



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de los parámetros de impresión 3D del ácido poliláctico ligero (LW-PLA) sobre las características finales del producto

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jorge Gallego Veiga
DIRECTORES: Andrés Suárez García
Carlos Casqueiro Placer
CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de los parámetros de impresión 3D del ácido poliláctico ligero (LW-PLA) sobre las características finales del producto

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El sector de la impresión 3D es un ámbito todavía en desarrollo del que quedan muchas técnicas, materiales y usos por explorar. Ya que, desde hace unos años atrás, la impresión 3D no está limitada al uso decorativo o al de ser meramente un pasatiempo más. Sino que se ha convertido en un pilar fundamental de las grandes industrias productoras. El fin último de esta tecnología es el de conseguir dar al usuario un producto totalmente personalizable, con una rapidez de producción con la que los proveedores y medios de reparto actuales no pueden competir. En busca de esa personalización entra en juego la amplia cantidad de materiales disponibles en el mercado, los distintos medios de impresión y la configuración final de las impresoras.

En este último punto se centró este trabajo, en el que se analizó el LW-PLA, que es un material prometedor, pero del que no existía bibliografía formal en el momento de realización del TFG. Se buscó la configuración óptima de los parámetros de impresión para obtener una dureza Shore de 27, una expansión superior al 260% (un incremento del 900%), una fiabilidad dimensional respecto al modelo inferior al 20% (una mejora del 536%) y una resistencia a tracción de hasta 633N (un aumento del 66%). Teniendo como referencia del incremento el peor resultado del espacio analizado.

Los resultados y conclusiones, a las que se llegan en este documento, pretenden ser y convertirse en una guía fiable y al alcance de cualquiera, para ser fuente de solución para las dudas acerca de cuál debería de ser la configuración de la impresora 3D que disponga, en función de cuál sea el uso final de sus piezas impresas.

PALABRAS CLAVE

LW-PLA, ensayo, experimentación FDM, impresión 3D

CONTENIDO

Contenido	I
Índice de Anexos	V
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas.....	IX
Índice de Ecuaciones	XI
Glosario	XIII
1 Introducción y objetivos.....	1
1.1 Contextualización.....	1
1.2 Motivación	2
1.3 Objetivos	2
2 Estado del arte	3
2.1 Historia de la impresión 3D	3
2.1.1 Orígenes de la impresión 3D.....	3
2.1.2 Hitos relevantes	4
2.2 Principales tipos de impresión 3D	4
2.2.1 Estereolitografía (SLA)	5
2.2.2 Procesamiento digital de luz (DLP)	5
2.2.3 Estereolitografía en máscara (MSLA).....	6
2.2.4 Fusión de polvo (SLS).....	6
2.2.5 Fusión por haz de electrones (EBM).....	7
2.2.6 Inyección de aglutinante (BJ).....	8
2.3 FDM.....	8
2.3.1 Componentes de una impresora FDM.....	9
2.3.2 Popularidad de FDM	10
2.3.3 Principales fallos en impresión FDM.....	11
2.3.4 En lo que se refiere a fallos que faciliten la rotura de la pieza.....	11
2.3.5 LW-PLA.....	13
3 Desarrollo del TFG.....	15
3.1 Método de análisis	15
3.1.1 Metodología RSM	15
3.1.2 Diseño de Box-Behnken.....	16
3.2 Método de trabajo	17
3.3 Fase 1 de laboratorio	19

3.3.1	Toma de datos 1	19
3.3.2	Optimización de la Fase 1	21
3.3.3	Totalidad de los datos de la Fase 1	23
3.3.4	Errores de la Fase 1	23
3.4	Fase 2 de laboratorio	25
3.4.1	Región 1-1	25
3.4.2	Región 1-2	26
3.4.3	Región 1-3	26
3.4.4	Errores de la Fase 2	27
3.5	Fase 3 de laboratorio	27
3.5.1	Fase 3 - Variación De Espesor	27
3.5.2	Datos acumulados De La Fases 1, 2 y 3 - Variación De Espesor	28
3.5.3	Datos acumulados De La Fases 1, 2 y 3 - Expansión.....	28
3.5.4	Datos de la Dureza	29
3.5.5	Errores de la Fase 3	30
3.6	Fase 4 de laboratorio	30
3.6.1	Región 2-1	33
3.6.2	Región 2-2	34
3.6.3	Región 2-3	34
3.6.4	Errores de la Fase 4	35
4	Resultados	37
4.1	Variación del espesor	37
4.1.1	Análisis de la Fase 1	37
4.1.2	Análisis de la Fase 2	39
4.1.3	Análisis de la Fase 3	42
4.1.4	Análisis global de la variación del espesor	43
4.2	Expansión.....	45
4.2.1	Análisis de la Fase 1	45
4.2.2	Análisis de la Fase 2	46
4.2.3	Análisis de la Fase 3	47
4.2.4	Análisis global de la variación de la expansión	47
4.3	Ensayo de dureza	48
4.4	Ensayo de tracción	50
4.5	Globales	52
5	Conclusiones y líneas futuras	53
5.1	Conclusiones	53

5.1.1	Conclusiones para la variación de espesor	53
5.1.2	Conclusiones para la expansión	54
5.1.3	Conclusiones para la dureza	54
5.1.4	Conclusiones para la resistencia a tracción	54
5.1.5	Conclusiones para la situación global	54
5.2	Líneas futuras	55
6	Bibliografía.....	57

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I: Método De Ensayo De Dureza Shore.....	61
Anexo II: Ultimaker Cura.....	63
Anexo III: Conceptos de Estadística	69
Anexo IV: Superficies De Respuesta	71
Anexo V: Tablas ANOVA	89
Anexo VI: Diagramas de Contorno.....	97
Anexo VII: Diagramas De Pareto	111
Anexo VIII: Ensayo De Tracción.....	119
Anexo IX: Ecuaciones Obtenidas.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Logo ColorFabb. [1]	1
Figura 2-1: Domo diseñado por Françoise Willeme para su proceso de "Photoesculpture". [3]	3
Figura 2-2: Impresora REPRAP. [7]	4
Figura 2-3: Resina fotosensible para impresión SLA. [14]	5
Figura 2-4: Figura impresa por SLA. [14]	5
Figura 2-5: Esquema SLA vs DLP. [15]	6
Figura 2-6: Diferencia de calidad entre SLA y DLP. [14]	6
Figura 2-7: Pieza impresa con SLS. [18]	7
Figura 2-8: Esquema impresora MSLA. [16]	7
Figura 2-9: Pieza impresa por EBM. [14]	8
Figura 2-10: Impresora Ultimaker Extended 3	8
Figura 2-11: Base Calefactable.	9
Figura 2-12: Detalle de los cabezales de extrusión.	9
Figura 2-13: Soporte de la bobina del material y detalle del empujador del filamento.	10
Figura 2-14: Sistema de movimiento de las boquillas extrusoras.	10
Figura 2-15: Comparativa de calidades de impresión en distintos procesos. [19]	10
Figura 2-16: Despegue de la cama caliente pieza azul VS Delaminación pieza rosada. [21]	11
Figura 2-17: Ejemplo de desplazamiento de capas. [22]	12
Figura 2-18: Ejemplo de gota negra. [25]	12
Figura 2-19: Fallo por formación de hilos. [24]	13
Figura 3-1: Ejemplo diseño Box-Behnken. [28]	16
Figura 3-2: Aclaración de las Fases sobre ΔV (%).	17
Figura 3-3: Probetas de la "Fase 1".	18
Figura 3-4: Probeta modelo para el ensayo de tracción.	19
Figura 3-5: Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1	20
Figura 3-6: Errores de impresión en distintos puntos de la Región 1-1.	23
Figura 3-7: Fallo de impresión 3-36 (izq.) y reimpresión 3-36 (der.)	24
Figura 3-8: Defecto de calidad probeta 3-35.	24
Figura 3-9: Vista previa sobre la ΔV (%) de la Fase 2.	25
Figura 3-10: Laca adhesiva para la base de impresión.	27
Figura 3-11: Probeta genérica de la Fase 4.	28
Figura 3-12: Fallo por <i>Z-wobbling</i> en la probeta 2-111.	30
Figura 3-13: Vista previa sobre expansión de la Fase 3.	30
Figura 3-14: Montaje con reloj comparador.	31

