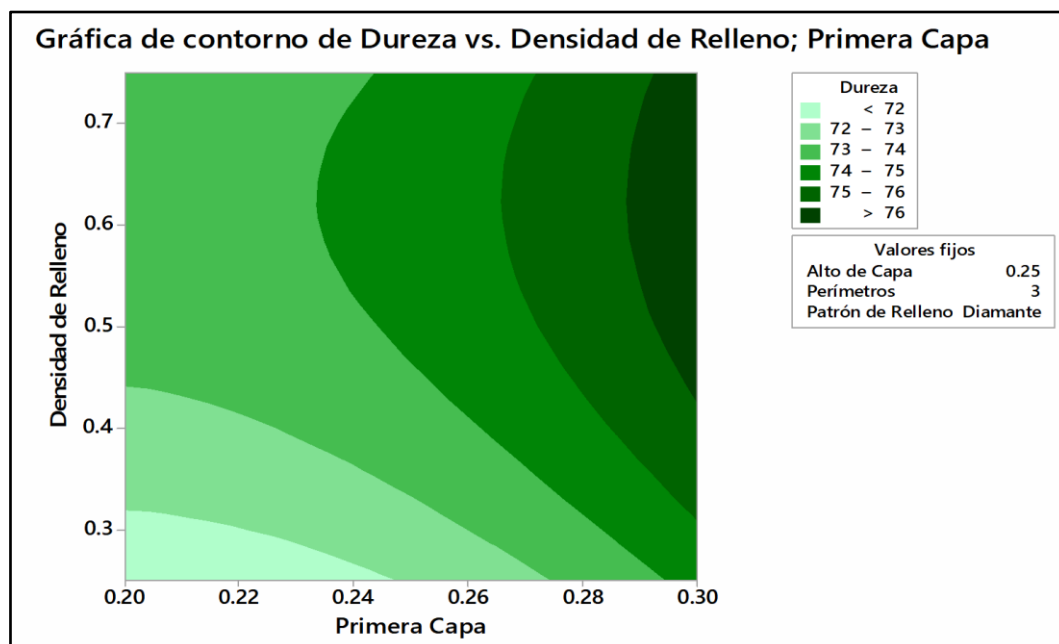


Figura 72 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs primera capa en PLA

- **Densidad de relleno vs primera capa**

Al examinar las figuras 71 y 72 resulta evidente que la superficie donde se encuentra la máxima dureza Shore D está comprendida por el rango densidad de relleno, entre 46% y 75%, y el valor de primera capa adecuado se encontraría en el rango de 0.29mm – 0.30mm. Además, al examinar figura 72 se observa que el proceso puede ser más sensible a los cambios de primera capa, que a los cambios de porcentaje de densidad de relleno.

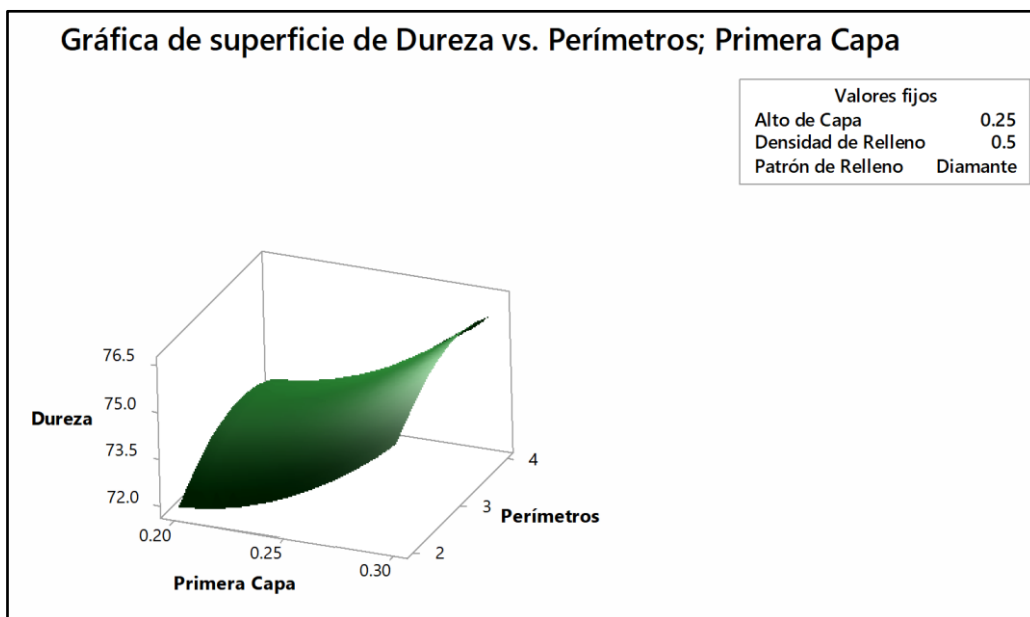


Figura 73 Gráfica de superficie. Perímetros vs primera capa en PLA

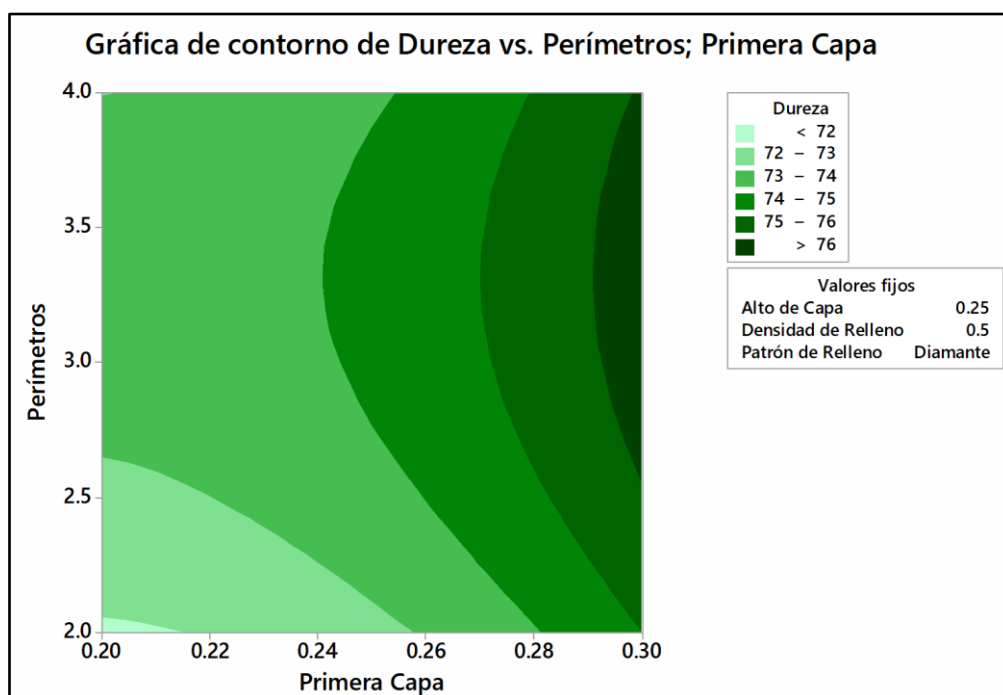


Figura 74 Gráfica de contorno. Perímetros vs primera capa en PLA

- **Perímetros vs primera capa**

Al examinar las figuras 73 y 74 resulta evidente que la superficie donde se encuentra la máxima dureza Shore D está comprendida por el rango de perímetros de 3-3, y el valor de primera capa adecuado se encontraría en el rango de 0.29mm – 0.30mm. Además, al examinar la figura 74 se observa que el proceso puede ser más sensible a los cambios de primera capa, que a los cambios de perímetros.

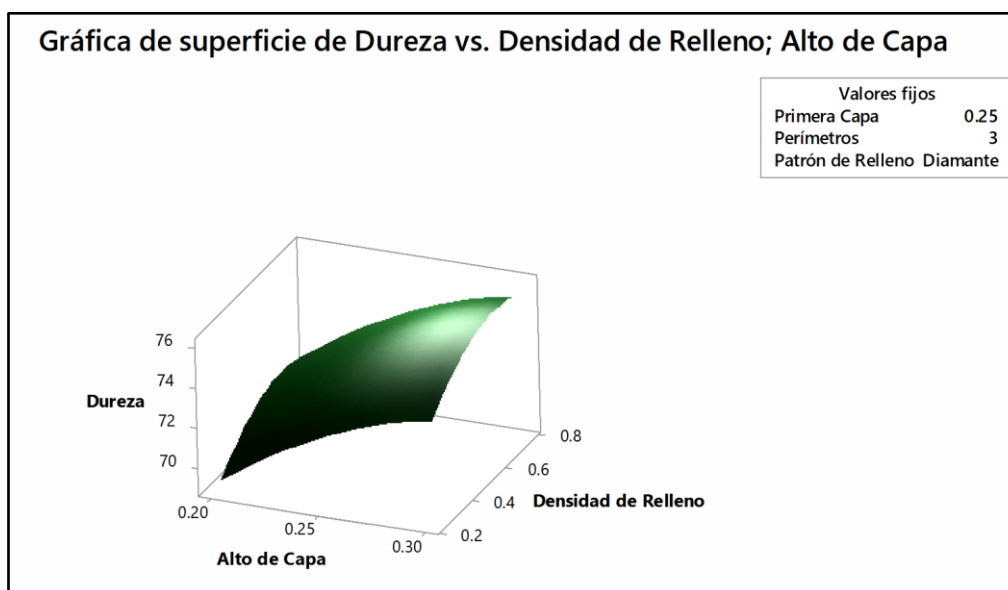


Figura 75 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs alto de capa en PLA

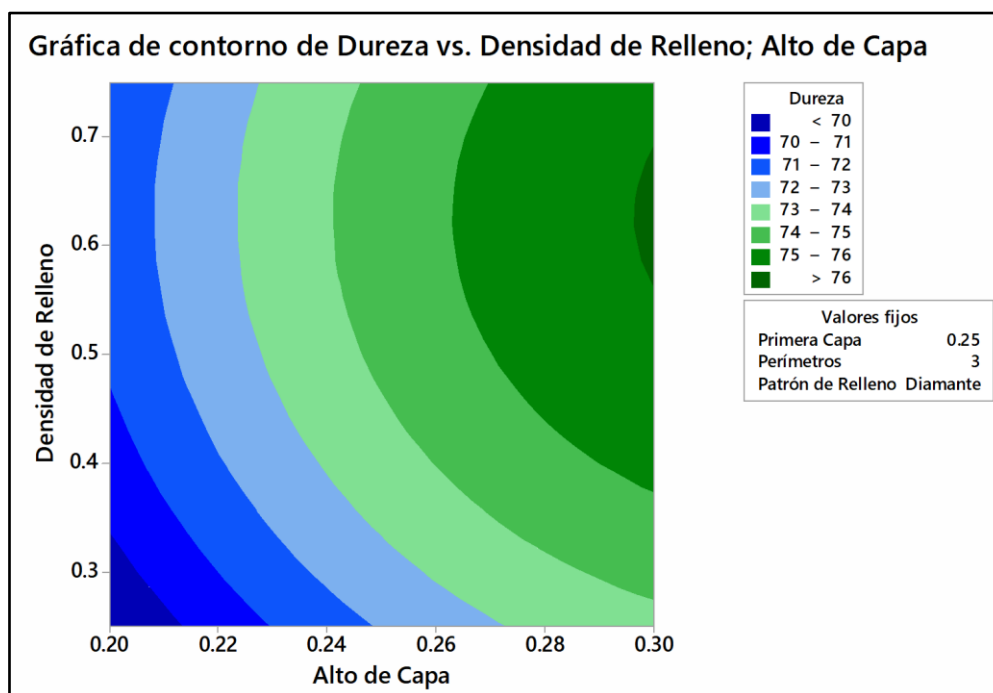


Figura 76 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs alto de capa en PLA

- **Densidad de relleno vs alto de capa**

Al examinar las figuras 75 y 76 resulta evidente que se obtiene la máxima dureza Shore D en el rango de densidad de relleno de 55% - 70% y usando un alto de capa en el rango de 0.28mm a 0.30mm. Además, al examinar la figura 76 se observa que hay una sensibilidad existente en el factor de alto de capa.

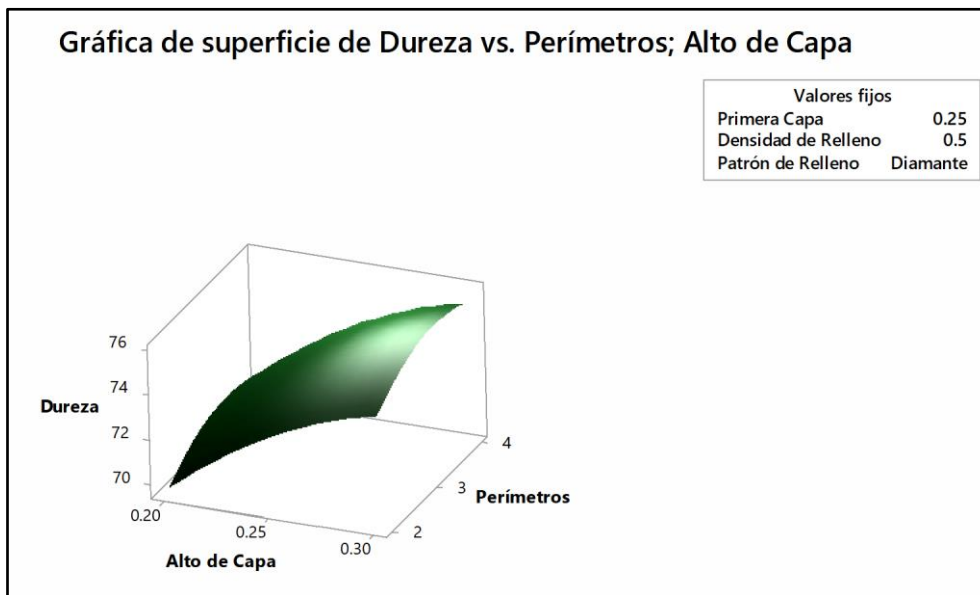


Figura 77 Gráfica de superficie. Perímetros vs alto de capa en PLA

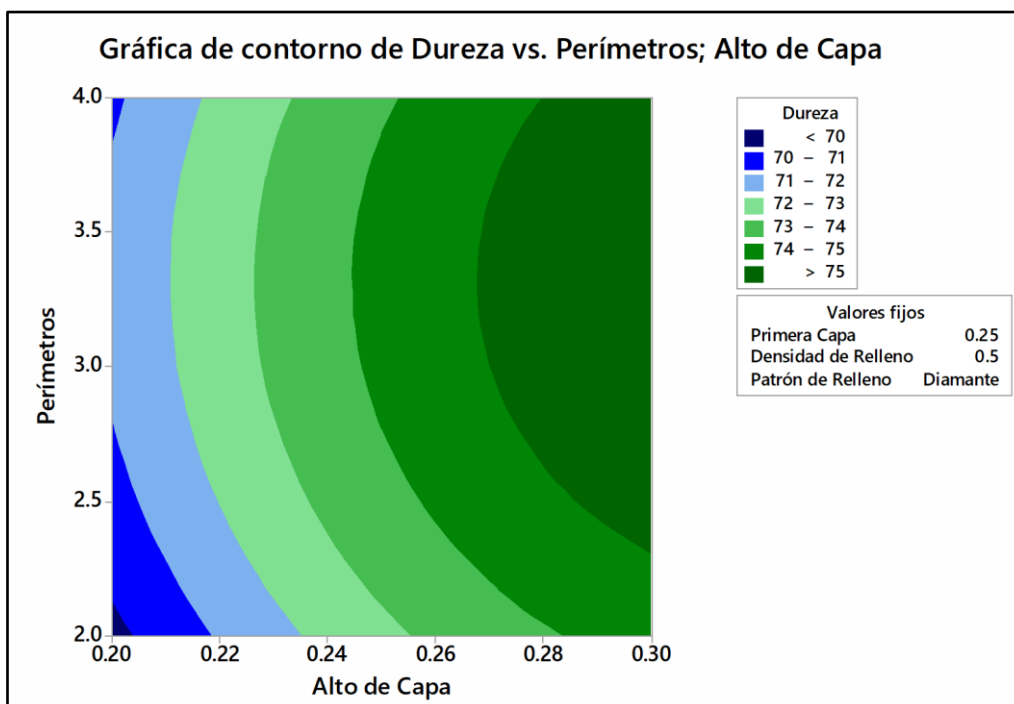


Figura 78 Gráfica de contorno. Perímetros vs alto de capa en PLA

- **Perímetros vs alto de capa**

Al examinar las figuras 77 y 78 resulta evidente que el punto donde se encuentra la máxima dureza Shore D corresponde al valor de 3-4 perímetros y en el rango de 0.28 mm - 0.30mm al valor de alto de capa. Además, al examinar la figura 78 se observa que existe una sensibilidad muy considerable al cambio de alto de capa.