Figura 3-15: Esquema del divisor de tensión.	31
Figura 3-16: Proceso de calibración.	32
Figura 3-17: Calibrado de la FSR.	33
Figura 3-18: Ensayo de tracción de la probeta 4/1.	35
Figura 3-19: Montaje final sobre el sensor.	36
Figura 3-20: Colección de probetas muestreadas en la Fase 4.	36
Figura 4-1: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1.	37
Figura 4-2: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Optimización Fase 1.	38
Figura 4-3: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Fase 1 completa.	38
Figura 4-4: Diagrama de Pareto para la Región 1-1.	39
Figura 4-5: Diagrama de Pareto para la Región 1-2.	39
Figura 4-6: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Región 1-1.	40
Figura 4-7: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Región 1-2.	41
Figura 4-8: Diagrama de Pareto de la Región 1-3.	41
Figura 4-9: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Región 1-3.	42
Figura 4-10: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 3.	42
Figura 4-11: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Región 1-1 y Fase 3.	43
Figura 4-12: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1,2 y 3.	43
Figura 4-13: Detalle de la Figura 4-12 zonas de menor ΔV (%).	44
Figura 4-14: Diagrama de Pareto de la Tabla Anexo V- 10.	44
Figura 4-15: Diagrama de contorno de h (mm) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1,2 y 3.	45
Figura 4-16: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a Exp (%) Fase 1.	45
Figura 4-17: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a Exp (%) de la Fase 1 completa.	46
Figura 4-18: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a Exp (%) de la Fase 1 y 2 completa.	46
Figura 4-19: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a Exp (%) Fase 3.	47
Figura 4-20: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a Exp (%) Fase 1,2 y 3.	47
Figura 4-21: Diagrama de Pareto de las Fases 1, 2 y 3.	48
Figura 4-22: Diagrama de Pareto de la Tabla 4-4.	49
Figura 4-23: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a Dureza.	49
Figura 4-24: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a F (N) de la Región 2-1.	50
Figura 4-25: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a F (N) de la Región 2-2.	50
Figura 4-26: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a F (N) de la Región 2-3.	51
Figura 4-27: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a F (N) de la Fase 4.	51
Figura 4-28: Superposición de resultados.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Modelo de la ΔV (%) Fase 1.....	20
Tabla 3-2: Modelo de la Exp (%) Fase 1.....	21
Tabla 3-3: Modelo de la ΔV (%) Optimización Fase 1.....	22
Tabla 3-4: Modelo de la Exp (%) Optimización Fase 1.....	22
Tabla 3-5: Modelo de la Región 1-1.....	25
Tabla 3-6: Modelo de la Región 1-2.....	26
Tabla 3-7: Modelo de la Región 1-3.....	26
Tabla 3-8: Modelo de la Fase 3.....	27
Tabla 3-9: Registro de datos de dureza de las Fases 1, 2 y 3.....	29
Tabla 3-10: Resultados de la calibración.....	33
Tabla 3-11: Modelo de la Región 2-1.....	34
Tabla 3-12: Modelo de la Región 2-2.....	34
Tabla 3-13: Modelo de la Región 2-3.....	35
Tabla 4-1: ANOVA de la Región 1-1.....	40
Tabla 4-2: ANOVA de la Región 1-2.....	40
Tabla 4-3: ANOVA de la Región 1-3.....	41
Tabla 4-4: ANOVA con los datos de la dureza.....	48
Tabla 5-1: Máximo de variación de espesor.....	53
Tabla 5-2: Parámetros para $\Delta V = 0$	54
Tabla 5-3: Máximo de expansión.....	54
Tabla 5-4: Máximo de dureza.....	54
Tabla 5-5: Máximo de resistencia a tracción.....	54
Tabla 5-6: Impresión óptima para diseños sin esfuerzos tensionales.....	54
Tabla 5-7: Impresión óptima para diseños resistentes.....	55

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1: Función genérica en dos variables más ruido experimental.....	15
Ecuación 3-2: Cálculo de la variación de espesor.....	17
Ecuación 3-3: Cálculo de la expansión.....	17
Ecuación 3-4:Relación de voltajes de un divisor de corriente.....	32
Ecuación 3-5: Valor de la FSR.....	32
Ecuación 3-6: Represión lineal que modela la FSR.....	33
Ecuación 5-1: Predicción del espesor final.....	53

GLOSARIO

	#	
#		
Nº de Registro		19
	Δ	
ΔV		
variación de espesor		18
	A	
ANOVA		
por sus sigloides en inglés, ANalysis Of VAriance		69
	B	
BJ		
Del inglés, Binder Jetting		8
	D	
DLP		
Del inglés, Digital Light Processing		5
	E	
EBM		
Del inglés, Electron-Beam Melting		7
Exp (%)		
Expansión en %		18
Extrusión		
Proceso por el cual se crean perfiles determinados ejerciendo presión sobre el material base haciéndolo pasar por un dado		12
	F	
FDM		
Del inglés Fused Deposition Modeling		4
FLUJO		
En impresión FDM es el porcentaje de filamento que transcurre por el extrusor en comparación con lo que sería una impresión normal		17
FSR		
Del inglés Interfacing Force Sensing Resistor, que significa resistencia variable por presión		31
	H	
h		
Altura de capa en mm		18
	I	
Industria 4.0		
Esta revolución se considera que acaba de comenzar y está marcada por la aparición de nuevas tecnologías como la robótica, la analítica, la inteligencia artificial, las tecnologías cognitivas, la nanotecnología y el Internet of Things (IoT) . Añadiendo que todas ellas deben estar trabajando de manera colaborativa		3
	L	
LCD		
Del inglés, Liquid-Crystal Display		6
LW-PLA		
Del inglés, Light Weight-PLA		8

M	
MSLA	
Del inglés, Masked SLA.	6
P	
Photoesculpture	
Concepto creado por Françoise Willeme, en el cual se crearon imágenes en 3D por primera vez, con fines meramente artísticos.	3
R	
RSM	
Del inglés Response Surface Methodology.	15
S	
SLA	
En inglés, Stereo Litography Apparatus- o SL.	4
SLS	
Del inglés Selective Laser Sintering.	4
T	
T	
Temperatura en°C.	18
U	
UAV's	
Del inglés, Unmanned Arial Vehicle.	2
Ultimaker Extended 3	
hacer el matiz de que la única diferencia frente a la Ultimaker 3, es que en el modelo del estudio el volumen de impresión que se puede alcanzar es mayor.	17
USC	
Universidad de Santiago de Compostela.	4
UV	
Se denomina radiación ultravioleta o radiación UV a la radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 100 nm y los 400 nm.	4
Φ	
Φ	
Flujo en %	19

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Este trabajo de fin de grado pretende dar solución a la incógnita de como imprimir el LW-PLA en una máquina de FDM.

1.1 Contextualización

El LW-PLA es un material todavía en “descubrimiento”. Con esto se pretende decir que no hay mucha información en la red ni en publicaciones a cerca de su comportamiento en impresión 3D. Pero lo poco que se puede encontrar es prometedor y ya hay ciertos fabricantes como Colorfabb [1] que ofrecen este material como la solución a la problemática del peso en la impresión de modelos ligeros.



Figura 1-1: Logo ColorFabb. [1]

Parece extraño que, a pesar de ser los propios fabricantes, quienes son los más interesados en ofrecer todas las características del LW-PLA no hayan realizado ensayos y publicado los resultados para así facilitar su venta y atractivo. Pero viendo la comunidad que envuelve el sector de la impresión 3D, no es tan extraño que los proveedores se permitan el lujo de ahorrarse los experimentos necesarios para obtener conclusiones a cerca de las propiedades de los materiales que ofertan.

Cuando uno se refiere a la “comunidad que envuelve”, lo que pretende decir es que hay un sector significativo de usuarios, en esta área en concreto y en otras como el ámbito de la programación en sus inicios, a los que nunca les parecen suficientes los datos que aporta el proveedor y por lo tanto van a ser los propios usuarios los que pongan a prueba los materiales y lo contrasten en foros con otros. Este hecho no es irrelevante ya que explica la imposibilidad de obtener una bibliografía basada en artículos científicos y publicaciones contrastadas.

1.2 Motivación

Una vez expuesto la situación general el lector se podrá plantear la duda. ¿Por qué molestarse en estudiar el LW-PLA?, si todavía ni la comunidad ni los proveedores han definido sus características. La respuesta es sencilla desde la premisa de que siempre hay gente dispuesta a ser el primero en encontrar toda la información necesaria para solucionar los problemas de impresión en este material y ser pionero en el uso del mismo. Recordar que a este material se le presupone como revolucionario en el sector, ya que las premisas a cerca de su expansión son del calibre: “*Capacidad de una reducción en un 65% en peso*” [2] por lo que esto genera unas expectativas muy altas, llegando a resolver mucha problemática que envuelve el sector de los UAV’s en el cual existe la necesidad de reducir el peso de cada uno de sus componentes, para facilitar que estos vehículos levanten vuelo, tengan menor consumo, hacerlos más pequeños y en última instancia aumentar las posibilidades de los compradores reduciendo costes en general en la propia producción de los mismos.

1.3 Objetivos

Este trabajo pretende obtener la información necesaria acerca de la impresión de LW-PLA bajo distintas condiciones, de manera que se obtenga una guía fiable y al alcance de cualquiera que tenga dudas acerca de cuál debería de ser la configuración de su impresora, en función de cuál sea el uso final de sus piezas impresas. Para conseguirlo será necesario el uso de técnicas de muestreo, análisis de datos, con la intención de dar un mayor respaldo a la investigación empírica que se va a llevar a cabo, avalando así las decisiones de manera estadística y no arbitraria.

Todo ello genera a su vez unos objetivos parciales que son:

- Familiarización con el material de impresión 3D y de la máquina de ensayo de tracción.
- Buscar y modelar, en caso de existir, las condiciones que son óptimas para cada parámetro de estudio.
- Buscar y modelar la relación que tienen los parámetros de estudio, más allá de la intrínseca relación que tienen con sus variables. Es decir, reflejar no solo donde exista un máximo en fiabilidad del modelo, sino que también el marcar el punto óptimo de fiabilidad con mayor expansión.
- Gestión de bases de datos.
- La aplicación de métodos estadísticos para valorar la importancia de las variables en la fase de análisis y para el apoyo en la toma de decisiones.
- Control de la coherencia de los resultados obtenidos.
- Capacidad de síntesis para en las conclusiones discernir qué datos son los más interesantes para el usuario.

2 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se tratarán temas como la propia historia y evolución de la tecnología 3D y estado de la tecnología actual.

2.1 Historia de la impresión 3D

En este subapartado se hará una revisión rápida de los antecedentes de la impresión 3D y de los hitos más relevantes a lo largo de la historia.

2.1.1 Orígenes de la impresión 3D

Cabe destacar que esta tecnología que se conoce hoy en día bajo el término de “fabricación aditiva” y que se integra dentro de la Industria 4.0, en la revolución industrial que estamos viviendo, no es tan reciente como algunos pueden llegar a pensar. Siendo los primeros antecedentes de está en 1861 de la mano del escultor Francoise Willeme [3] quien patentó el concepto de “**Photoesculpture**”, un proceso para generar imágenes 3D por superposición de 24 vistas parciales de la figura. En la Figura 2-1 se muestra la disposición de las cámaras en el domo para conseguir las vistas parciales antes citadas.

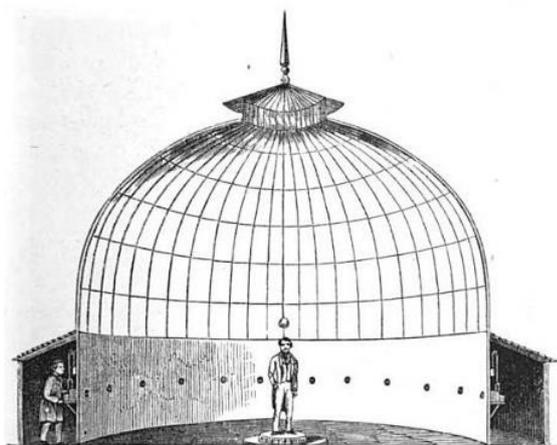


Figura 2-1: Domo diseñado por Francoise Willeme para su proceso de "Photoesculpture". [3]

Si bien es cierto que esta técnica no puede llegar a considerarse impresión 3D, considerando las implicaciones que tiene para la tecnología de estudio, sería un error no citar este hecho como el evento sobre el cual se desarrolla toda la materia, ya que esta es la base de la creación de modelos digitales 3D, los cuales son imprescindibles para la posterior impresión. Continuando con la evolución del campo, en

1892 el inventor **Joseph E. Blather** [4] diseñó y patentó un método de creación de mapas 3D por capas muy semejante a los usados hoy en día.

Finalizados los antecedentes de esta tecnología, se presenta el considerado como el padre de la impresión 3D el **Dr. Hideo Kodama**, quien fue el primero en experimentar con luz UV para endurecer prototipos hechos de tinta de un material conocido fotopolímero. A pesar de que su idea es ampliamente usada actualmente, en su época, no fue capaz de comercializarla.

2.1.2 Hitos relevantes

Con el paso de los años, se van desarrollando nuevas tecnologías para la impresión 3D. En 1986 Chuck Hull inventó el aparato de estereolitografía (SLA) y en los años que siguieron se hicieron los descubrimientos de la sinterización láser selectiva (SLS) (1987) y del modelado de deposición fundido (FDM) (1989) .

Otra serie de eventos destacables en el crecimiento de este ámbito de la industria fueron:

- En **1999**: se realiza el primer trasplante de una vejiga impresa en 3D. [5]
- En **2004**: se diseña REPRAP [ver Figura 2-2] formada con piezas que se pueden a su vez imprimir cuya venta acercó la impresión 3D al público. [6]

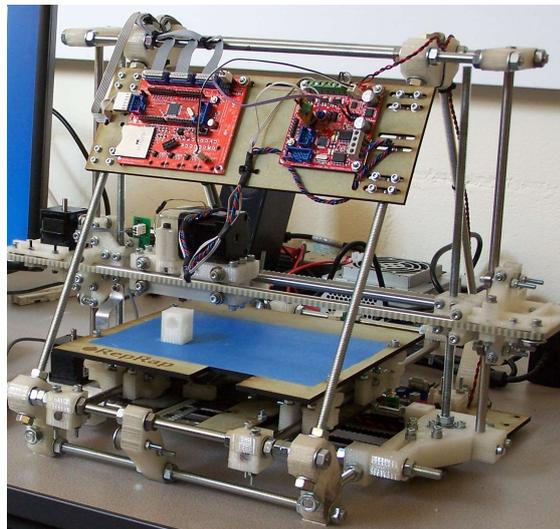


Figura 2-2: Impresora REPRAP. [7]

- En **2008**: Shapeways lanza un servicio de envío de archivos propios entre usuarios, en ese mismo año se crea y utiliza la primera prótesis de pierna completamente impresa en 3D. [8]
- A partir de **2012**: se empieza a imprimir en otros materiales como metales y cerámicas.
- En **2015**: se comercializa el primer dron impreso en 3D. [9]
- En **2018**: se usa por primera vez una impresora de hormigón premezclado. [10]
- Recientemente **el 27 de enero** del año de la publicación (**2022**): el profesor de la USC, Álvaro Goyanes, ha diseñado un método de impresión 3D que utiliza dispositivos móviles para producir medicamentos en los domicilios particulares. [11]

2.2 Principales tipos de impresión 3D

Una vez ya expuestos los antecedentes y orígenes de la tecnología en la que se centra este trabajo, se expondrán las diferentes opciones que hay a día de hoy. [12]

2.2.1 Estereolitografía (SLA)

Esta técnica se basa en el uso de una cubeta y resina fotosensible [ver Figura 2-3], la cual se endurece por el paso de un láser de acuerdo con el modelo 3D. una vez realizada la primera etapa, el modelo asciende la altura seleccionada como espesor de capa y se repite el proceso con el siguiente nivel. Este tipo de impresión requiere, una vez finalizada la impresión, una limpieza con alcohol, además de un postprocesado para que la pieza alcance las mejores propiedades. [13]



Figura 2-3: Resina fotosensible para impresión SLA. [14]

Las principales aplicaciones para este tipo de impresión son:

- Prototipos visuales para sesiones fotografía.
- Prototipos para pruebas funcionales limitadas.
- Piezas maestras para técnicas de copiado como la colada al vacío.
- Modelos para fundición a la cera perdida.
- Producción a pequeña escala de geometrías complejas y modelos artísticos [ver Figura 2-4].

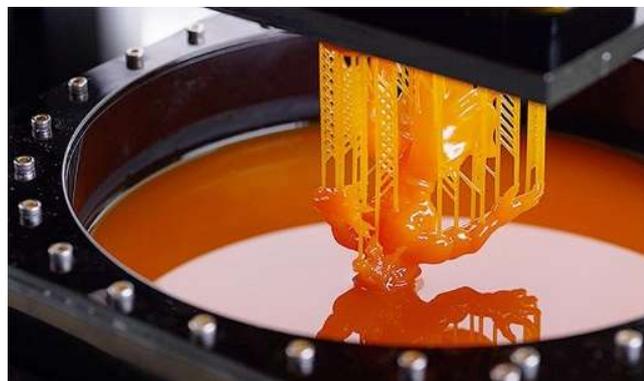


Figura 2-4: Figura impresa por SLA. [14]

Son múltiples las ventajas que ofrece este tipo de impresión. Siendo la rapidez de impresión, la calidad y dureza superficial las más destacables, han de comentarse también sus principales deficiencias, que son su fragilidad en comparación respecto a otro tipo de impresiones, la sensibilidad tanto a la humedad ambiental, así como a la temperatura y el alto coste de la resina, que es la materia imprescindible para la impresión (60-90 €/L) .

2.2.2 Procesamiento digital de luz (DLP)

Este proceso se parece mucho al SLA, ya que ambos trabajan con resinas fotosensibles y necesita por lo tanto los mismos postprocesos, pero cuenta con unas diferencias significativas frente al proceso explicado con anterioridad. La principal, es que en este proceso se emplea un proyector de luz, que ilumina toda una capa entera, por ello se considera que el proceso DLP es más rápido que la estereolitografía. Otra diferencia fundamental reside en el tamaño del proyector, ya que este al ser más

grande que el láser, hace que la impresora (por norma) lo sea también, en comparación con las de SLA [ver Figura 2-5]. La última diferencia entre SLA y DLP está en el mantenimiento, ya que por la ausencia del láser esta última requiere mucho menos supervisión y este es más sencillo. En definitiva, más económico. [14]

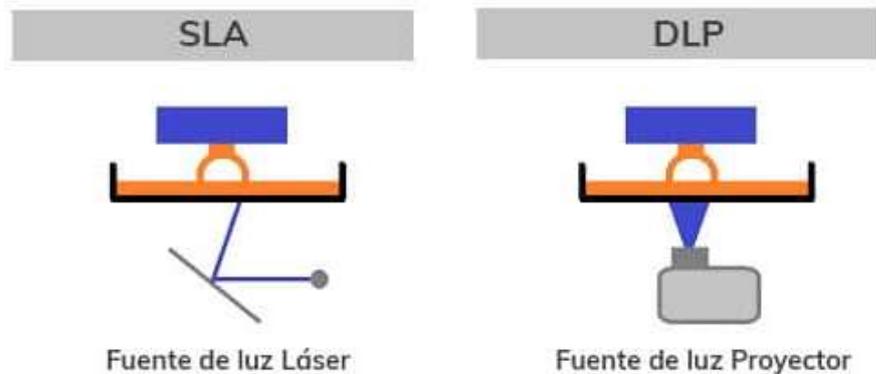


Figura 2-5: Esquema SLA vs DLP. [15]

Los casos de aplicación son similares a los de SLA, añadiendo a los ya citados el uso de esta técnica de impresión en el campo de la joyería y aplicaciones dentales. Los ámbitos en los que destaca el proceso de DLP son la rapidez de impresión, la calidad del acabado superficial [ver Figura 2-6] y su precisión, llegando a poder imprimir objetos diez veces más pequeños que un cabello humano. Por el contrario, su mayor defecto es la fragilidad de las piezas obtenidas y el elevado coste de la resina ya citado con anterioridad.



Figura 2-6: Diferencia de calidad entre SLA y DLP. [14]

2.2.3 Estereolitografía en máscara (MSLA)

Este método es una variante del SLA, en la que la fuente luminosa es un array LED con una fotomáscara LCD, esta es la que determina la planta de la capa. En este proceso la imagen está formada por píxeles cuadrados a diferencia del SLA. Capa a capa se modifica la máscara, cuando el nivel anterior ya esté finalizado y la pieza se haya elevado la altura fijada [ver Figura 2-8]. El MSLA combina las ventajas del SLA junto con la velocidad de impresión de DLP.

2.2.4 Fusión de polvo (SLS)

El concepto de este tipo de impresión es conceptualmente similar a los expuestos anteriormente, ya que se trata de un láser que modifica las propiedades la materia base para posteriormente extraer la pieza deseada. En este caso la materia base es un polvo, ya sea de termoplásticos, elastómeros o diferentes

metales [ver Figura 2-7]. A pesar de ser el mismo concepto, las partes comunes, siguen siendo significativamente diferentes. En este caso el láser es de una potencia mayor que en SLA y tras la finalización de una capa la pieza se baja en vez de elevarse y hace falta que unos rodillos repartan nuevamente el material base antes de iniciar la nueva capa, por lo que hace necesario un depósito de material base contiguo a la región de impresión. [17]



Figura 2-7: Pieza impresa con SLS. [18]

Las principales ventajas de la SLS son que no necesita material de apoyo para la fabricación de la pieza y (el más relevante, siendo este decisivo a la hora de escoger que proceso es el adecuado) la gran dureza de las piezas que se obtienen. Obteniendo como resultado de la impresión piezas finales funcionales. Estas aplicaciones no son meramente teóricas ya que en sectores como el de la aeronáutica o el automovilístico (los cuales requieren especificaciones muy precisas y niveles de esfuerzo mayores que muchos otros ámbitos de trabajo) ya han sido comprobadas.