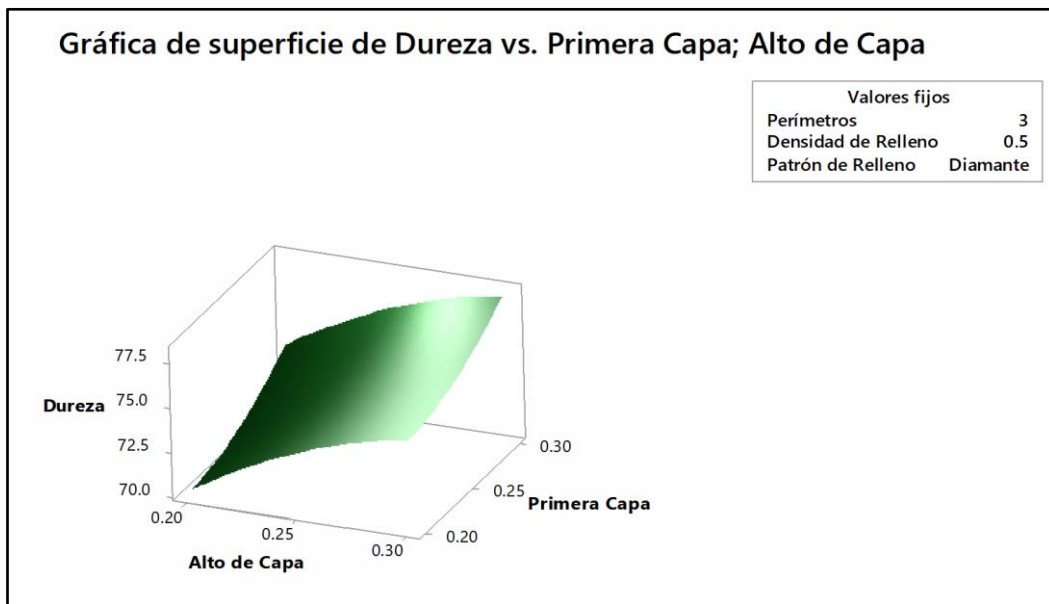


Figura 79 Gráfica de superficie. Primera capa vs alto de capa en PLA

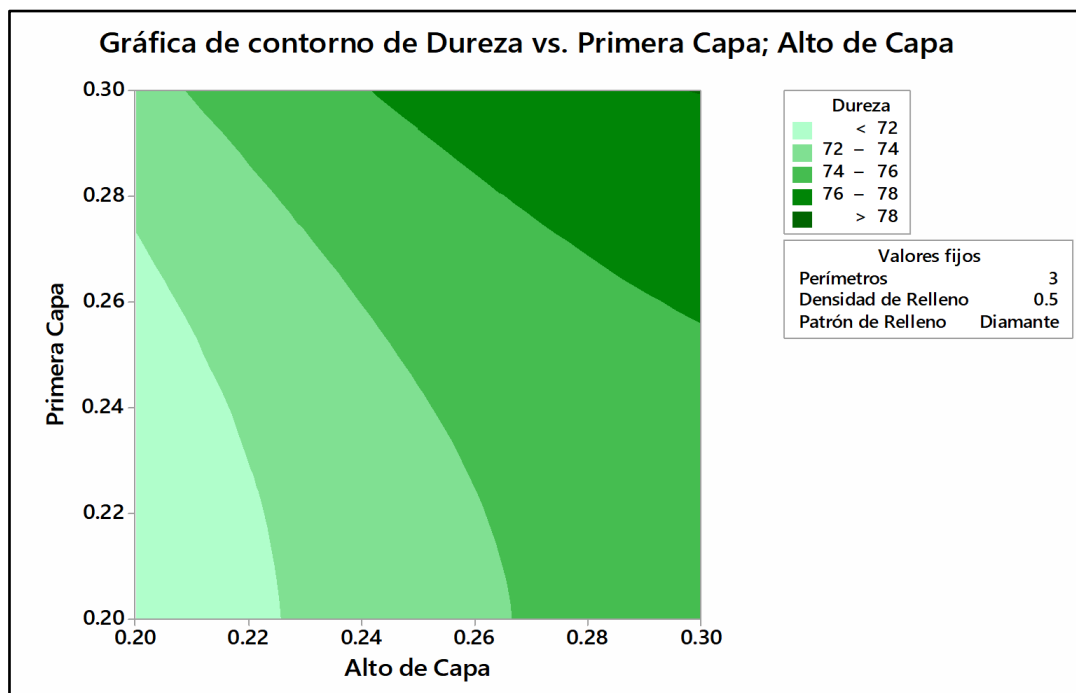


Figura 80 Gráfica de contorno. Primera de capa vs alto de capa en PLA

- **Primera capa vs alto de capa**

Al examinar las figuras 79 y 80 resulta que la superficie donde se encuentra la máxima dureza Shore D está comprendida por el rango de primera capa, entre 0.26mm - 0.30mm, y el alto de capa entre 0.26mm - 0.30mm. Además, al examinar la figura 80, se observa que el proceso puede ser más sensible a los cambios de la primera capa, que a los cambios del alto de capa.

3.6.2.5 Predicción de optimización

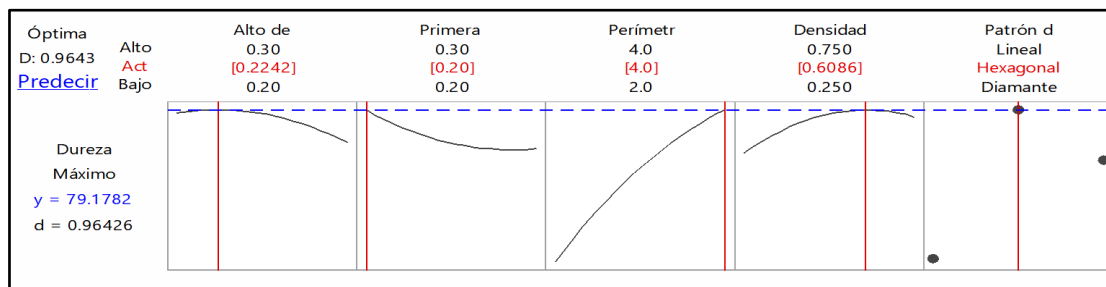


Figura 81 Gráfica de optimización de dureza en PLA con RSM

Se puede ver en la figura 81 que los valores óptimos para obtener la mayor dureza en las probetas de PLA, se obtendría con la siguiente configuración de impresión:

Tabla 31

Configuración para dureza máxima en PLA con RSM

Factor	Valor óptimo
Alto de capa	0.224 mm
Alto de primera capa	0.20 mm
Perímetros	4
Densidad de relleno	60.86%
Patrón de relleno	Hexagonal

3.6.5 Ensayo de dureza en ABS

3.6.5.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	18	347.041	19.280	1.77	0.208
Lineal	6	121.255	20.209	1.85	0.206
Alto de Capa	1	26.889	26.889	2.46	0.155
Primera Capa	1	31.117	31.117	2.85	0.130
Perímetros	1	0.000	0.000	0.00	1.000
Densidad de Relleno	1	1.784	1.784	0.16	0.697
Patrón de Relleno	2	61.465	30.733	2.82	0.119
Cuadrado	4	126.391	31.598	2.90	0.094
Alto de Capa*Alto de Capa	1	0.403	0.403	0.04	0.852
Primera Capa*Primera Capa	1	123.508	123.508	11.32	0.010
Perímetros*Perímetros	1	2.379	2.379	0.22	0.653
Densidad*Densidad	1	0.101	0.101	0.01	0.926
Interacción de 2 factores	8	99.395	12.424	1.14	0.429
Alto de Capa*Patrón de Relleno	2	3.111	1.556	0.14	0.869
Primera Capa*Patrón de Relleno	2	4.086	2.043	0.19	0.833
Perímetros*Patrón de Relleno	2	72.704	36.352	3.33	0.089
Densidad*Patrón de Relleno	2	19.494	9.747	0.89	0.447
Error	8	87.288	10.911		
Total	26	434.329			

3.6.5.2 Resumen del modelo

S	R-cuad.
3.30318	79.90%

3.6.5.3 Análisis del modelo

El mejor ajuste que se obtiene es del 79.90% cuando el término elegido, en el software estadístico, es el cuadrático completo. En este caso se consideran todos los modelos posibles, los cuales son: Lineal, cuadrado e interacción de 2 factores

3.6.5.4 Análisis de superficies y contornos

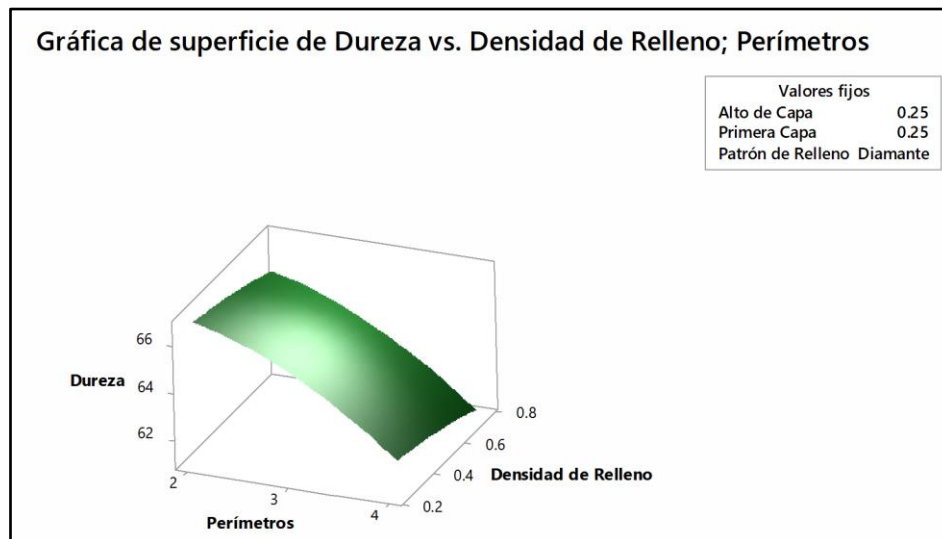


Figura 82 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs perímetros en ABS

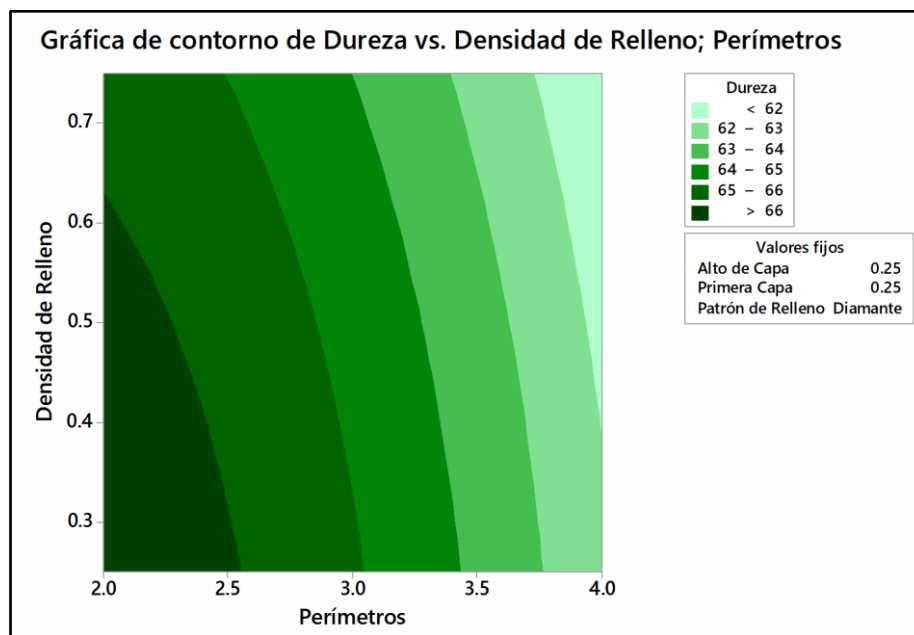


Figura 83 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs perímetros en ABS

- **Densidad de relleno vs perímetros**

Al examinar las figuras 82 y 83 resulta evidente que la superficie donde se encuentra la máxima dureza Shore D está comprendida por el rango densidad de relleno, entre 25% y 60%, y el número de perímetros adecuado sería de 2. Además, al examinar la figura 83 se observa que el proceso puede ser más sensible a los cambios de perímetros, que a los cambios de porcentaje de densidad de relleno.