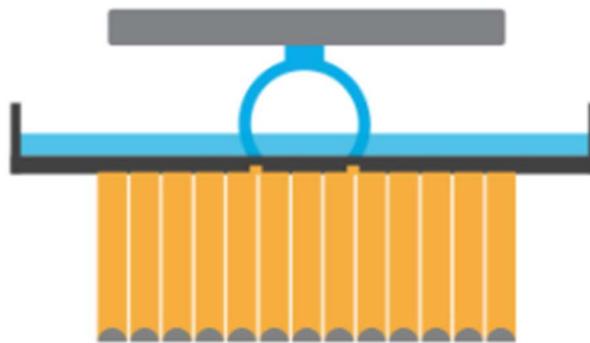


Figura 2-8: Esquema impresora MSLA. [16]

2.2.5 Fusión por haz de electrones (EBM)

En este proceso es importante saber que no se realiza con láser, sino con un haz de electrones. Al igual que en SLS, hace falta un polvo de la materia base, en este proceso el granulado es mayor y necesita ser precalentado antes de comenzar la impresión. El resto de las etapas de impresión son muy similares a las de SLS. Una vez finalizada la impresión, hay que retirar el polvo sobrante, esto suele hacerse por arrastre mecánico bien con un cepillo o con soplado de aire. Posteriormente hay que llevar a cabo una serie de postprocesos que incluyen el paso por un horno para eliminar tensiones, generadas en la fusión del granulado, y el pulido [ver Figura 2-9].

La principal ventaja de este proceso es la rapidez del mismo, gracias a tener el polvo precalentado y la posibilidad de estar fundiendo en dos regiones a la vez en la misma capa (cosa que en SLS no es posible). También ha de decirse que EBM genera superficies mucho más rugosas que SLS, por lo que en caso de necesidad habría que recurrir a pulidos, añadir en las desventajas que el tamaño al que se

puede llegar a imprimir por EBM es limitado (350-380mm) y en lo relativo al precio este es un proceso mucho más costoso.



Figura 2-9: Pieza impresa por EBM. [14]

2.2.6 Inyección de aglutinante (BJ)

Este método de impresión también es conocido por otros nombres como son impresión 3D de inyección de tinta, de gota sobre polvo, *binder jetting* y fusión sobre lecho de polvo. BJ hace uso de dos componentes, uno que es el material base en forma de polvo (normalmente yeso) y el otro es el elemento adhesivo. Puede hacerse una similitud con la impresión de tinta en 2D ya que avanza por capa de manera continua y al finalizar una capa comienza inmediatamente con la siguiente. Los materiales a usar generalmente son metal, plástico o cerámica.

Al igual que en EBM el sobrante se elimina con cepillado o soplado de aire, pero en este caso no necesita ningún postprocesado, lo cual es una ventaja sobre otros métodos de impresión.

2.3 FDM

El método de impresión 3D por deposición de material fundido (FDM) puede que sea el proceso, en el ámbito de la fabricación aditiva, más popular bien por su cercanía al usuario o por ser económico. El hecho de haberla obviado sin hacer ninguna mención hasta el momento no es arbitrario, la justificación de esto radica en que dado que es la manera con la que se trabaja con el LW-PLA, se realizará una descripción más pormenorizada no solo del proceso en sí mismo, sino que también de cada una de las partes que conforman estas impresoras en particular [ver Figura 2-10], habiendo considerado tal detalle propio de un apartado exclusivo para FDM.

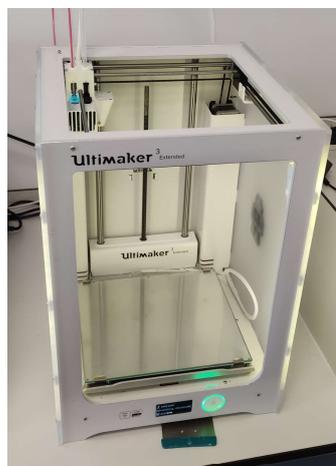


Figura 2-10: Impresora Ultimaker Extended 3.

La principal diferencia de FDM frente a todos los procesos anteriores es que en los que el material base era o una resina o polvo, en este caso se trata de un filamento. Estos son fundidos y se hacen pasar

por un extrusor el cual va realizando la pieza que se desea capa a capa. Además, resaltar que los filamentos que se emplean en este tipo de procesos tienen un abanico de materiales mucho más amplio frente a cualquiera de los métodos anteriormente explicados.

Como se puede ver en la Figura 2-14 una impresora FDM se caracteriza por tener movimiento lineal en los tres ejes, la cama caliente sobre la que se imprime la pieza que se desee, una estructura que sirve a modo de puente grúa para servir de apoyo en el posicionamiento del fusor, el extrusor y la bobina del material de aporte. Resaltar también los sistemas de ventilación que suelen presentarse en el grupo de extrusión y en caso de ser impresoras cerradas también en el habitáculo de impresión.

2.3.1 Componentes de una impresora FDM

Los componentes principales de la Ultimaker Extended 3 (que será la impresora empleada en este trabajo) y sus funciones son:

- Base calefactable [ver Figura 2-11]: superficie plana sobre la que se sustenta la impresión y que permite ser calentada para facilitar la adherencia de la pieza reduciendo así los errores de warping y el uso de lacas, lo que se termina traduciendo en un ahorro de tiempo, material y costes.



Figura 2-11: Base Calefactable.

- Dos boquillas extrusoras: son las encargadas de fundir el material deseado, un catálogo muy amplio, pero en el caso de estudio se imprimirá solo LW-PLA y con una sola boquilla. [ver Figura 2-12]



Figura 2-12: Detalle de los cabezales de extrusión.

- Dos soportes de bobinas: ya que tiene dos boquillas, dispone de soporte de dos bobinas de material independientes. [ver Figura 2-13]
- Sistema de ventilación: posee tres ventiladores en la boquilla extrusora que se encargan de acelerar o retardar el enfriado del material impreso. También realiza las funciones de mantener la temperatura del filamento que no debe ser extruido para evitar atascos en la boquilla. Se

puede controlar la refrigeración en el menú de configuración de Ultimaker Cura. Esta calibración se representa en unidades de tanto por ciento.

- Motor que empuja el filamento: a diferencia de en muchas otras en las que este elemento está situado en la propia boquilla de extrusión, en esta se encuentra en un lateral de la cámara de impresión. Esto hace que el motor necesite unas mayores exigencias respecto al otro grupo señalado anteriormente [ver Figura 2-13].

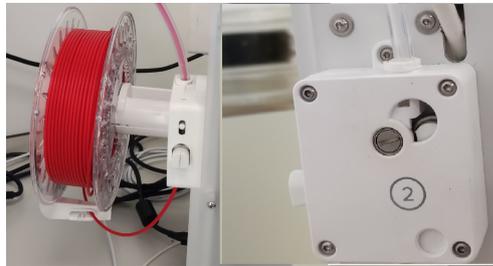


Figura 2-13: Soporte de la bobina del material y detalle del empujador del filamento.

Señalar además que el movimiento en los ejes x e y son realizados por la propia boquilla de extrusión en un plano de altura z fija y es la cama caliente la que realiza el movimiento en el eje vertical [ver Figura 2-14]. Todos estos movimientos se producen por motores que accionan una serie de ruedas dentadas y una correa trapezoidal dentada de polímero.

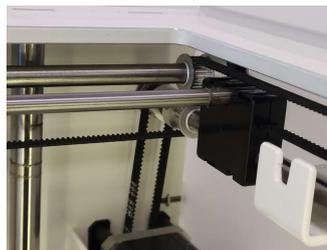


Figura 2-14: Sistema de movimiento de las boquillas extrusoras.

2.3.2 Popularidad de FDM

El uso popular de esta técnica se debe a sus ventajas y el ámbito de uso de las piezas que se generan. Ya que en muchos casos no se pueden usar como piezas finales, pero sí como prototipados rápidos y para validación de modelos o partes de piezas. Teniendo que hacer hincapié que cada vez más y con el uso adecuado de los materiales y técnicas oportunas. Pueden llegar a generarse objetos de uso final. Esta es una tecnología que se usa cada vez más para producción en serie a nivel básico.



Figura 2-15: Comparativa de calidades de impresión en distintos procesos. [19]

La cercanía al usuario que obtiene el FDM se debe principalmente a la sencillez tanto del montaje de las máquinas, como del uso de la misma; sin olvidar la facilidad de limpieza y mantenimiento. Permitiendo ya de por sí solo un ahorro económico significativo y si a esto se le junta el hecho de que

las resinas de impresión no pueden competir en precio con los filamentos de FDM. Con todo esto se tiene la combinación necesaria para que la mayoría de la gente, ya sean expertos en la materia o no, prefiera este proceso frente a otras opciones del mercado. A parte de esto, no se puede olvidar que este proceso es bastante lento, en complicación con sus competidores que trabajan en resinas, pero se compensa el ahorro de tiempos en personalización y producción de elementos de baja tirada, ya que no requiere de moldes, facilitando así modificaciones únicas y rápidas del modelo. Tal y como se muestra en la Figura 2-15 si se compara la calidad de impresión de FDM frente a los de otros procesos ya expuestos, se puede afirmar que el nivel de detalle es significativamente menor, a costa de todas las ventajas que se han ido explicando con anterioridad.

2.3.3 Principales fallos en impresión FDM

Como en todo proceso, es conveniente conocer cuáles son los fallos más comunes que se pueden dar durante el mismo. Ya sean errores evitables con una calibración previa, por defectos en el material o por fallos en la electrónica de la impresora. En cualquier caso, como cualquier máquina en funcionamiento necesita una supervisión para que en caso de que estas eventualidades se produzcan, parar la impresión y evitar pérdida de material [20]. En función del elemento que genera el fallo o de la característica deficiente se pueden distinguir distintos tipos de fallos.