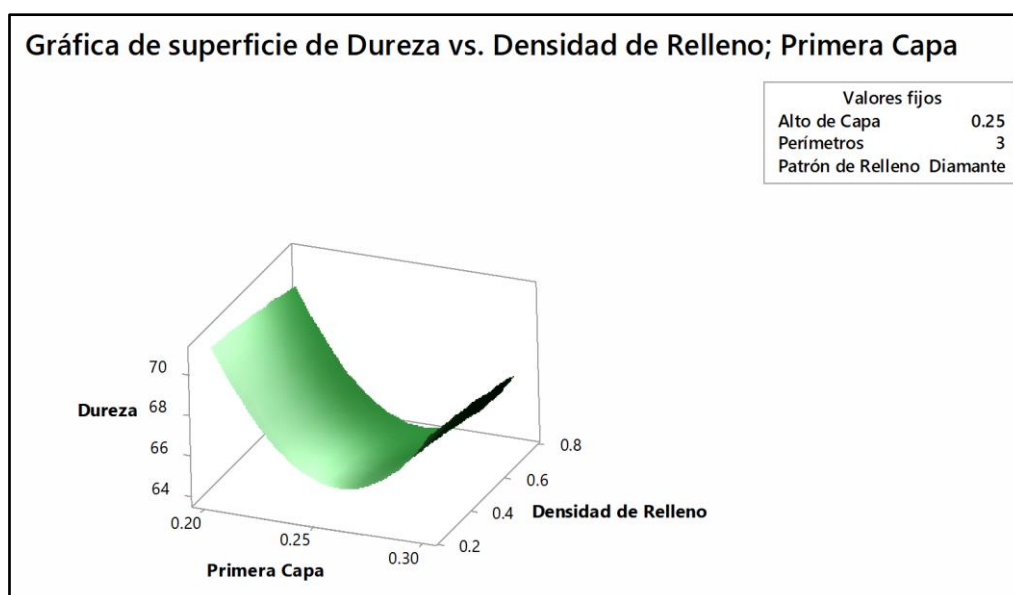


Figura 84 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs primera capa en ABS

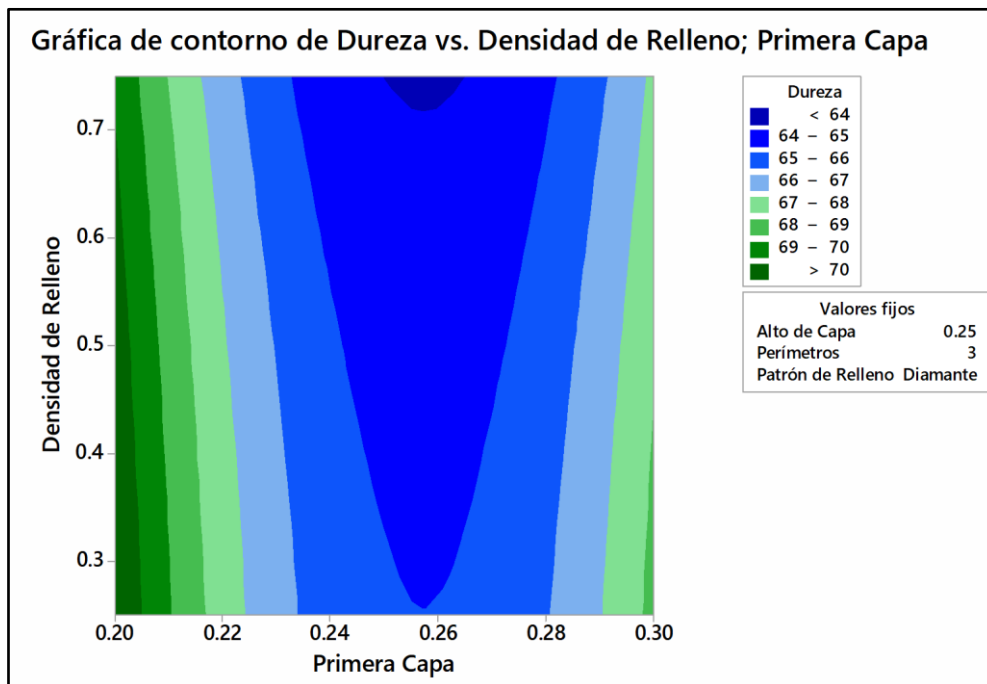


Figura 85 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs primera capa en ABS

- **Densidad de relleno vs primera capa**

Al examinar las figuras 84 y 85 resulta evidente que la superficie donde se maximiza la dureza shore D se encuentra en el punto de menor densidad de relleno (25%) y un valor de 0.20 mm de la primera capa. Además, al examinar la figura 85 se puede ver la alta sensibilidad de la primera capa.

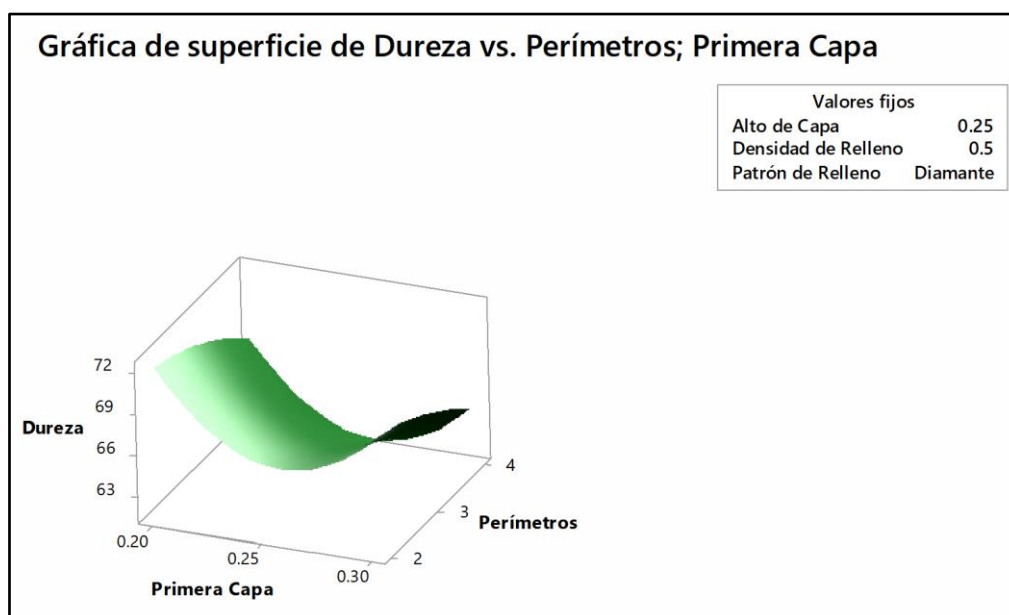


Figura 86 Gráfica de superficie. Perímetros vs primera capa en ABS

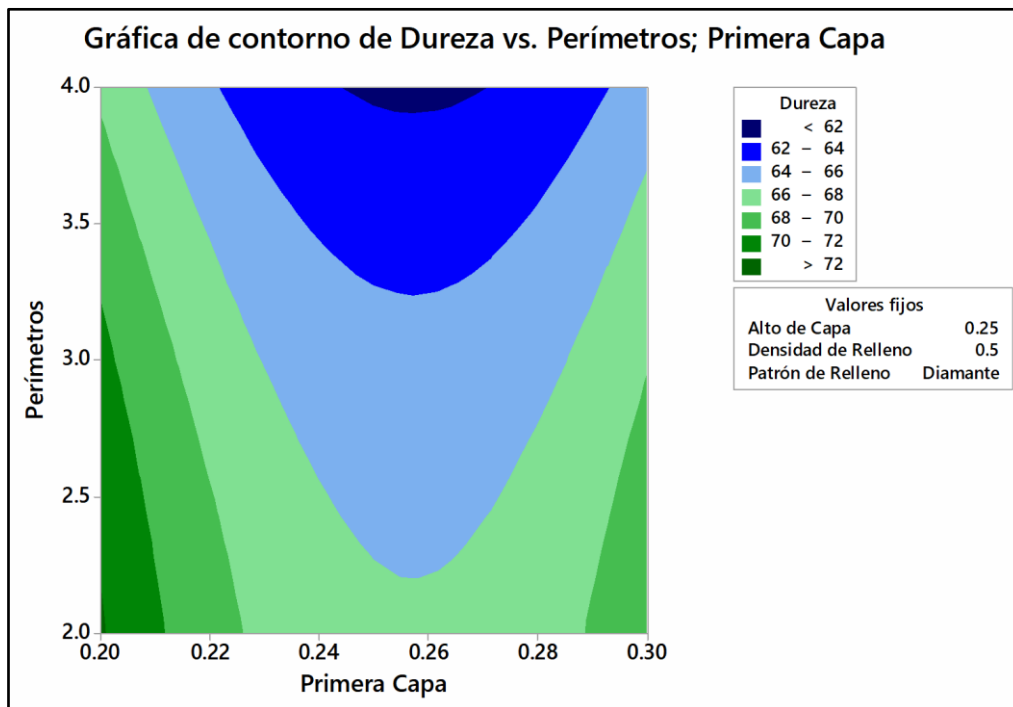


Figura 87 Gráfica de contorno. Perímetros vs primera capa en ABS

- Perímetros vs primera capa

Al examinar las figuras 86 y 87 resulta evidente que el punto donde se encuentra la máxima dureza Shore D corresponde al valor de 2 perímetros y aproximadamente 0.20 mm el valor de la primera capa. Además, al examinar la figura 87, se observa que existe una sensibilidad muy considerable al cambio de valores de primera capa.

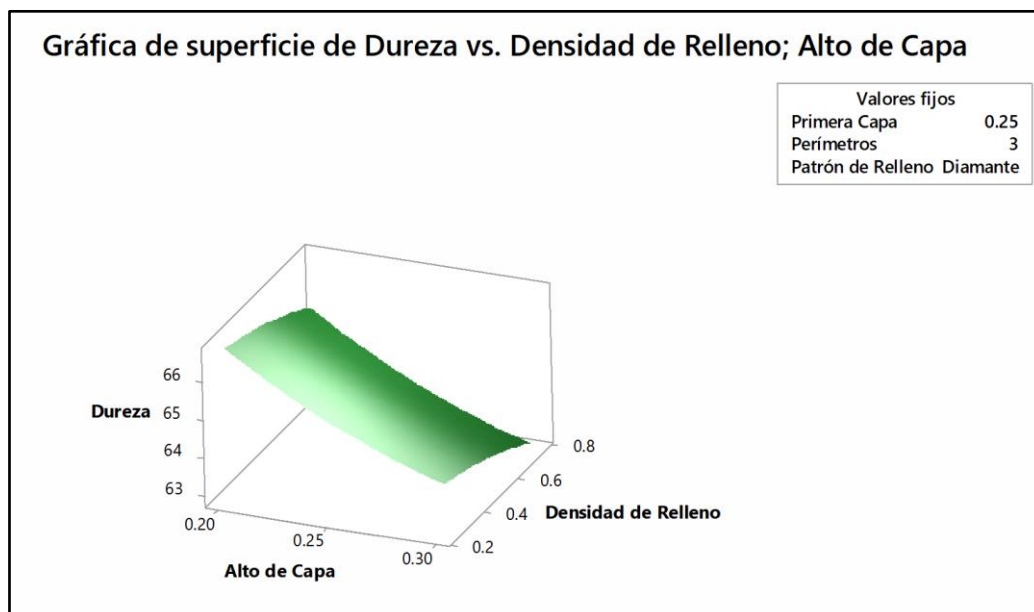


Figura 88 Gráfica de superficie. Densidad de relleno vs alto de capa en ABS

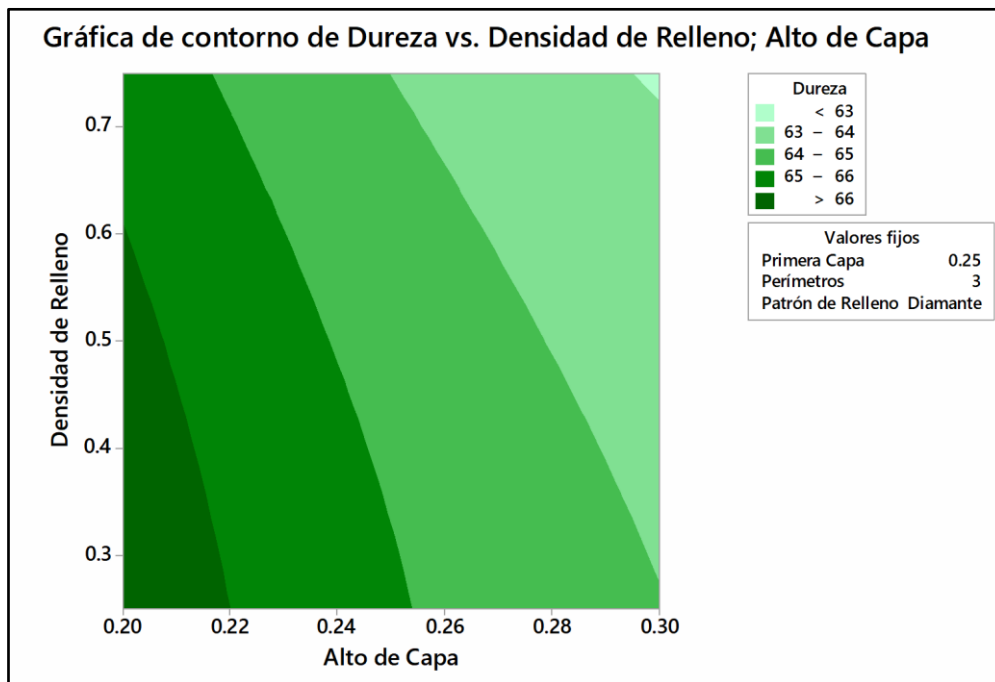


Figura 89 Gráfica de contorno. Densidad de relleno vs alto de capa en ABS

- **Densidad de relleno vs alto de capa**

Al examinar las figuras 88 y 89 resulta evidente que se obtiene la máxima dureza Shore D en el rango de densidad de relleno de 25% - 60% y usando un alto de capa en el rango de 0.20mm a 0.22mm. Además, al examinar la figura 89 se observa que hay una sensibilidad existente en el factor de alto de capa.

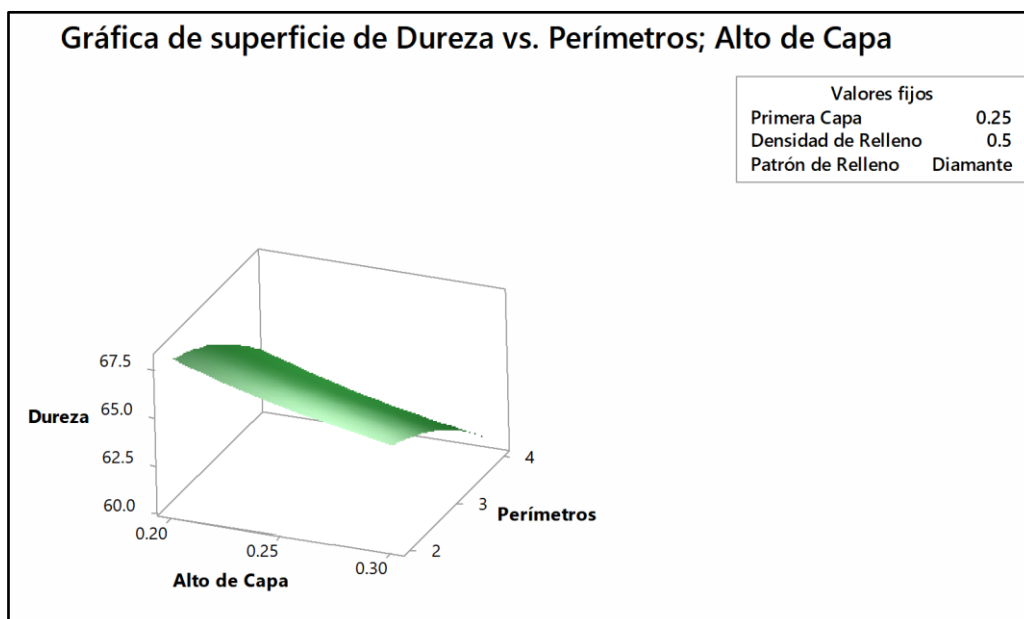


Figura 90 Gráfica de superficie. Perímetros vs alto de capa en ABS

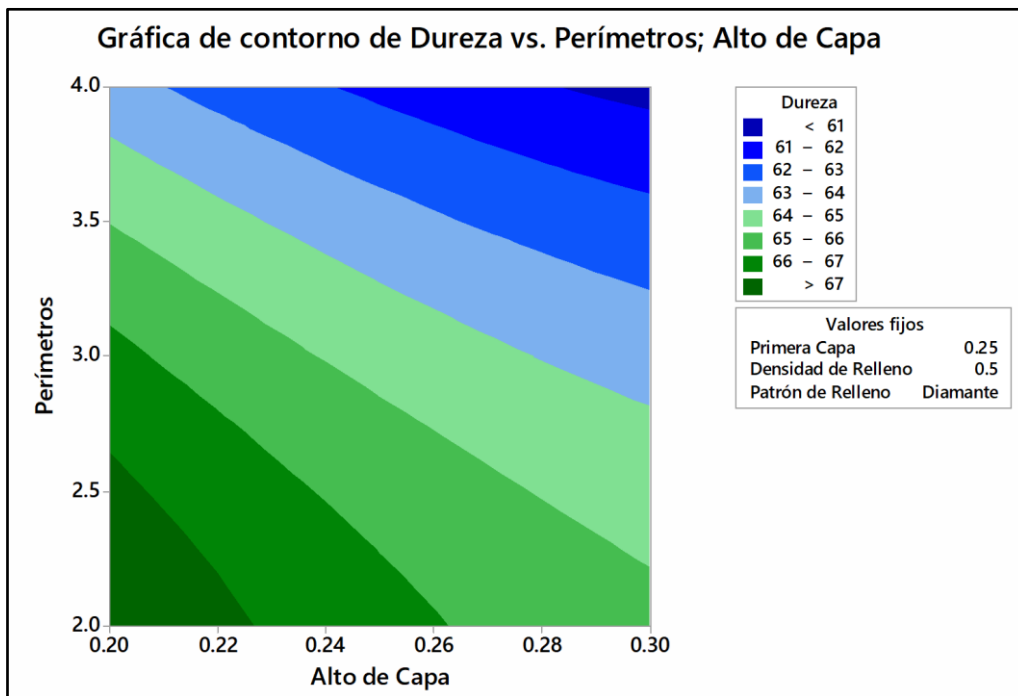


Figura 91 Gráfica de contorno. Perímetros vs alto de capa en ABS

- **Perímetros vs alto de capa**

Al examinar las figuras 90 y 91 resulta evidente que el punto donde se encuentra la máxima dureza Shore D corresponde al valor de 2 perímetros y en el rango de 0.20 mm y 0.22mm al valor de alto de capa. Además, al examinar la figura 91 se observa que existe una sensibilidad muy considerable al cambio de perímetros.

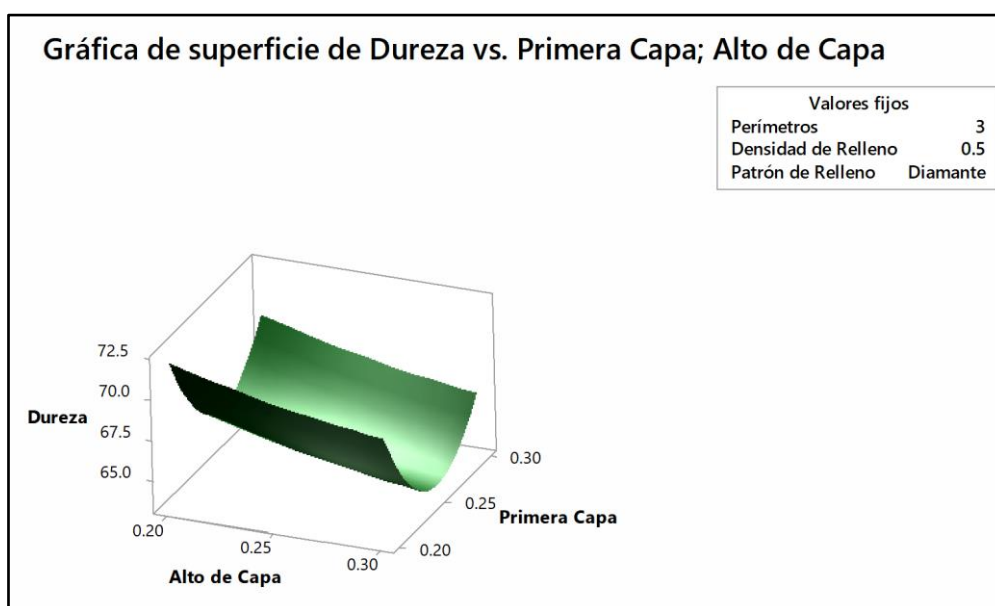


Figura 92 Gráfica de superficie. Primera capa vs alto de capa en ABS

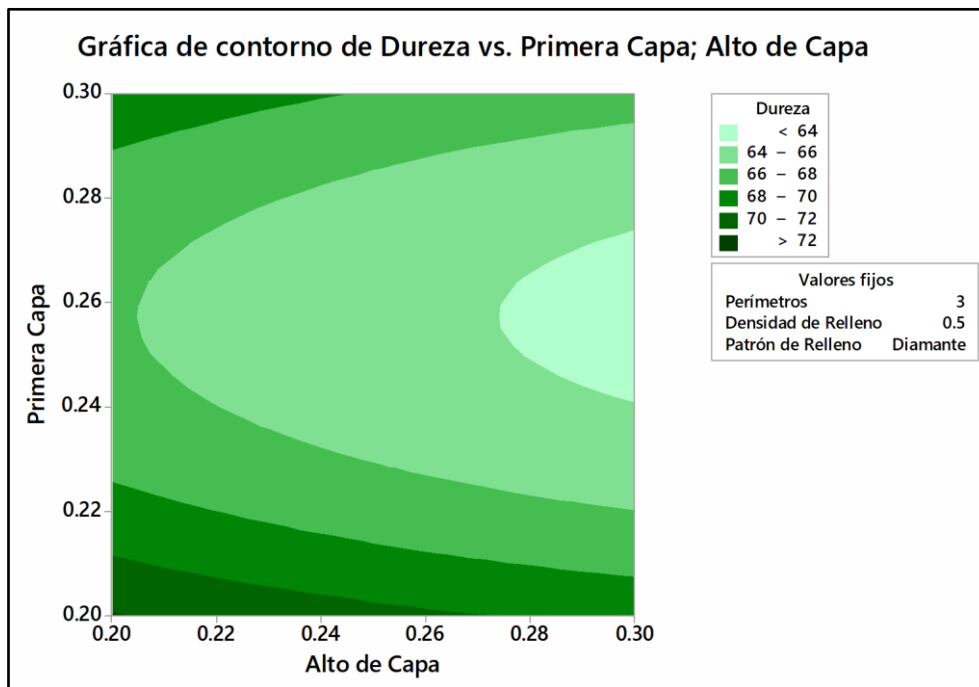


Figura 93 Gráfica de contorno. Primera capa vs alto de capa en ABS

- **Primera capa vs alto de capa**

Al examinar las figuras 92 y 93 resulta que la superficie donde se encuentra la máxima dureza Shore D está comprendida por el rango de primera capa, entre 0.20mm - 0.22 mm y 0.29mm - 0.30mm, y el alto de capa entre 0.20mm y 0.26 mm. Además, al examinar la figura 93, se observa que el proceso puede ser más sensible a los cambios de la primera capa, que a los cambios del alto de capa.

3.4.4.5 Predicción de optimización

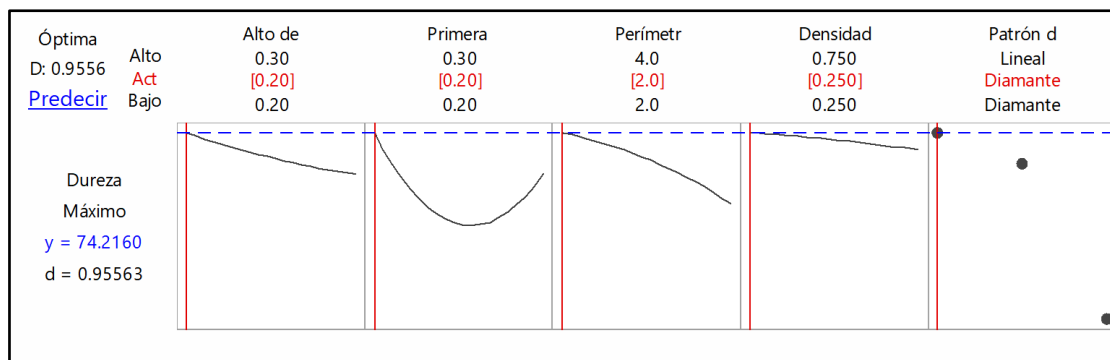


Figura 94 Gráfica de optimización de dureza en ABS con RSM

Se puede ver en la figura 94 que los valores óptimos para obtener la mayor dureza en las probetas de ABS, se obtendría con la configuración descrita en la tabla 32.

Tabla 32
Configuración para dureza máxima en ABS con RSM

Factor	Valor óptimo
Alto de capa	0.20 mm
Alto de primera capa	0.20 mm
Perímetros	2
Densidad de relleno	25%
Patrón de relleno	Diamante

3.6.6 Ensayo de dureza en resina

3.6.6.1 Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	86.2711	17.2542	4.77	0.114
Lineal	2	60.3367	30.1683	8.34	0.060
Tiempo Curado	1	60.1667	60.1667	16.63	0.027
Tiempo PC	1	0.1700	0.1700	0.05	0.842
Cuadrado	2	24.5656	12.2828	3.40	0.170
Tiempo Curado*Tiempo Curado	1	20.0556	20.0556	5.54	0.100
Tiempo PC*Tiempo PC	1	4.5100	4.5100	1.25	0.346
Interacción de 2 factores	1	1.3689	1.3689	0.38	0.582
Tiempo Curado*Tiempo PC	1	1.3689	1.3689	0.38	0.582
Error	3	10.8511	3.6170		
Total	8	97.1223			

3.6.6.2 Resumen del modelo

S	R-cuad.
1.90185	88.83%

3.6.6.3 Análisis del modelo

El mejor ajuste que se obtiene es del 88.83% cuando el término elegido, en el software estadístico, es el cuadrático completo. En este caso se consideran todos los modelos posibles, los cuales son: Lineal, cuadrado e interacción de 2 factores.

3.6.6.4 Análisis de superficies y contornos

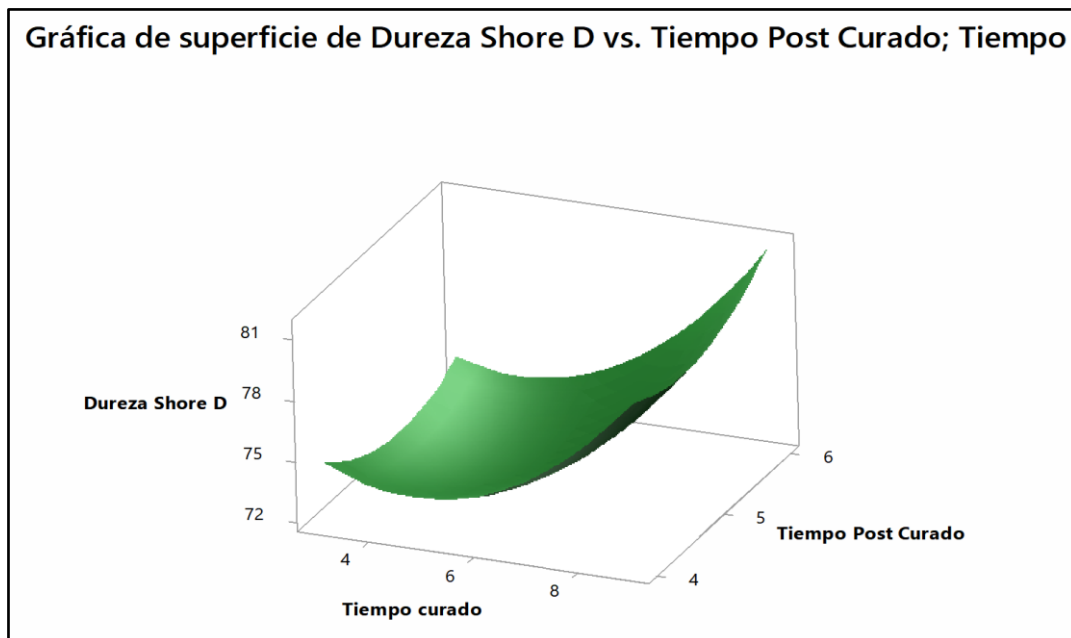


Figura 95 Gráfica de superficie. Tiempo post curado vs tiempo curado en resina

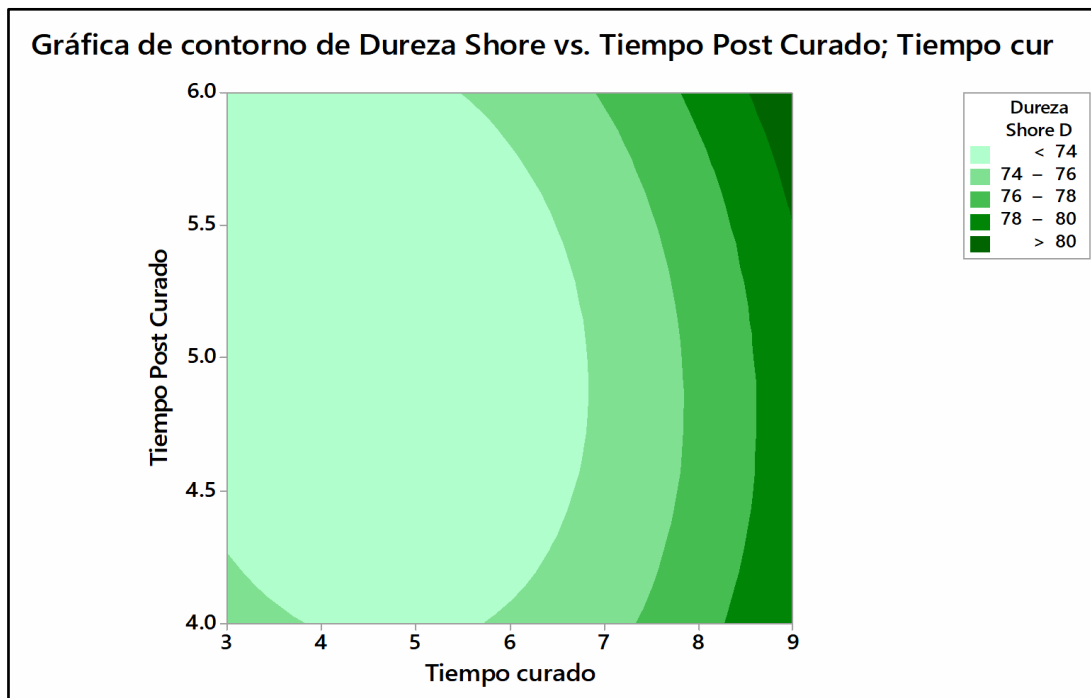


Figura 96 Gráfica de contorno. Tiempo post curado vs tiempo curado en resina

Al examinar las figuras 95 y 96 resulta que el valor donde se encuentra la máxima dureza Shore D ocurre cuando el tiempo de curado es 9 segundos y el tiempo de post curado 6 segundos. Además, al examinar la figura 96, se observa que el proceso puede ser más sensible a los cambios del tiempo de curado, que a los cambios de tiempo de post curado.

3.6.4.5 Predicción de optimización

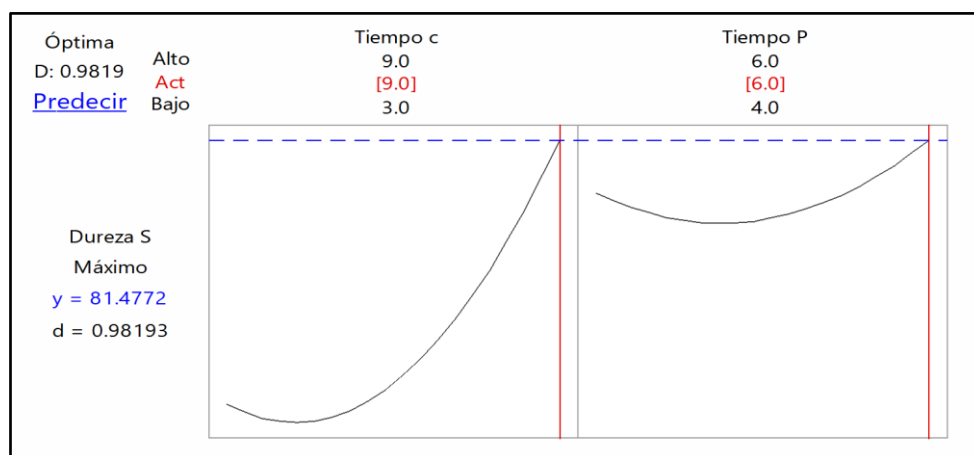


Figura 97 Gráfica de optimización de dureza en resina con RSM

Se puede ver en la figura 97 que los valores óptimos para obtener la mayor dureza en las probetas de resina, se obtendría con la configuración descrita en la tabla 33.