2.3.3.1 En relación con la cama caliente

El fallo que se puede llegar a producir es el *warping* o despegue de completo de la cama. Este defecto es más común en otro tipo de impresiones, pero se puede dar en FDM por lo que ha de tenerse en cuenta. Dicho implicaría tener que parar la impresión a la mayor brevedad, ya que estas piezas no serían válidas para los análisis. Consiste en que las esquinas de la figura a generar se despeguen de la base caliente por mala adherencia, lo que genera una capa no lisa produciendo una acumulación del error en las capas sucesivas. Entre las distintas medidas a tener en cuenta para evitar el *warping* [ver Figura 2-16] están el uso de lacas sobre la base calefactada, retardar la ventilación interna de la impresora (para así reducir el choque térmico entre el ambiente de impresión y la base de impresión), llegando a cortar la ventilación en algunos casos.

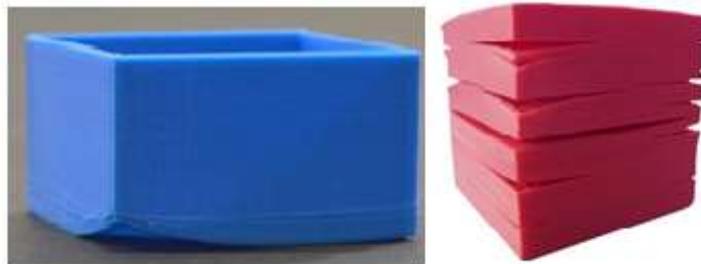


Figura 2-16: Despegue de la cama caliente pieza azul VS Delaminación pieza rosada. [21]

2.3.4 En lo que se refiere a fallos que faciliten la rotura de la pieza

Se pueden destacar tres como los principales Delaminación, desplazamiento de capas y relleno incorrecto.

2.3.4.1 Delaminación

Comenzado con la también llamada *cracking*, se caracteriza por la falta de adherencia entre capas de la pieza lo cual se puede percibir rápidamente cuando se coge la pieza, ya que se puede percibir una falta de consistencia. Se puede producir debido a la falta de temperatura de fusión durante la extrusión o a una rápida contracción del material depositado, no dejando tiempo para que las capas se peguen debidamente entre sí. La solución es aumentar la temperatura de fusión, dentro de los límites del material, así como la reducción de la ventilación de la cámara de impresión.

2.3.4.2 Desplazamiento de capas

A continuación, se definirá, el conocido como *shifting* [ver Figura 2-17] se produce por movimientos bruscos entre la base de impresión y la boquilla extrusora, estos se deben a exceso de tensión de alguna de las piezas del mecanismo, un golpe sobre la maquina o que los elementos móviles no hagan sus movimientos con la fluidez de diseño por defectos en alguna de sus partes. Ante esta situación lo más recomendable es ver que parte es la que está generando el problema y reemplazarla ya que son fallos que serán sistemático y no eventuales.

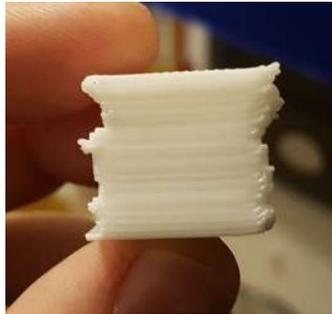


Figura 2-17: Ejemplo de desplazamiento de capas. [22]

2.3.4.3 En lo relativo a la deposición del material

Cabe reseñar tres situaciones no deseables. La formación de hilos, el sobrecalentamiento y el exceso de extrusión de material. Todos ellos fácilmente solucionables, con una corrección en los parámetros de impresión. Es conveniente comprobar que el diámetro del filamento coincide con el que acepta la boquilla de extrusión [ver Figura 2-19].

2.3.4.4 Los que producen una mala calidad superficial en la pieza

Otro grupo de defectos en la pieza son aquellos que engloban los fallos como las ondulaciones en el eje z, la falta de continuidad en extrusión de material, gotas negras y las vibraciones.

Definiendo cada uno de ellos por orden, tanto las ondulaciones también conocidas como *Z-wobbling* y la discontinuidad en el aporte de material, se producen por fallos de calidad del propio filamento de material base que puede suponer que tenga variaciones de diámetro en la longitud necesaria para la pieza, además puede producirse por movimientos bruscos de la máquina o a cambios bruscos de temperatura.

Continuando con las gotas negras, también llamadas *Speaks*, estas se producen por desajuste de la boquilla y la varilla roscada, se soluciona apretando la boquilla a su rosca [ver Figura 2-18].



Figura 2-18: Ejemplo de gota negra. [25]

Ya finalizando este apartado, las vibraciones se pueden mitigar reduciendo la velocidad de impresión, teniendo en cuenta de que las vibraciones se producen por el desgaste de las propias piezas

del mecanismo lo que conlleva a que este sea un error sistémico que debe ser solucionado con el remplazo de las piezas dañadas que sean el origen.



Figura 2-19: Fallo por formación de hilos. [24]

2.3.4.5 Problemas de compatibilidad entre la pieza y la impresora.

Esto se puede producir en el momento que se diseña un elemento fino dentro de la pieza, el cual no puede ser impreso por límites de la propia máquina.

2.3.5 LW-PLA

El material que se va a usar en el estudio va a ser el LW-PLA de ColorFabb [1]. El principal motivo de emplear este frente a otros es la capacidad de expansión que desarrolla cuando se imprime a distintas temperaturas, lo que conlleva que se pueda reducir el flujo en las configuraciones previas a la impresión y aun así obtener los espesores de diseño. En definitiva, es un material, que se presupone muy versátil que está en estudio y del que no se dispone mucha bibliografía, por lo que todas sus posibilidades aún son una incógnita para los usuarios de la comunidad. Lo que sí que se puede adelantar es que ya solo con las pocas características que nos ofrece el fabricante, se intuye que este material proporcionará una solución más ligera que las que se obtienen a día de hoy con los PLA normales. Además del significativo ahorro de material que se puede llegar a conseguir con una reducción de flujo. Posee una tolerancia en diámetro de $\pm 0.1\text{mm}$ y una densidad cuando existe expansión de $0.403 - 0,476 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ y de $1.210-1.430 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ cuando este factor no está presente, añadir que tiene una temperatura de transición vítrea de 55°C .

3 DESARROLLO DEL TFG

En este apartado se comenzará con una explicación de la metodología a seguir durante la Fase experimental y también se mostrarán los datos acumulados durante el proceso, así mismo se presenta la base en la que se realizará el análisis de los datos. Toda gráfica complementaria a las explícitamente mostradas en la memoria se encuentra en sus correspondientes Anexo IV, Anexo V, Anexo VI, Anexo VII y Anexo IX.

3.1 Método de análisis

La metodología de superficie de respuesta (RSM [26]) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas empleadas para desarrollar, mejorar y optimizar procesos. También es aplicable en el diseño, desarrollo y formulación de nuevos productos, así como la mejora de diseños existentes y funcionales. En el caso del estudio los resultados de la memoria se representarán con gráficos de contorno, ya que es más visual que las propias superficies de respuesta, pero todas las superficies obtenidas durante los análisis estarán adjuntas Anexo IV.

Una de las aplicaciones más comunes de estas técnicas es la de modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés viene influenciada por varios factores de carácter cuantitativo, siendo el objetivo el de optimizar dicha respuesta determinando los valores óptimos de los factores implicados. La relación vendrá dada por Ecuación 3-1:

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon$$

Ecuación 3-1: Función genérica en dos variables más ruido experimental.

El uso de estos métodos de optimización permite determinar las condiciones óptimas para cada configuración de impresión. Concretamente se empleará el método de diseño de superficie de Box-Behnken. [27]

Otra serie de conceptos estadísticos y el uso de Minitab queda reflejado en el Anexo III.

3.1.1 Metodología RSM

Como todo en método han de seguirse unos pasos durante la ejecución del mismo.

1. Definir los objetivos de la optimización.
2. Seleccionar los factores significativos.

En el caso de estudio estos son la temperatura, el fujo y altura de capa.

3. Establecer la región de operabilidad.
4. Seleccionar un entorno experimental.

En el experimento se trabajan en los márgenes de 200-260°C, boquilla de 0,4 y alturas de capa de 0.1 mm, 0.15 mm y 0.2mm

5. Construir un diseño experimental de optimización.

Obtención de los resultados experimentales.

6. Elaborar un modelo matemático.

Repetir pasos 4-6 si fuera necesario.

7. Localizar el óptimo para la respuesta.

3.1.2 Diseño de Box-Behnken

Propuesto por Box and Behnken (1960), se utiliza para ajustar superficies de respuesta con al menos tres factores, con tres niveles por factor (-1, 0, +1). De este diseño es destacable que no se incluye ningún punto experimental con valores máximos, es decir, no contempla puntos en los vértices del diseño cúbico tal y como se ilustra en con la Figura 3-1.

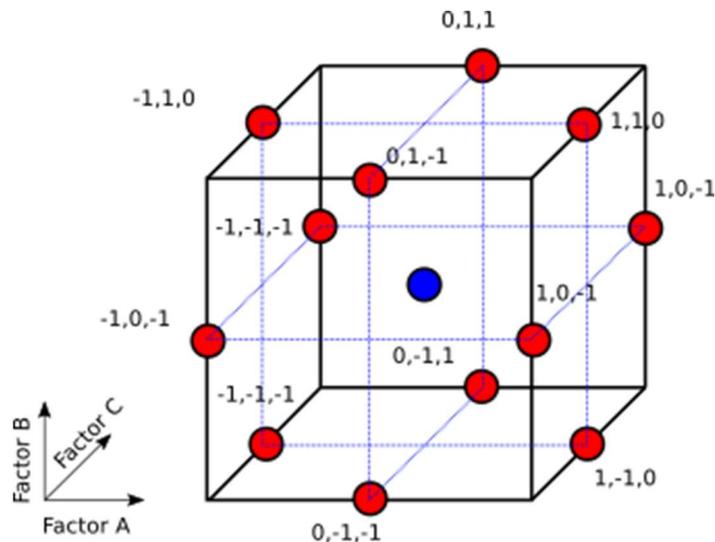


Figura 3-1: Ejemplo diseño Box-Behnken. [28]

Los diseños de Box-Behnken tienen combinaciones de tratamiento que están en los puntos medios de los bordes del espacio experimental y requieren al menos tres factores continuos. La Figura 3-1 muestra un diseño de Box-Behnken de tres factores. Los puntos del diagrama representan los experimentos que se han realizado. Estos diseños permiten una estimación eficiente de los coeficientes de primer y segundo orden. Los diseños de Box-Behnken también pueden ser útiles si se conoce la zona de operación segura de su proceso. En el caso que nos atañe es el propio fabricante del LW-PLA quien nos da la zona segura de operación con el polímero.