Tabla 33*Configuración para dureza máxima en resina con RSM*

Factor	Valor óptimo
Tiempo curado	9 s
Tiempo post curado	6 s

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE CURADO

4.1 Definición de criterios de construcción de la cámara de curado

En las tablas 34, 35, 36, 37 y 38 se establecen los criterios que han sido definidos para la forma de la cámara de curado, el método de construcción, el material, la fuente de luz y el controlador a utilizar.

Tabla 34

Matriz de selección de forma de la cámara de curado

Criterios	Fácil de diseñar	Rápido de construir	Estético	Económico	Total
Alternativas					
Cubica	3	1	1	3	8
Cilíndrica	2	3	2	2	9
Semiesférica	1	2	3	1	7

Tabla 35

Matriz de selección del método de construcción de la cámara de curado

Criterios	Fácil de construir	Rápido de construir	Estético	Económico	Total
Alternativas					
Maquinado (CNC)	2	2	3	2	9
Impresión 3D	3	3	2	3	11
Fundición	1	1	3	1	6

Tabla 36

Matriz de selección de material de construcción para la cámara de curado

Criterios	Fácil de construir	Rápido de construir	Estético	Económico	Total
Alternativas					
PLA	2	3	2	3	10
ABS	3	3	2	3	11
Resina	1	1	3	1	6

Tabla 37*Matriz de selección de la fuente de luz LED UV*

Alternativas \ Criterios	Fácil de construir	Rápido de construir	Estético	Económico	Total
Focos led	1	1	2	3	7
Goma de silicona	3	3	3	3	12
Tubo y goma de silicona	3	3	1	1	8

Tabla 38*Matriz de selección del controlador*

Alternativas \ Criterios	Fácil de programar	Fácil de conectar	Estético	Económico	Total
Arduino	3	3	2	3	11
PIC	1	1	3	2	7
PLC	2	2	1	1	6

Una vez que fueron realizadas las matrices de selección para el diseño de la cámara de curado, el diseño se define con las siguientes características, respecto a las alternativas de cada matriz de selección:

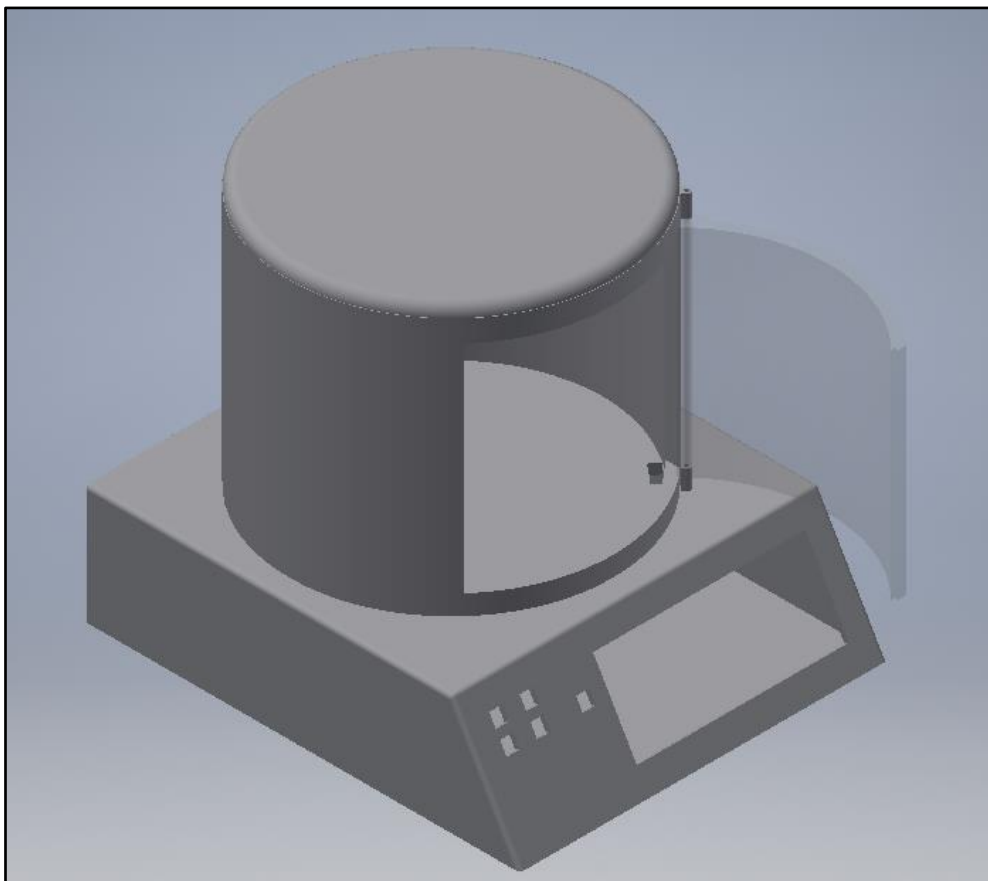
Tabla 39*Parámetros de diseño de la cámara de curado*

PARÁMETROS DE DISEÑO SELECCIONADOS	
Forma	Cilíndrica
Método de construcción	Impresión 3D
Material de construcción	ABS
Fuente de luz LED UV	Cinta con goma de silicona
Controlador	Arduino

Considerando la capacidad volumétrica de la impresora DLP, vista en la figura 22, que fue utilizada para la impresión de las probetas de resina, las dimensiones de la cámara se describen en la tabla 40.

Tabla 40*Dimensiones globales de la cámara de curado*

Longitud (mm)	201.75
Ancho (mm)	170
Alto (mm)	179.19

**Figura 98** Modelado tridimensional de la cámara de curado

4.2 Elementos, partes y componentes

4.2.1 Cámara de curado

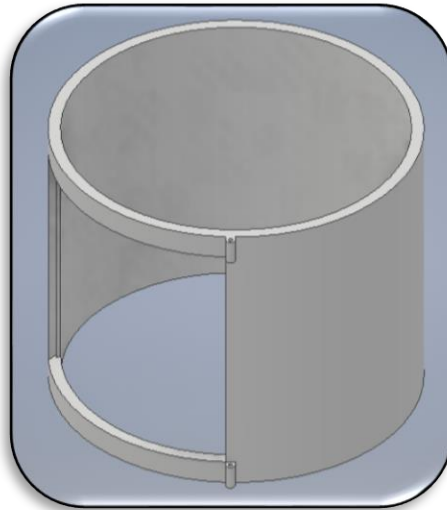


Figura 99 Cámara de curado

4.2.2 Puerta

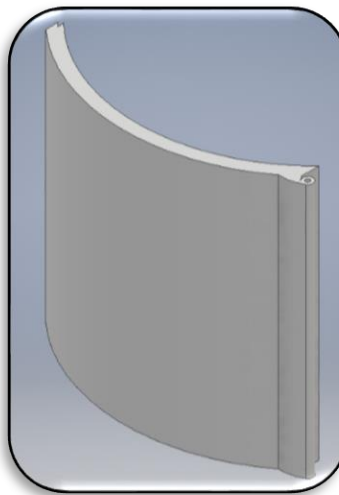


Figura 100 Puerta de la cámara de curado

4.2.3 Tapa

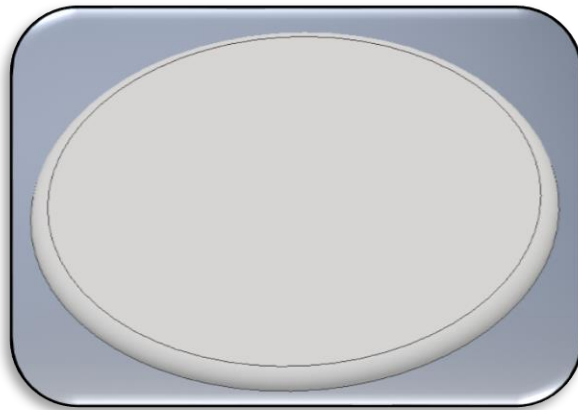


Figura 101 Tapa de la cámara de curado

4.2.4 Base

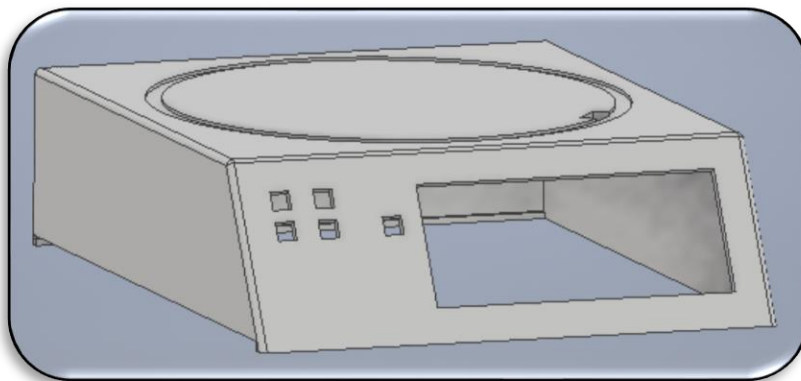


Figura 102 Base de la cámara de curado

4.2.5 Tapa de base

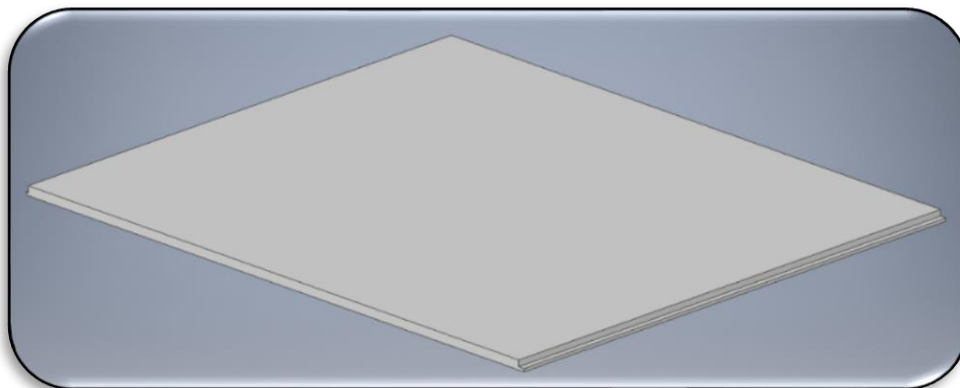


Figura 103 Tapa de la base

4.2.6 Pasador

Cantidad: 2

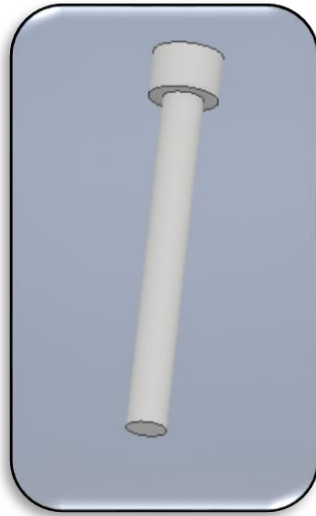


Figura 104 Pasador

4.2.7 Pulsadores

Cantidad: 5

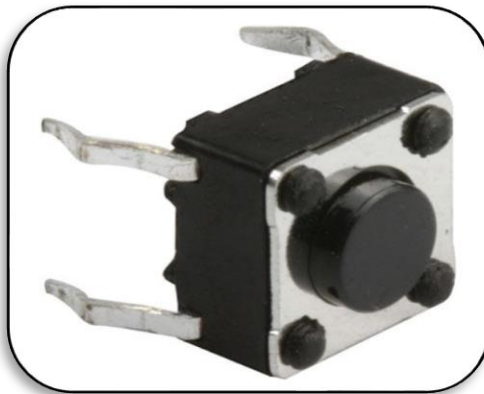


Figura 105 Pulsador de 4 pines

Fuente: (STEREN electronic solutions, 2018)

4.2.8 Pantalla LCD

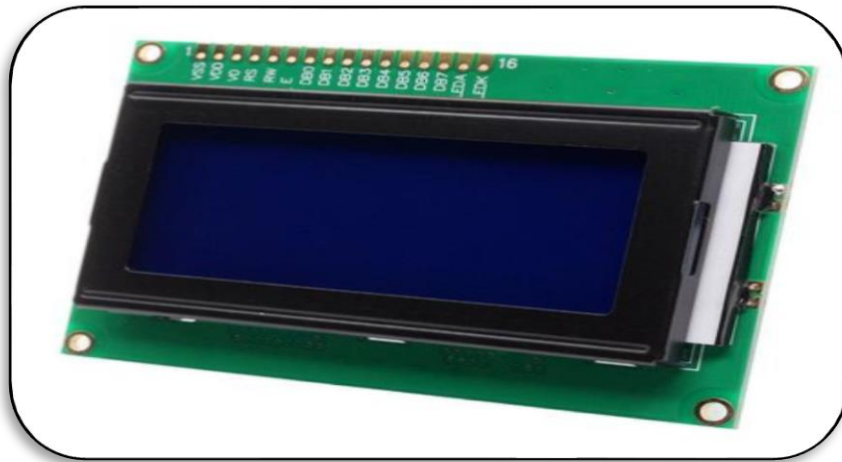


Figura 106 Pantalla LCD de 16 caracteres y 4 líneas

Fuente: (Future electronics, 2018)

4.2.9 Fuente de alimentación

Características:

- Voltaje: 12V
- Amperaje: 2A



Figura 107 Fuente de 12V DC

4.2.10 Protoboard

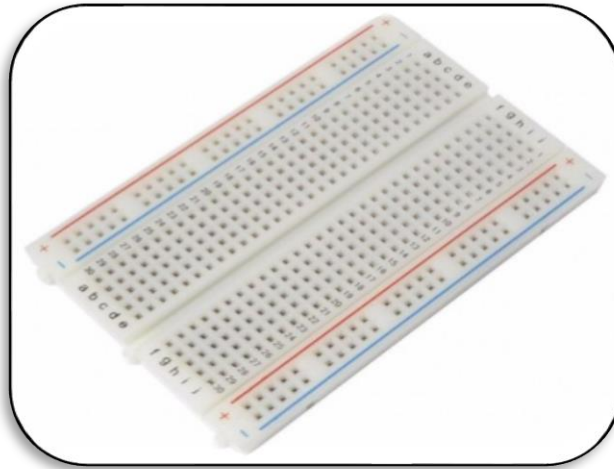


Figura 108 Protoboard de 400 puntos

Fuente: (i2C Electronics, 2018)

4.2.11 Cinta adhesiva de aluminio



Figura 109 Cinta adhesiva de aluminio

Fuente: (MERRITT SUPPLY, 2017)

4.3 Procedimiento de ensamblado

1. Se realizan las conexiones entre el Arduino, el protoboard, la pantalla, los pulsadores y los leds.
2. Se introducen los pulsadores en el lugar que corresponden en los agujeros cuadrados de la base, se hace lo mismo con la pantalla LCD y el conector de la fuente. Con silicona se fijan los botones y la pantalla a la base.

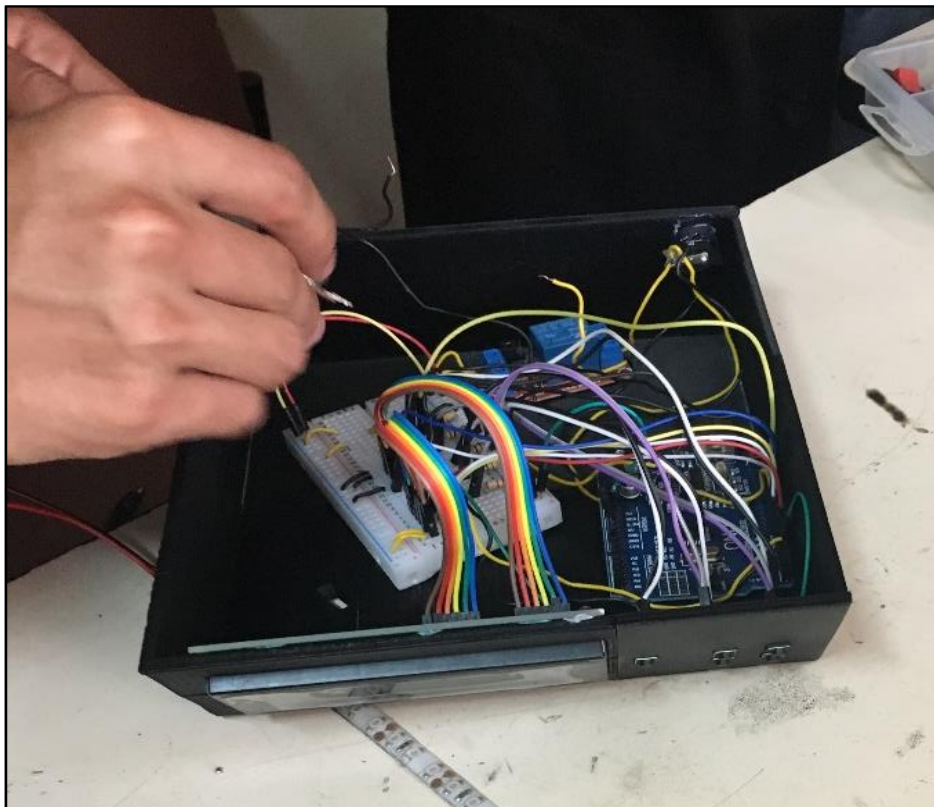


Figura 110 Fotografía durante la conexión de los elementos.

3. El Arduino y el protoboard se adhieren con silicona en el techo de la base, fijándolos para evitar desconexiones al manipular la cámara de curado.
4. Cortar 5 tramos de cinta LED de 30 cm.
5. Se hace una conexión en serie con los 5 tramos de cinta LED, usando soldadura de estaño y alambres de timbre, verificando la polaridad en cada extremo de los 5 tramos.
6. Se coloca silicona sobre cada soldadura para evitar roturas en el circuito y reducir el riesgo de desconexiones.
7. Una vez unidos los 5 tramos, se retira la protección de papel (ver figura 111) de cada una de las cintas para poder adherirlas en la cámara de curado. La

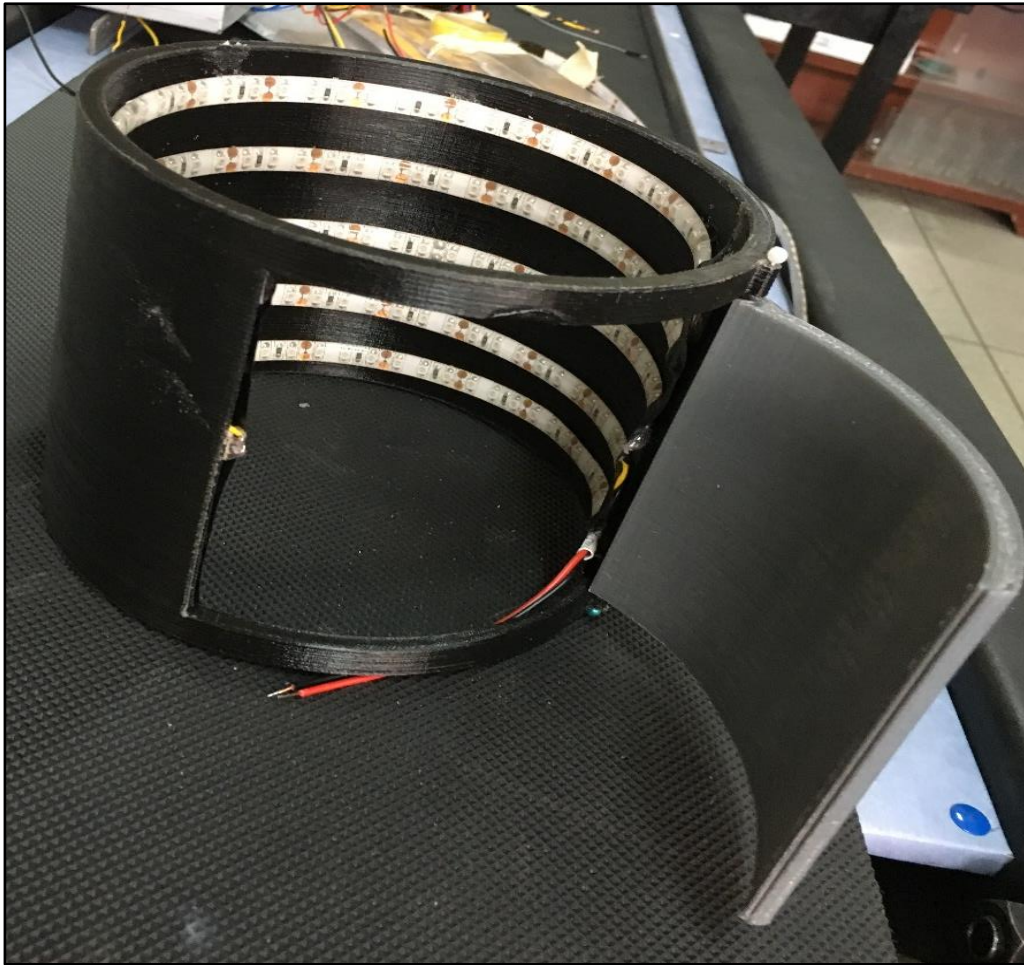


Figura 113 Cinta de LEDs adheridas en la cámara de curado. Puerta ensamblada.

8. Alinear los agujeros de la tapa con los agujeros de la cámara de curado e insertar los pasadores.
9. El conjunto de la cámara de curado y la tapa se insertan en el canal guía que tiene la base y se fija con pegamento (silicona caliente o pegamento fuerte).
10. El cable de alimentación de las luces LED pasa por el agujero de la base y es conectado al circuito de control.
11. Se pegan las tapas de la base y de la cámara de curado.
12. Finalmente se corta cinta adhesiva de aluminio y se pega en los espacios entre las cintas LED y todas las partes internas de la cámara de curado.

La cámara de curado completa se puede ver en la figura 114 y como ayuda visual del ensamble se puede ver la vista explotada de los elementos de la cámara de curado en la figura 115.

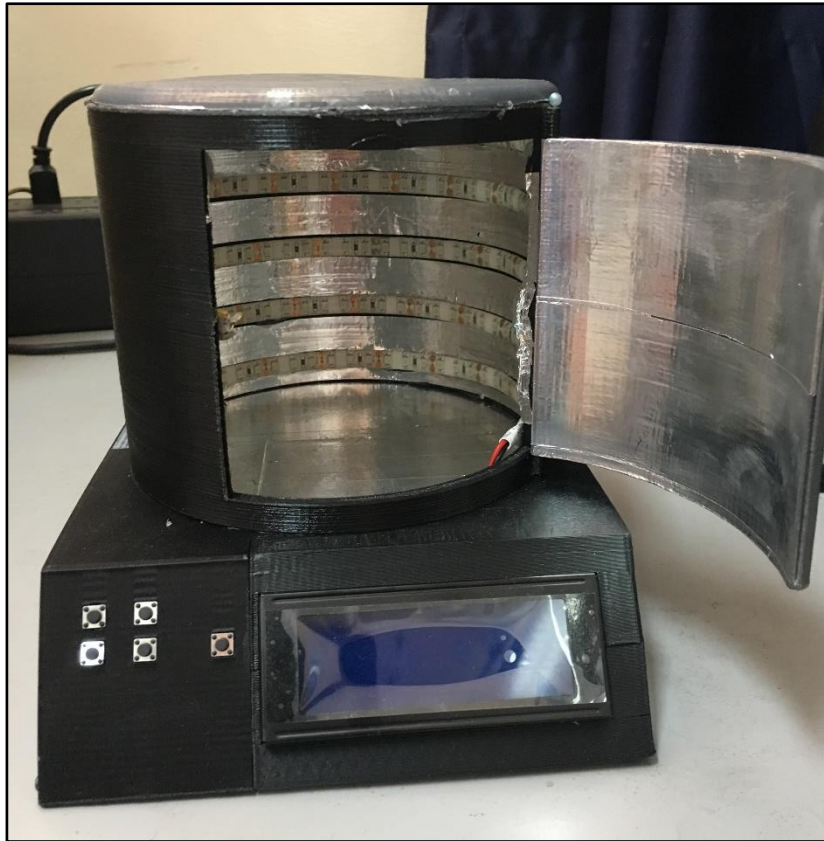


Figura 114 Cámara de curado armada totalmente

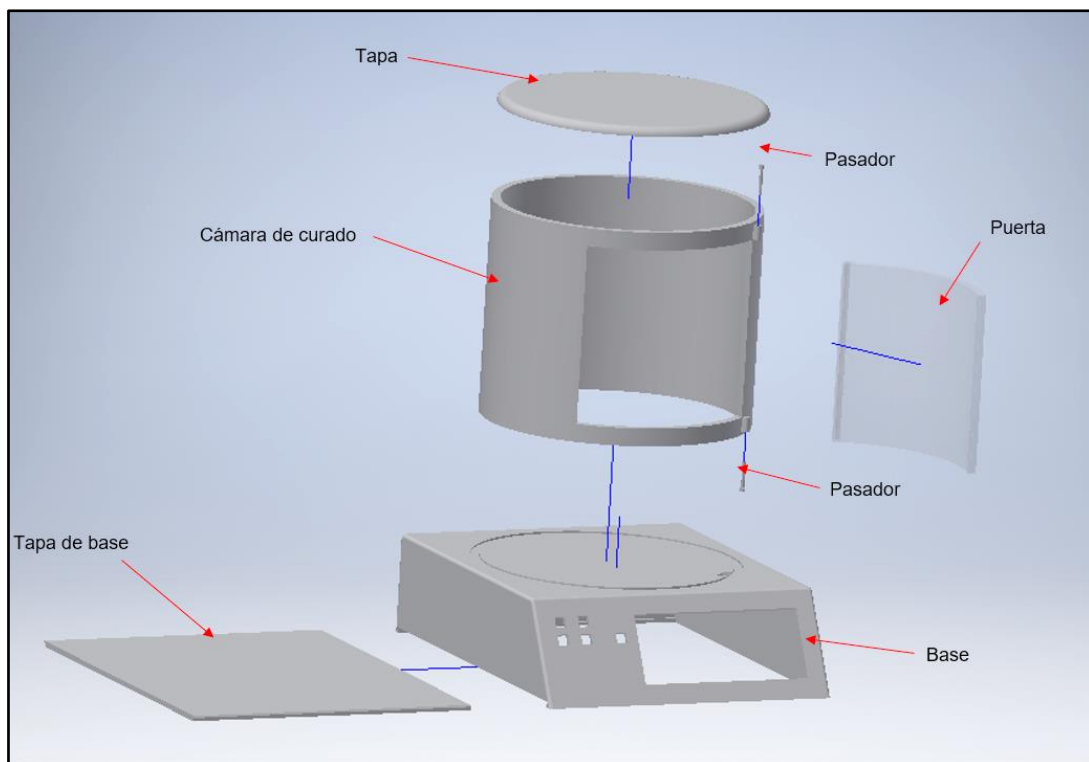


Figura 115 Vista explotada de las partes de la cámara de curado

Las conexiones que se realizan se muestran en el diagrama eléctrico de la figura 117.

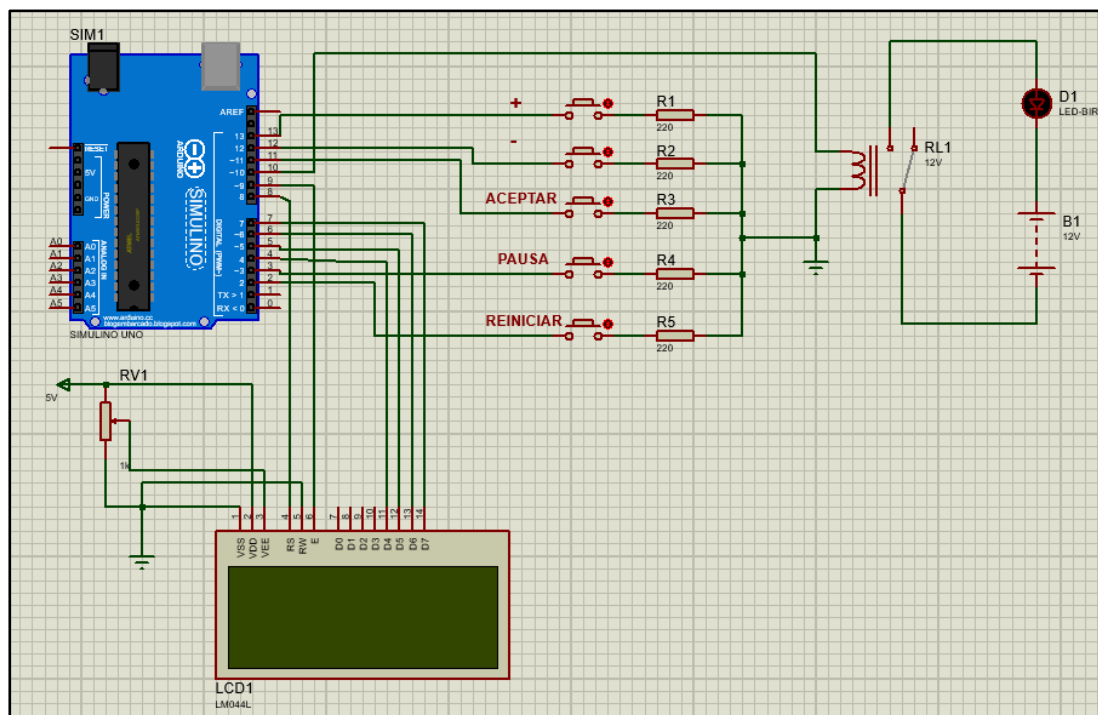


Figura 116 Diagrama eléctrico para la conexión del controlador de la cámara de curado

4.4 Modo de uso

El tiempo se define con los botones T+ y T-. Cada incremento o decremento serán de 1 minuto, teniendo un valor mínimo inicial de 1 minuto y un tiempo final sin definir; la pantalla muestra el tiempo que se está definiendo en ese momento.

Con el botón se acepta el valor de tiempo y los leds se encienden. El tiempo recorrido se muestra en pantalla, y cuando alcance el valor que fue definido los leds se apagarán.

Para pausar el proceso de curado se oprime el botón . El tiempo de curado quedará pausado y los leds apagados, hasta que se vuelva a oprimir el botón.