3.2 Método de trabajo

Se va a realizar un estudio de las piezas impresas en ácido poliláctico ligero (LW-PLA) . Para ello se han de estudiar las diferentes configuraciones de los parámetros modificables en la **Ultimaker Extended 3** [ver Figura 2-10].

En el parámetro de la temperatura se hará una primera selección de rangos válidos para el estudio. Siendo el mínimo 200 °C y el máximo 280 °C. el muestreo y toma de datos para el análisis se realizará en varias Fases que se irán descubriendo a lo largo del desarrollo de esta memoria. Dichas Fases se ilustran en la Figura 3-2.

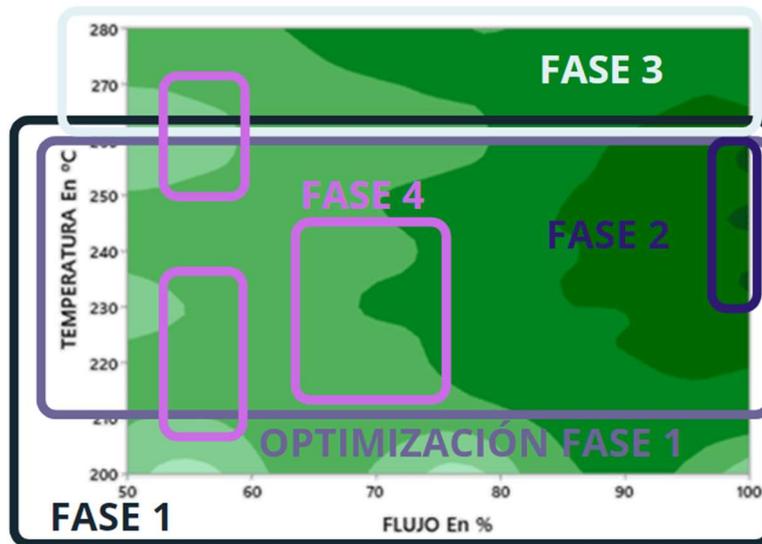


Figura 3-2: Aclaración de las Fases sobre ΔV (%).

Gracias a la expansión del PLA-W se puede conseguir mismas dimensiones con boquillas de diferentes tamaños. Para ello hay que variar otros parámetros que son **el flujo, la temperatura (°C) y altura de capa**. El estudio se hará únicamente sobre la boquilla 0'4mm las alturas de capa de análisis serán: 0.1mm, 0.15mm y 0.2m.

Todas estos parámetros son variables en la interfaz que el propio fabricante de la impresora ofrece de manera gratuita ,Ultimaker Cura [29] que esta explicado en el Anexo II. Durante las Fases de laboratorio 1-3 se hará la medición del espesor obtenido de las probetas. Para posteriormente desarrollar el estudio de la variación del espesor del resultado final [ver Ecuación 3-2], de la expansión [ver Ecuación 3-3] y de la dureza. Una vez conocidos los parámetros de estudio se describirán los pasos que se van a seguir en el laboratorio apoyando la explicación con la Figura 3-2.

$$VARIACION DE ESPESOR = \frac{ESPEJOR MEDIDO - ESPEJOR DE REFERENCIA}{ESPEJOR DE REFERENCIA}$$

Ecuación 3-2: Cálculo de la variación de espesor.

$$EXPANSIÓN = \frac{ESPEJOR MEDIDO}{ESPEJOR DESEADO * FLUJO EMPLEADO}$$

Ecuación 3-3: Cálculo de la expansión.

El camino seguido a lo largo del estudio se ve justificado con la búsqueda de una máxima resistencia en las regiones de mayor expansión. Para ello, se ha tomado la decisión de realizar primero los ensayos

dimensionales (Fases 1, 2 y 3) para así acotar las zonas de interés para el análisis de resistencia (Fase 4). Con los resultados obtenidos en la Fase 1 se obtuvo una visión inicial, por lo que en la Fase 2 se hizo hincapié en los máximos de la fase anterior, finalmente y dada la ambigüedad que surgió en el análisis de la Fase 2, se decidió hacer una exploración por el margen superior (Fase 3).

Para el desarrollo de las Fases 1, 2 y 3 se realizarán unas probetas de prueba como las de la Figura 3-3, estas son prismas ortogonales huecos con dimensiones 2x2x2 cm y un espesor de 0.4mm [ver Figura 3-3]. Para tener unas mediciones rigurosas se pensó inicialmente en imprimir 3 probetas por configuración, pero tras las primeras impresiones se ha llegado a la conclusión de que con 1 probeta por configuración es suficiente, ya que cada figura dispone de cuatro caras idénticas, por lo que a una misma pieza se le pueden hacer varias mediciones en superficies distintas, sin viciar la toma de datos. De todos modos, se ha reservado el concepto de imprimir tres probetas para aquellas que en un primer intento dan errores de impresión, para en ese caso descartar el posible error de la impresora y no de la compatibilidad de los parámetros de configuración. Con los valores obtenidos se realizarán las medias, para así corregir posibles errores de impresión y medición.

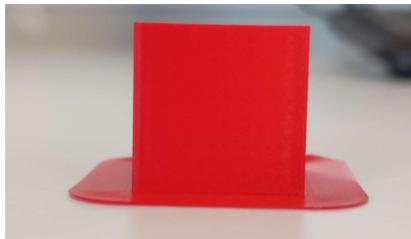


Figura 3-3: Probetas de la "Fase 1".

Resaltar que el tiempo de impresión de una probeta está dentro del margen 15-20 min en cambio cuando se pretenden imprimir 3 probetas juntas el tiempo sube hasta el intervalo de 35-40 min. Dicho esto, recalcar que la decisión de imprimir solo una probeta como opción principal y tres en caso de error, no se ha basado en el factor tiempo. Sino que ha sido una decisión tomada en base a la calidad del experimento. Ya que disponer de tres probetas no aporta nada nuevo a las medidas, como ya se ha explicado anteriormente.

Una vez estén creadas las muestras, serán sometidas a una inspección visual, para ver la calidad superficial y descartar configuraciones porosas o que generen defectos inasumibles en las piezas. Aquellas que superen este primer examen serán sometidas a un escalado cuantitativo, será por el parámetro de dureza Shore (explicado en el Anexo I).

En un primer momento se ha designado la nomenclatura de las probetas, para las probetas impresas con boquilla de 0,4mm:

- 1-XX: para la altura de capa 0.1mm.
- 2-XX: para la altura de capa 0.2mm.
- 3-XX: para la altura de capa 0.15mm.

Esta designación se realiza así porque ayuda a la hora de realizar el diseño de **Box-Behnken** para la parte del análisis de los datos. Dado que los valores que se usan son los límites superiores e inferiores, necesitando solo el punto intermedio para cálculos internos y representación de la superficie de respuesta. Con el fin de facilitar la lectura se reseñan las siguientes abreviaturas para tablas, ecuaciones y títulos.

- | | |
|---|----------------------------------|
| • <i>VARIACION DE ESPESOR</i> En % = $\Delta V(\%)$ | • <i>FLUJO</i> En % = Φ |
| • <i>ALTURA DE CAPA</i> En mm = h (mm) | • <i>Nº de Registro</i> = # |
| • <i>EXPANSION</i> EN % = Exp (%) | • <i>TEMPERATURA</i> En °C = T |

Una vez acabadas las Fases 1,2 y 3, que son las de estudio de calidad dimensional, se procederá con la Fase 4. Esta Fase es en la que se hará un ensayo de tracción para obtener resultados de resistencia para este material. Por lo tanto, la obtención de dichos valores requiere de un examen y probetas específicas [ver Figura 3-4].

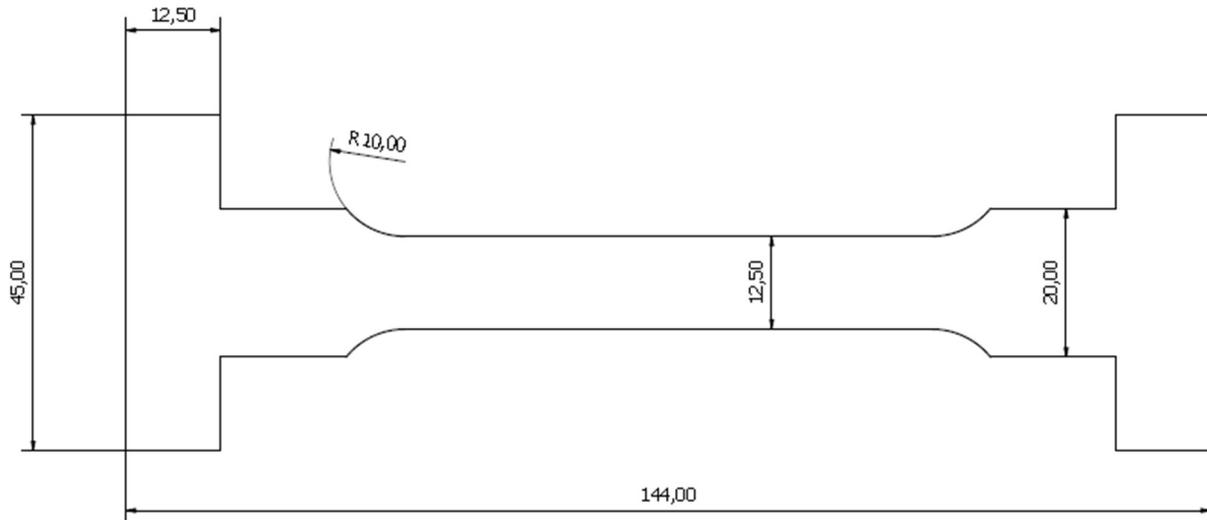


Figura 3-4: Probeta modelo para el ensayo de tracción.