Durante la pausa se puede añadir o disminuir el tiempo con los botones T+ y T-, o también volver al valor inicial de tiempo. pulsando el botón

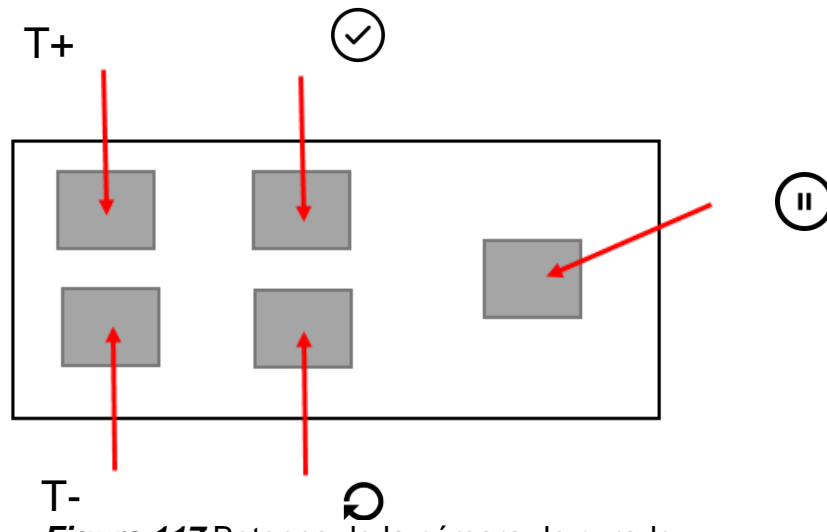


Figura 117 Botones de la cámara de curado

4.5 Lógica de programación

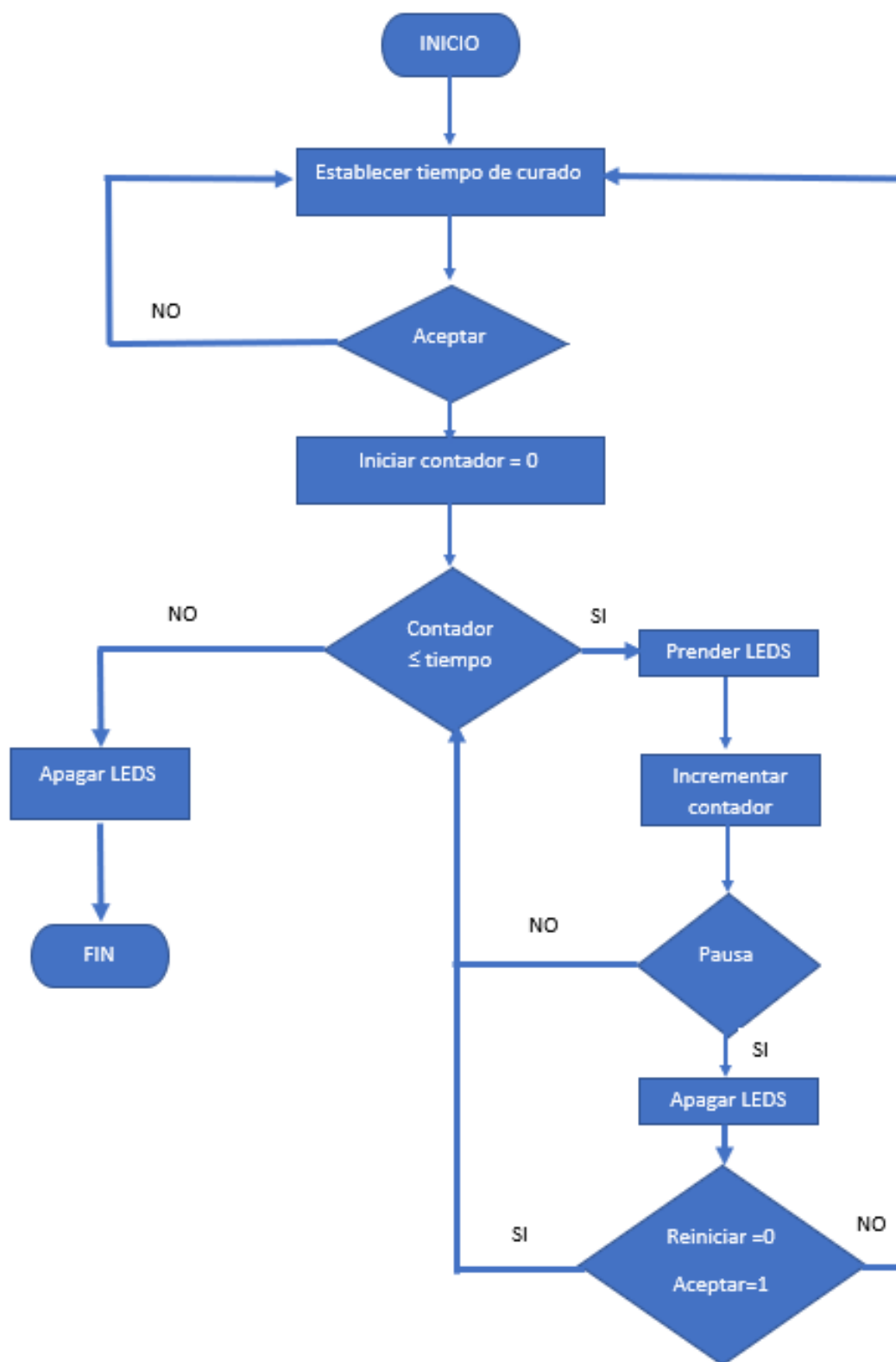


Figura 118 Lógica de programación de la cámara de curado

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Relación flexión vs dureza

5.1.1 PLA

Tabla 41

Flexión de menor a mayor en PLA

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Dureza Shore D
17	59.059	74.67
24	63.097	76
22	68.313	74

Tabla 42

Dureza de menor a mayor en PLA

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Dureza Shore D
7	56.872	77.33
10	58.05	78.67
20	51.534	79.67

5.1.2 ABS

Tabla 43

Flexión de menor a mayor en ABS

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Dureza Shore D
5	32.023	69.33
2	37.053	72.67
3	37.221	75

Tabla 44*Dureza de menor a mayor en ABS*

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Dureza Shore D
12	28.732	71
2	37.053	72.67
3	37.221	75

5.1.3 Resina**Tabla 45***Flexión de menor a mayor en resina*

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Dureza Shore D
8	30.793	79.67
2	32.204	68
9	38.203	81.67

Tabla 46*Dureza de menor a mayor en resina*

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Dureza Shore D
7	30.793	79.33
8	30.793	79.67
9	38.203	81.67

5.1.4 Análisis de flexión vs dureza

No existe una relación directamente proporcional entre fuerza de flexión y dureza para el PLA, sin embargo, para el ABS y la resina se nota una tendencia de una relación directamente proporcional.

5.2 Relación flexión vs tiempo de impresión

5.2.1 PLA

Tabla 47

Flexión de menor a mayor en PLA

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Tiempo (min)	Costo (USD)
17	59.059	13	0.65
24	63.097	13	0.65
22	68.313	14	0.7

Tabla 48

Tiempo de impresión de menor a mayor en PLA

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Tiempo (min)	Costo (USD)
1	55.021	11	0.55
2	36.849	11	0.55
3	39.28	11	0.55

5.2.2 ABS

Tabla 49

Flexión de menor a mayor en ABS

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Tiempo (min)	Costo (USD)
5	32.023	13	0.65
2	37.053	11	0.55
3	37.221	11	0.55

Tabla 50*Tiempo de impresión de menor a mayor en ABS*

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Tiempo (min)	Costo (USD)
1	19.597	11	0.55
2	37.053	11	0.55
3	37.221	11	0.55

5.2.3 Resina**Tabla 51***Flexión de menor a mayor en resina*

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Tiempo (min)	Costo (USD)
8	30.793	9.48	15.16
2	32.204	7.43	11.88
9	38.203	10.3	16.48

Tabla 52*Tiempo de menor a mayor en resina*

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Tiempo (min)	Costo (\$)
4	27.675	4.54	7.26
5	21.637	5.36	8.57
6	22.889	6.18	9.88

5.2.4 Análisis de flexión vs tiempo de impresión

No existe una relación directamente proporcional entre fuerza a flexión y el tiempo para el material ABS; en cambio para el material de PLA y resina se nota una tendencia a que exista una relación directamente proporcional. A su vez mientras más tiempo se demore en imprimir la pieza representa un mayor costo para su producción.

5.3 Relación fuerza vs deflexión

5.3.1 PLA

Tabla 53

Flexión de menor a mayor en PLA

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Esfuerzo (MPa)	Deflexión (mm)
17	59.059	68.119	18.166
24	63.097	72.777	18.444
22	68.313	78.793	17.62

Tabla 54

Deflexión de menor a mayor en PLA

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Esfuerzo (MPa)	Deflexión (mm)
3	39.28	45.306	20.422
23	34.076	39.304	20.507
6	28.201	32.527	23.364

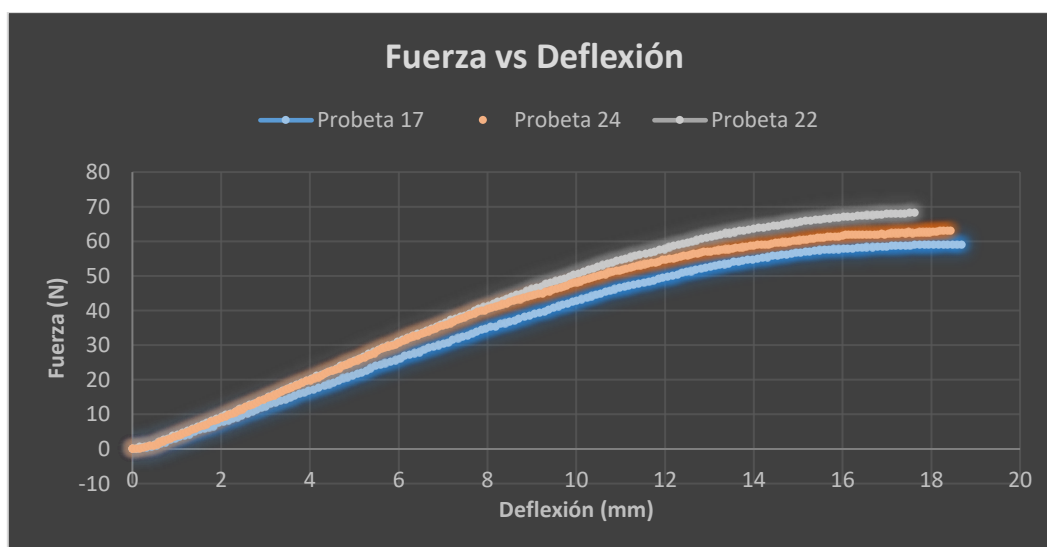


Figura 119 Fuerza vs deflexión de las 3 mejores probetas de PLA para fuerza de flexión.

Se observa en la figura 119 que con las 3 configuraciones tanto los valores de fuerza como de deflexión, son muy cercanos para las 3 probetas de PLA y se tiene una misma tendencia.

5.3.2 ABS

Tabla 55

Flexión de menor a mayor en ABS

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Esfuerzo (MPa)	Deflexión (mm)
5	32.023	36.936	17.98
2	37.053	42.737	16.689
3	37.221	42.931	17.005

Tabla 56

Deflexión de menor a mayor en ABS

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Esfuerzo (MPa)	Deflexión (mm)
14	25.472	29.691	20.318
10	26.69	30.785	20.564
7	31.894	36.787	20.651

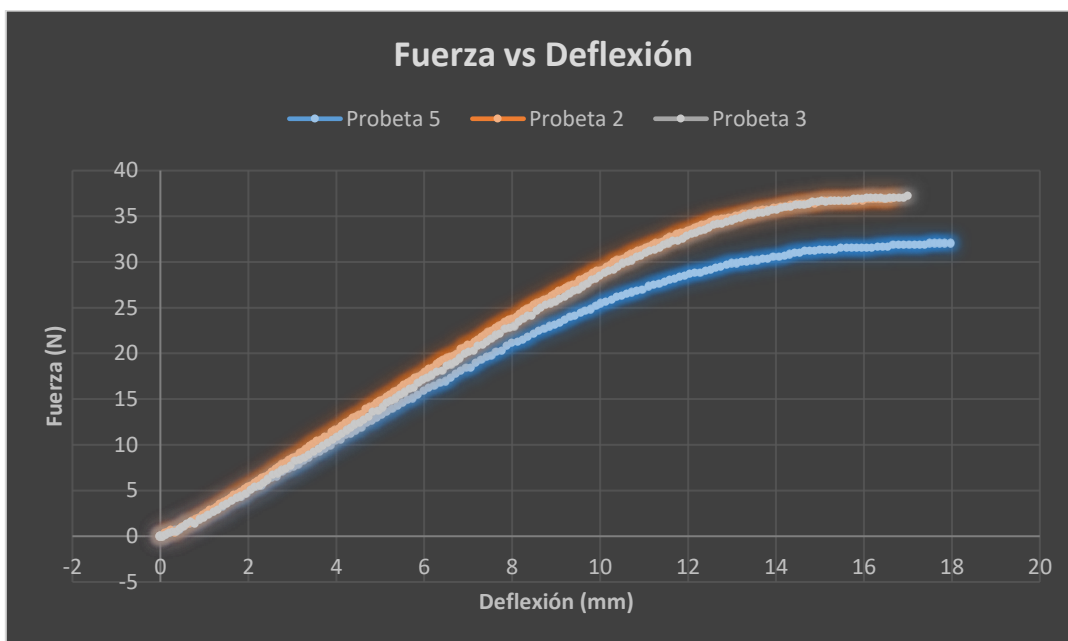


Figura 120 Fuerza vs deflexión de las 3 mejores probetas de ABS para fuerza de flexión.

Se observa en la figura 120 que los resultados para las probetas 2 y 3 son más cercanos en comparación con la probeta 5, tanto en fuerza como en deflexión.

5.3.3 Resina

Tabla 57

Flexión de menor a mayor en resina

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Esfuerzo (MPa)	Deflexión (mm)
8	30.793	17.758	5.28
2	32.204	18.572	4.617
9	38.203	22.032	10.042

Tabla 58

Deflexión de menor a mayor en resina

Número de Probeta	Fuerza Flexión (N)	Esfuerzo (MPa)	Deflexión (mm)
7	30.793	17.758	7.723
9	38.203	22.032	10.042
6	22.889	13.200	10.695

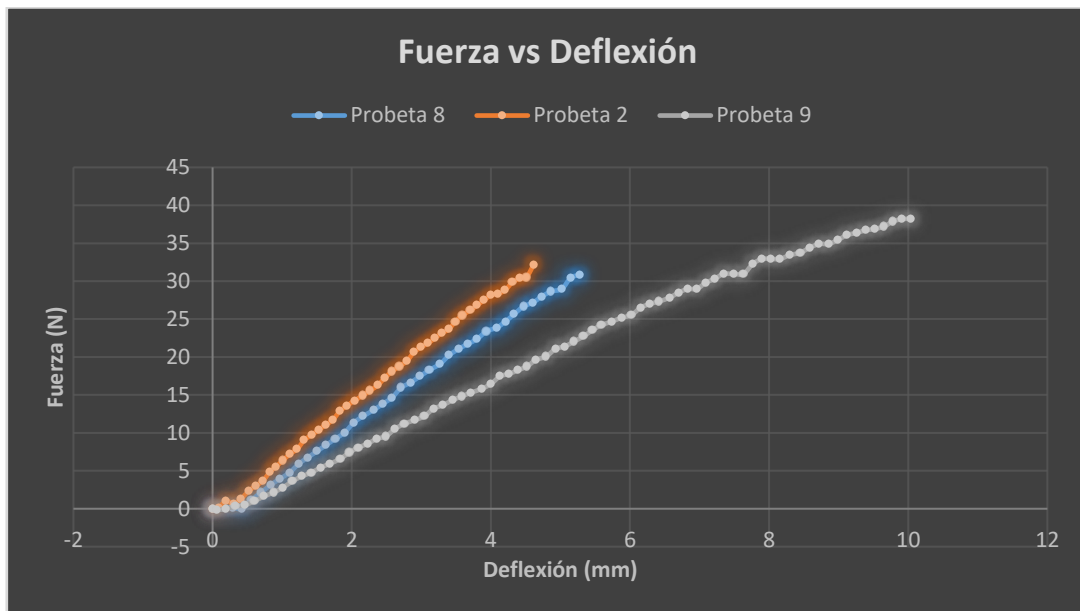


Figura 121 Fuerza vs deflexión de las 3 mejores probetas de resina en flexión.

Se observa en la figura 121 que la probeta 9 supera en deflexión a las probetas 2 y 8, sin embargo, en los resultados de fuerza, las 3 probetas tienen valores cercanos.

5.4 Cálculo de esfuerzos

5.4.1 Esfuerzo flector

$$\sigma = \frac{M \times c}{I} \quad (1)$$

Donde

σ = Esfuerzo Flector [MPa]

M = Momento Flector [N mm]

c = distancia de la línea neutra a la fibra más lejana [mm]

I = inercia [mm^4]

$$M = \frac{F \times L}{4} \quad (2)$$

Donde

L = longitud entre apoyos [mm]

F = Fuerza [N]

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (3)$$

5.4.2 Esfuerzo de tracción

5.4.2.1 PLA

Área sección transversal = ancho x espesor (4)

área sección transversal = 6mm x 4 [mm]

área sección transversal = 24 [mm²]

$$\sigma = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área sección transversal}} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{861.3[N]}{24[mm^2]}$$

$$\sigma = 35.88 [MPa]$$

5.4.2.1 ABS

Área sección transversal = ancho x espesor

área sección transversal = 6mm x 4 [mm]

área sección transversal = 24 [mm²]

$$\sigma = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área sección transversal}}$$

$$\sigma = \frac{593.97[N]}{24[mm^2]}$$

$$\sigma = 24.75 [MPa]$$

5.4.2.1 Resina

Área sección transversal = ancho x espesor

área sección transversal = 3.18mm x 4 [mm]

$$\text{área sección transversal} = 12.72 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área sección transversal}}$$

$$\sigma = \frac{357.33 \text{ [N]}}{12.72 \text{ [mm}^2\text{]}}$$

$$\sigma = 28.09 \text{ [MPa]}$$

5.4.3 Configuraciones optimizadas

Con las probetas impresas para tracción, utilizando las configuraciones de flexión máxima (tablas 16, 18 y 20), se obtienen los resultados del esfuerzo de tracción para los 3 materiales y se registran en la tabla 59.

Tabla 59

Resistencia a la tracción de las mejores configuraciones

Material	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)
Resina	357.33	28.09
ABS	593.97	24.75
PLA	861.3	35.88

Con las probetas impresas para flexión, utilizando las configuraciones de flexión máxima (tablas 16, 18 y 20), se obtienen los resultados del esfuerzo de flexión para los 3 materiales y se registran en la tabla 60.

Tabla 60

Resistencia a la flexión de las mejores configuraciones

Material	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)
Resina	38.203	21.92
ABS	39.05	45.05
PLA	76.91	88.73

Tabla 61
Mejora de resistencia a flexión

Material	Mejor ensayada (N)	Mejor configurada (N)	Mejora (%)
Resina	38.203	38.203	0.00
ABS	37.221	39.05	4.68
PLA	68.313	76.95	11.22

La tabla 61 muestra el porcentaje de mejora que se obtuvo al realizar los ensayos de flexión a las probetas con la mejor configuración predicha por las metodologías de experimentos, en comparación con la probeta que más resistencia tuvo durante los ensayos (tablas 16, 18 y 20).

5.5 Tratamiento de post curado con cámara de curado.

Con la configuración de flexión máxima en resina (tabla 20) se procede a imprimir probetas para flexión. Una vez impresa cada probeta ingresa en la cámara de curado en donde se le da un tratamiento de post curado en intervalos de tiempo definidos en la tabla 62. Se realiza el ensayo de flexión a las probetas tratadas y se registran los resultados también en la tabla 62.

Tabla 62

Tabla de resistencia a la flexión de Resina con tratamiento de luz UV

Tiempo (min)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)
15	41.12	23.72
30	42.299	24.40
45	44.131	25.46
60	47.129	27.19
75	64.282	37.08
90	73.441	42.36
120	75.112	43.33

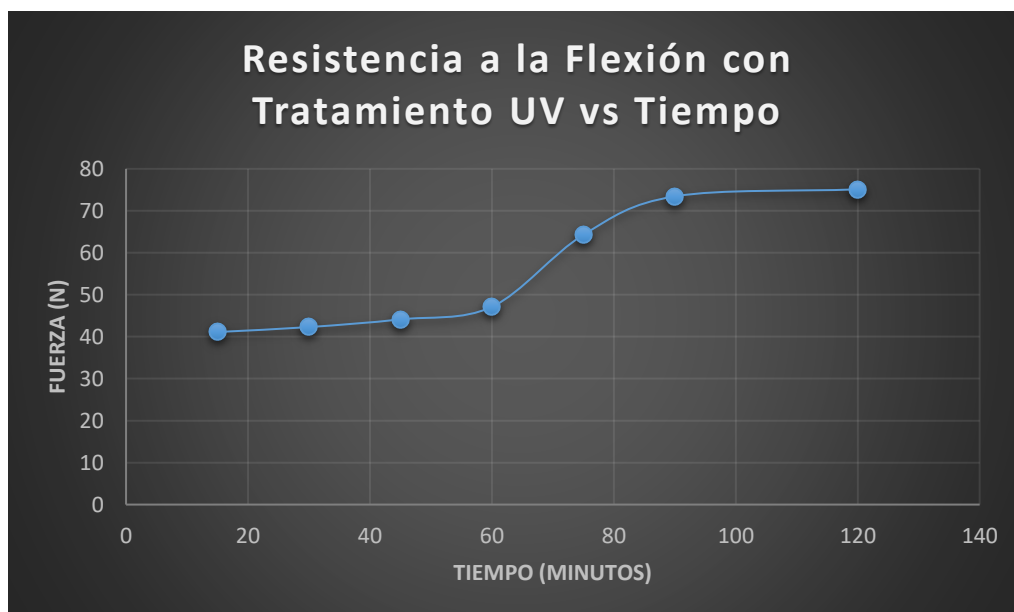


Figura 122 Fuerza de flexión vs tiempo de post curado con luz UV

Se observa en la figura 122 que tiempo de post curado con luz UV produce un cambio considerable cuando se realiza un tratamiento desde los 60 minutos, pero se estabiliza a los 120 minutos aproximadamente. Durante los primeros 60 minutos se tienen pequeños incrementos, pero no tienen un cambio tan considerable como se ve entre el minuto 60 y el 100.

Tabla 63*Mejora de resistencia a flexión en resina post curada.*

Tiempo (min)	Fuerza (N)	Mejora (%)
15	41.12	7.63552601
30	42.299	10.7216711
45	44.131	15.517106
60	47.129	23.3646572
75	64.282	68.2642724
90	73.441	92.2388294
120	75.112	96.6128315

Considerando el valor más alto de resistencia a la flexión en las probetas de resina, 38.203 N según la tabla 57, se obtienen los porcentajes de mejora en la resistencia a la flexión después de realizar un tratamiento de post curado a diferentes tiempos. Estos resultados se registran en la tabla 63.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se comprobó que la metodología de superficie de respuesta es más exacta que la metodología Taguchi, debido a que es posible definir variables categóricas o atributos (patrón de relleno) que con Taguchi no es posible, por lo que se puede obtener un mayor ajuste del modelo con los datos experimentales.
- Para el ensayo de dureza no se puede tener lecturas 100% viables cuando se trata de probetas de ABS y PLA, ya que existen, en el relleno de las capas, vacíos acordes al porcentaje de relleno configurado, por lo que el indentador suele penetrar espacios vacíos a medida que el porcentaje de relleno es menor.
- Se comprobó que al realizar un post tratamiento de curado con luz UV a las probetas impresas con resina fotosensible, se mejora la resistencia a la flexión notablemente a partir del minuto 60 con un incremento del 68.26%, hasta un valor del 96.61% de mejora en el min 120, donde llega a estabilizarse la resistencia a la flexión.
- Las configuraciones optimizadas pueden verse afectadas por la poca exactitud que presenta la impresora DLP, debido a que no tiene un sensor que controle el nivel de resina alineado a la placa base, y por ende las impresiones presentan variación en su espesor o altura.
- No existen interacciones donde intervenga el factor “patrón de relleno” debido a ser un factor categórico o atributo, por lo tanto, la metodología RSM no puede establecer gráficas de superficie ni de contorno para este factor.
- Se evidenció un incremento de resistencia a la flexión con las configuraciones optimizadas para el ABS y el PLA, dando un incremento del 4.68% para el ABS y de 11.22% para el PLA, con respecto a las probetas que más resistieron durante la obtención de datos en el experimento.
- La mejor configuración que se obtuvo con las metodologías utilizadas para la resina resultó la misma que estaba ya definida en el arreglo al diseñar el

experimento, por lo que se utiliza el mismo valor de resistencia a la flexión, por lo que la mejora es del 0%.

- Se concluye que en ambas metodologías (Taguchi y superficie de respuesta), tanto para flexión como para dureza, el factor más significativo es “densidad de relleno” para PLA, “primera capa” para ABS y “tiempo de curado” para resina.
- Las configuraciones de impresión en PLA, ABS y resina, para obtener la mejor resistencia a la flexión fueron definidas y registradas en las tablas 17, 19 y 21 respectivamente para la metodología Taguchi y las tablas 28, 29 y 30 respectivamente, para la metodología de superficie de respuesta.
- Las configuraciones de impresión en PLA, ABS y resina, para obtener la máxima dureza fueron definidas y registradas en las tablas 23, 25 y 27 respectivamente, para la metodología Taguchi, y las tablas 31, 32 y 33 respectivamente, para la metodología de superficie de respuesta.
- Se observó que en las probetas que presentan una mayor deflexión soportaban una menor fuerza, esto se debe a que dichas configuraciones otorgan una mayor ductilidad, por lo que podían deformarse sin llegar a la rotura.
- Se comprobó que en la relación flexión vs dureza existe una tendencia directamente proporcional para el ABS y la resina; en la relación flexión vs tiempo de impresión la tendencia es directamente proporcional para el PLA y la resina.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda:

- Realizar la misma experimentación utilizando diseños diferentes a *Response Surface Methodology* y Metodología Taguchi, como por ejemplo un diseño Factorial, para verificar si el modelo puede ajustarse mejor.
- Adaptar un sensor a la plataforma de impresión en la impresora DLP, que detecte la resina, para que esté definido automáticamente el punto inicial de impresión.
- Realizar el mismo estudio utilizando los mismos materiales (PLA, ABS y resina) de diferentes proveedores y con diferentes impresoras, para verificar la tendencia de estos resultados.

- Que, con los arreglos ortogonales definidos con el diseño de experimentos, imprimir varias muestras para cada una de las probetas de los arreglos para poder realizar un análisis de desviación estándar antes de analizar los datos con las metodologías utilizadas.
- Controlar los factores ambientales, como la humedad y la temperatura, para evitar factores que influyan en el desempeño de los materiales durante la impresión y los ensayos mecánicos que se realicen.
- Ampliar el estudio realizado utilizando otros parámetros que las impresoras disponen, como la cantidad de capas solidas en el relleno, ángulos de impresión, velocidades de movimiento de extrusores, temperaturas de cama y extrusor, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- AFIZAH, I., N , S., & IBRAHIM, M. (2017). *Optimization of process parameter for digital light processing (DLP) 3D printing*. Malaysia. Obtenido de http://www.worldresearchlibrary.org/up_proc/pdf/803-149222645411-14.pdf
- Almeida, L., & Castillo, W. (2015). *Diseño y construcción de un equipo de impresión 3D con resina fotosensible UV para elaborar prototipos de piezas por medio del proceso DLP*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecánica.
- Álvarez, K., Lagos, R., & Aizpun, M. (2017). *SciELO*. Obtenido de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052016000500003
- ASTM. (2016). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/standardization-news/?q=outreach/astm-international-and-iso-unveil-framework-global-3d-printing-standards-nd16.html>
- ASTM D638-14. (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken. doi:10.1520/D0638-14
- ASTM D790-17. (2017). *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. West Conshohocken. doi:10.1520/D0790-17
- Bernal, J. (6 de Noviembre de 2012). *PDCA Home*. Obtenido de <https://www.pdcahome.com/2117/disenio-de-experimentos-para-que-sirve-y-como-realizarlo/>
- Cantrell, J., Rohde, S., & Damiani, D. (2017). *Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts*. Gainesville.
- Formlabs. (2016). *Clear Photopolymer Resin for Form 1+ and Form 2-FLGPCL03 MATERIAL PROPERTIES*. Somerville. Obtenido de <https://formlabs.com/media/upload/Clear-DataSheet.pdf>
- Future electronics*. (2018). Obtenido de <https://store.fut-electronics.com/products/character-lcd-module-16-char-x-4-lines>
- Herratec. (s.f.). *Herratec*. Obtenido de www.tienda.herratec.com.co/home/2529-durometro-portatil-shore-d-para-plasticos.html
- HXX. (6 de Abril de 2015). *HXX*. Obtenido de Blog de HXX: <http://hxx.es/2015/04/06/materiales-de-impresion-3d-iii-resinas-fotopolimericas/>
- i2C Electronics*. (2018). Obtenido de <http://i2celectronica.com/protoboards-placas-pcb/98-protoboard-400-puntos.html>
- ikasLab. (27 de Febrero de 2015). *ikasLab*. Obtenido de http://wiki.ikaslab.org/index.php/Impresión_3D_paso_a_paso
- Kalodny, L. (2015). *TC*. Obtenido de Tech Crunch: <https://techcrunch.com/2016/09/15/carbon-3d-raises-81-million-for-international-expansion-of-its-rapid-3-d-printing-tech/>
- Makerbot. (2017). *Makerbot*. Obtenido de <https://store.makerbot.com/printers/replicator2x/>
- Marcos, A. (1 de Noviembre de 2013). *teleco-to-walk*. Obtenido de Wordpress Blog: <https://telecotowalk.wordpress.com/2013/11/01/la-historia-del-futuro-industrial-como-surgio-la-impresion-3d/>
- Martins, D., Pereira , D., & Gonçalves , G. (2016). Caracterización de las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba abs confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3d. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 303-309.

- MERRITT SUPPLY. (2017). Obtenido de <https://www.merrittsupply.com/product/3m-scotch-aluminum-foil-tape-425/>
- Siim and Co., S.L. (2012). *Propiedades físicas y mecánicas materiales [RAE-1018]*. Barcelona. Obtenido de www.siim.com/docs/RAE-1018.pdf
- Soporte de Minitab 18. (2017). *Soporte de Minitab*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/>
- Statgraphics.Net. (2011). *Statgraphics*.
- STEREN electronic solutions. (2018). Obtenido de www.newteksupply.com/Steren-SPST-2P-12V-NO-Tactile-Micro-Switch_p_21600.html
- Wikiwand. (s.f.). *Pinterest*. Obtenido de <https://www.pinterest.com.mx/pin/365636063480560325/>
- Zguris, Z. (2017). *How Mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing*. USA. Obtenido de <https://formlabs.com/media/upload/How-Mechanical-Properties-of-SLA-3D-Prints-Are-Affected-by-UV-Curing.pdf>