Las dimensiones de las probetas del ensayo de tracción quedan reflejadas tanto en la Figura 3-4 con un espesor de 2,25mm. El ensayo a tracción se explica en el Anexo VIII.

3.3 Fase 1 de laboratorio

Esta fase a su vez se verá dividida en varias etapas, que se explicarán brevemente para contextualizar y guiar la lectura.

Con los márgenes iniciales que se planteaban (fueron 50-100 % en flujo ,200-260°C y boquillas de 0,1-0,15 y 0,2 mm) se intentó hacer un muestreo de Box-Behnken, pero a la hora de operar en los flujos más reducidos surgieron errores de impresión, que se expondrán posteriormente, lo que llevó a no poder emplear esos datos para el primer muestreo y ante la necesidad se aumentó el límite inferior del flujo a 55%, pudiendo en este caso realizar el muestreo. Con los datos acumulados, y a la vista de los resultados iniciales, se valora la idea de hacer una optimización, para así tener unos métodos de predicción que sean más rigurosos y a su vez aumentar el número de muestras en la búsqueda de regiones de interés. Ya con los datos acumulados se detectan esas zonas de estudio más relevante, se finaliza la Fase 1 documentando los errores surgidos durante el desarrollo de la misma y fijando los límites de los estudios de la siguiente Fase .

3.3.1 Toma de datos 1

Los parámetros de este primer experimento fueron:

- Temperatura: 200-260°C.
- Alto de capa: 0,1-0,2mm.
- Φ (%): 55-100%.

Tras la toma de datos se ha decidido separar el análisis de los obtenidos en dos partes. La de variación del espesor y la de expansión.

3.3.1.1 Toma de datos 1 - Variación De Espesor

Los valores que se muestran a continuación son los de aquellas probetas sobre las que se recogieron medidas para el análisis inicial:

#	T (°C)	Φ (%)	h (mm)	ΔV (%)
1\4	230	100	0,1	65,83
1\22	200	77,5	0,1	16,67
1\28	260	77,5	0,1	40,00
1\46	230	55	0,1	33,33
3\7	260	100	0,15	87,50
3\1	200	100	0,15	22,50
3\25	230	77,5	0,15	62,50
3\25	230	77,5	0,15	62,50
3\25	230	77,5	0,15	62,50
3\43	200	55	0,15	10,83
3\49	260	55	0,15	25,83
2\4	230	100	0,2	95,83
2\28	260	77,5	0,2	60,83
2\22	200	77,5	0,2	13,33
2\46	230	55	0,2	42,50

Tabla 3-1: Modelo de la ΔV (%) Fase 1.

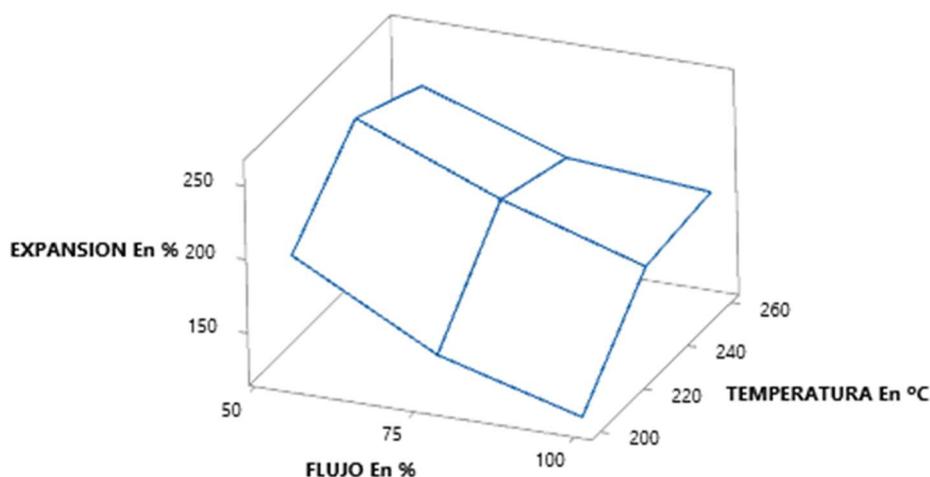


Figura 3-5: Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto las gráficas de contorno, la ANOVA [ver Tabla Anexo V- 1], la Ecuación Anexo IX 1, el Diagrama de Pareto [ver Figura Anexo VII- 1] y las superficies de respuesta [ver Figura 3-5 y Figura Anexo IV 1] asociadas a la Tabla 3-1.

3.3.1.2 Toma de datos 1 - Expansión

Los valores que se muestran a continuación son los de aquellas probetas sobre las que se recogieron medidas para el análisis inicial:

#	T (°C)	Φ (%)	h (mm)	Exp (%)
1\4	230	100	0,1	165,83
1\22	200	77,5	0,1	151,52
1\28	260	77,5	0,1	181,82
1\46	230	55	0,1	242,42
3\7	260	100	0,15	187,50
3\1	200	100	0,15	122,50
3\25	230	77,5	0,15	211,04
3\25	230	77,5	0,15	211,04
3\25	230	77,5	0,15	211,04
3\43	200	55	0,15	201,52
3\49	260	55	0,15	228,79
2\4	230	100	0,2	195,83
2\28	260	77,5	0,2	208,87
2\22	200	77,5	0,2	147,19
2\46	230	55	0,2	259,09

Tabla 3-2: Modelo de la Exp (%) Fase 1.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto las gráficas de contorno, la ANOVA [ver Tabla Anexo V- 2] , la Ecuación Anexo IX 2, el Diagrama de Pareto [ver Figura Anexo VII- 2] y las superficies de respuesta [ver Figura Anexo IV 4] asociadas a la Tabla 3-2.

3.3.2 Optimización de la Fase 1

Dados los límites del rectángulo de Figura 4-1 y tras ver la necesidad de más datos para poder hacer un estudio correcto se ha decidido realizar otro muestreo en un área más acotada, para así tener más puntos para generar las superficies de respuesta y aportar claridad a la situación en general. Teniendo en cuenta, que en los dos casos las variables más significativas son la temperatura y el flujo , ya sea en su primer o segundo orden, se han establecido unos nuevos márgenes de trabajo en 70-100% en Φ y 220-260°C.

Partiendo de los límites recién establecidos se diseña el nuevo modelo de Box-Behnken:

- Temperatura: 220-260°C.
- Alto de capa: 0,1-0,2mm.
- Φ : 100-70%.

3.3.2.1 Optimización de la Fase 1 - Variación Del Espesor

Los valores que se muestran a continuación son los de aquellas probetas sobre las que se recogieron medidas para el análisis de optimización una vez fijados los nuevos límites de experimentación.

#	T (°C)	Φ (%)	h (mm)	ΔV (%)
1\33	240	70	0,1	45,83
1\17	220	85	0,1	46,67
1\21	260	85	0,1	65,83
1\5	240	100	0,1	85,00
3\35	260	70	0,15	44,17
3\31	220	70	0,15	50,00
3\19	240	85	0,15	76,67
3\19	240	85	0,15	76,67
3\19	240	85	0,15	76,67
3\7	260	100	0,15	87,50
3\3	220	100	0,15	72,50
2\33	240	70	0,2	57,50
2\17	220	85	0,2	71,67
2\21	260	85	0,2	71,67
2\5	240	100	0,2	95,00

Tabla 3-3: Modelo de la ΔV (%) Optimización Fase 1.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto las gráficas de contorno, la ANOVA [ver Tabla Anexo V- 3], la Ecuación Anexo IX 3, el Diagrama de Pareto [ver Figura Anexo VII- 3] y las superficies de respuesta [ver Figura Anexo IV 7] asociadas a la Tabla 3-3.

Al finalizar el análisis de estos datos se ha visto oportuno un nuevo muestreo más acotado para aumentar la calidad de predicción de las regresiones, así se justifica la optimización dentro de esta Fase.

3.3.2.2 Optimización de la Fase 1 - Expansión

Los valores que se muestran a continuación son los de aquellas probetas sobre las que se recogieron medidas para el análisis de optimización una vez fijados los nuevos límites de experimentación.

#	T (°C)	Φ (%)	h (mm)	Exp (%)
1\33	240	70	0,1	208,33
1\17	220	85	0,1	172,55
1\21	260	85	0,1	195,10
1\5	240	100	0,1	185,00
3\35	260	70	0,15	205,95
3\31	220	70	0,15	214,29
3\19	240	85	0,15	207,84
3\19	240	85	0,15	207,84
3\19	240	85	0,15	207,84
3\7	260	100	0,15	187,50
3\3	220	100	0,15	172,50
2\33	240	70	0,2	225,00
2\17	220	85	0,2	201,96
2\21	260	85	0,2	201,96
2\5	240	100	0,2	195,00

Tabla 3-4: Modelo de la Exp (%) Optimización Fase 1.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto las gráficas de contorno, la ANOVA, la Ecuación Anexo IX 4, el Diagrama de Pareto y las superficies de respuesta [ver Figura Anexo IV 9] asociadas a la Tabla 3-4.

3.3.3 Totalidad de los datos de la Fase 1

Con todos los datos recogidos hasta el momento se han realizado las siguientes acciones. Generar las ANOVA correspondientes, las superficies de respuesta y diagramas de contorno. Todo ello para así tener una visión general más detallada del experimento y así fijar las siguientes zonas más relevantes.

3.3.3.1 Datos Acumulados De La Fase 1 - Variación Del Espesor

A la vista de la ANOVA [ver Tabla Anexo V- 5] generada todas las variables son significantes por la discriminación de los p-valores, pero gracias al diagrama de Pareto [ver Figura Anexo VII- 5] se puede resaltar la importancia del flujo y de la temperatura, ya sea en su primer o segundo orden.

Se definen como Región 1-X a las que se han considerado como las áreas de interés que se pueden comprobar en la Figura 4-3:

Región 1-1:

- Temperatura: 255-260°C.
- Flujo (%) : 90-100 %

Región1-2:

- Temperatura: 225-235°C.
- Flujo (%) : 90-100 %

Región 1-3:

- Temperatura: 235-245°C.
- Flujo (%) : 90-100 %

3.3.4 Errores de la Fase 1

El desarrollo de esta fase se realizó con normalidad, tras eliminar de manera experimental los flujos más reducidos (0-45%). Las probetas de la Figura 3-6 se han impreso con los flujos del 10% para la 2-55, 20% para la 2-61 y de 40% en la 2-67.



Figura 3-6: Errores de impresión en distintos puntos de la Región 1-1.

A pesar de conocer los límites del trabajo, se decidió hacer una prueba de impresión con estos flujos tan reducidos. Como era de esperar estos flujos de impresión no son válidos, ya que no pasan la inspección visual. En ellas se produce, no solo una porosidad muy alta, sino que quedades en las caras de las probetas. Además, durante el primer muestreo que se realizó, en la pieza 3-36 se produjo un error en impresión al comienzo. Se hizo la repetición de la impresión, esta vez con tres muestras para afianzar que no es problema de la máquina y tras a reimpresión, se confirma que es un límite que no es alcanzable ya que no supera la inspección visual inicial.

Corresponde por lo tanto aumentar el límite inferior del flujo pasando del 50% al 55% manteniendo constantes el resto de parámetros. Para encontrar unos límites válidos para el modelo que se pretende realizar con Box-Behnken. Una vez que se ha comprobado que el flujo de 55% es un límite asumible, se procede con las impresiones y la toma de datos.



Figura 3-7: Fallo de impresión 3-36 (izq.) y reimpresión 3-36 (der.).

La probeta 3-35 dio un error de calidad de impresión, concretamente ha sido una acumulación de material en una de sus caras. El resto de la pieza no posee ningún defecto así que al poder realizar las mediciones y tras la inspección visual, se ha dado por válida ya que es un error de calidad que se soluciona con una reimpresión. No se considera que haya fallo de incompatibilidad de los parámetros.



Figura 3-8: Defecto de calidad probeta 3-35.

3.4 Fase 2 de laboratorio

Esta Fase englobará el análisis de la ΔV (%) de las Regiones 1-(1,2,3) [ver Figura 3-9]. Dado que se ha demostrado que la variable de alto de capa es la menos significativa, para la variación del espesor, se va a realizar esta Fase manteniendo la altura de capa en 0,2mm.

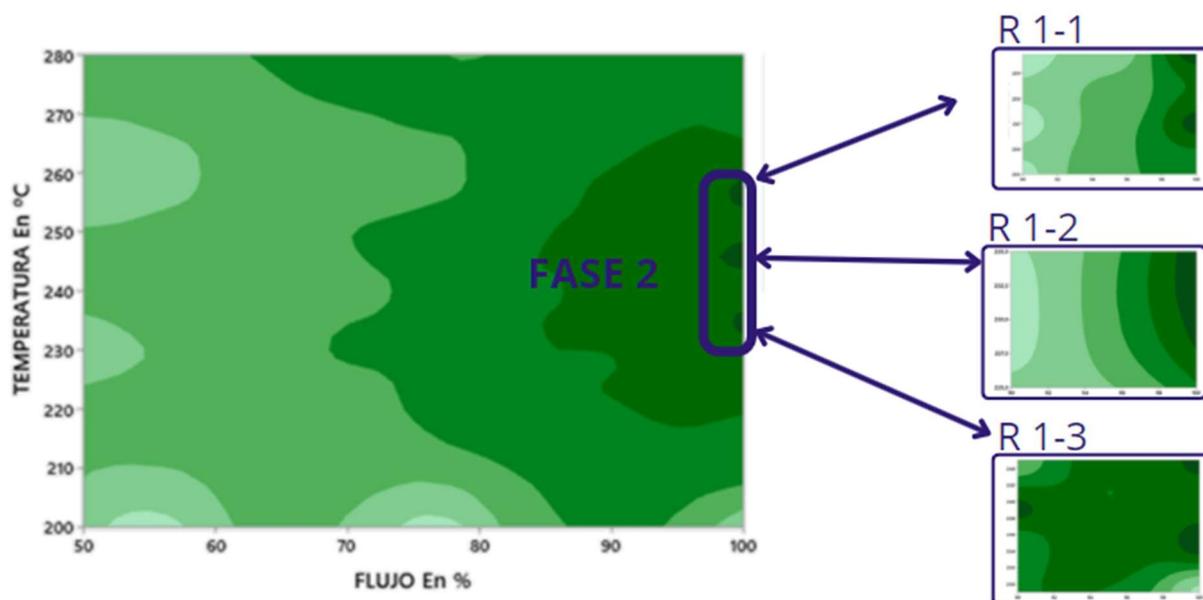


Figura 3-9: Vista previa sobre la ΔV (%) de la Fase 2.

Por ello a la hora de mostrar los resultados obtenidos solo se presentará una única superficie de respuesta.

3.4.1 Región 1-1

Analizando La **Región 1-1** se tomarán saltos de un grado en temperatura de 255-260°C y en flujo (%) saltos de 5% de 90-100%

#	T (°C)	Φ (%)	ΔV (%)
2\68	255	90	84%
2\70	257	90	83%
2\73	260	90	81%
2\74	255	95	95%
2\77	258	95	91%
2\79	260	95	86%
2\80	255	100	97%
2\82	257	100	107%
2\85	260	100	108%

Tabla 3-5: Modelo de la Región 1-1.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto las gráficas de contorno, la ANOVA, la Ecuación Anexo IX 7, el Diagrama de Pareto y la superficie de respuesta asociada a la Tabla 3-5.

3.4.2 Región 1-2

Para el análisis de la **Región 1-2**. Se harán saltos de 2°C de 225-235°C y de 5% de 90-100%.

#	T (°C)	Φ (%)	ΔV (%)
2\86	225	90	81,67
2\88	229	90	77,50
2\91	235	90	79,17
2\92	225	95	84,17
2\94	229	95	87,50
2\97	235	95	87,50
2\98	225	100	94,17
2\100	229	100	101,67
2\103	235	100	104,17

Tabla 3-6: Modelo de la Región 1-2.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto las gráficas de contorno, la ANOVA, la Ecuación Anexo IX 8, el Diagrama de Pareto y las superficies de respuesta asociada a la Tabla 3-6.

3.4.3 Región 1-3

Finalizando con la **Región 1-3**. Se harán saltos de 2°C de 235-245°C y de 5% de 90-100%.

#	T (°C)	Φ (%)	ΔV (%)
2/113	235	100	107,50
2/115	229	100	84,33
2/118	245	100	105,83
2/119	235	95	104,17
2/122	241	95	100,00
2/124	245	95	102,50
2/125	235	90	97,50
2/127	239	90	106,67
2/130	245	90	90,83

Tabla 3-7: Modelo de la Región 1-3.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto las gráficas de contorno, la ANOVA, la Ecuación Anexo IX 9, el Diagrama de Pareto y las superficies de respuesta asociados a la Tabla 3-7.

3.4.4 Errores de la Fase 2

El único problema que sucedió durante la Fase 2 fue la falta de adherencia en la cama caliente. Se solucionó con el uso de una laca sobre la base [ver Figura 3-10].



Figura 3-10: Laca adhesiva para la base de impresión.

3.5 Fase 3 de laboratorio

Con los resultados obtenidos de las Fases anteriores se ha considerado productivo realizar una toma de muestras por encima de la zona de temperaturas que se tenía prevista. Subiendo el muestreo hasta los 280°C [ver Figura 3-2]. Comprobando si a estas temperaturas, que no se consideraban, puede llegar a ser impreso el LW-PLA. Además, se aprovecharán los datos acumulados hasta el momento para hacer un análisis de la situación general, esta vez añadiendo el apartado de dureza.

3.5.1 Fase 3 - Variación De Espesor

#	T (°C)	Φ (%)	h (mm)	ΔV (%)
1\111	270	80	0,1	57,00
1\107	260	90	0,1	64,00
1\109	280	90	0,1	56,67
1\105	270	100	0,1	66,00
3\110	260	80	0,15	63,33
3\112	280	80	0,15	57,00
3\108	270	90	0,15	63,67
3\104	260	100	0,15	75,00
3\106	280	100	0,15	68,00
2\111	270	80	0,2	62,33
2\107	260	90	0,2	76,00
2\109	280	90	0,2	64,67
2\105	270	100	0,2	76,00

Tabla 3-8: Modelo de la Fase 3.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto las gráficas de contorno, la ANOVA, la Ecuación Anexo IX 12, el Diagrama de Pareto y las superficies de respuesta [ver Figura Anexo IV 27].

3.5.2 Datos acumulados De La Fases 1, 2 y 3 - Variación De Espesor

Habiendo llegado a este punto no se ha visto conveniente seguir realizando el mismo tipo de experimentos. Por lo tanto, en la Fase 4 se definirá tanto la nueva probeta de ensayos como el tipo de estudio que se pretende realizar. Orientándolo más a la parte de la resistencia, que se obtiene, frente a los estudios que se han venido realizando hasta el momento. Los cuales eran más del ámbito de fidelidad de las medidas una vez impresas las piezas.

3.5.3 Datos acumulados De La Fases 1, 2 y 3 - Expansión

Antes siquiera de definir la Fase 4 se van a marcar las Regiones de más interés para los próximos análisis de resistencia, ya que con los datos acumulados hasta el momento hay intervalos de especial interés. Estos serán denominados como Región 2-X, y sus límites son:

Región 2-1:

- Temperatura: 250-270°C.
- Φ (%): 55-60 %.
- Alto de capa: 0,15 mm.

Región 2-2:

- Temperatura: 205-235°C.
- Φ (%): 55-60 %.
- Alto de capa: 0,15 mm

Región 2-3:

- Temperatura: 215-240°C.
- Φ (%): 65-75 %.
- Alto de capa: 0,15 mm

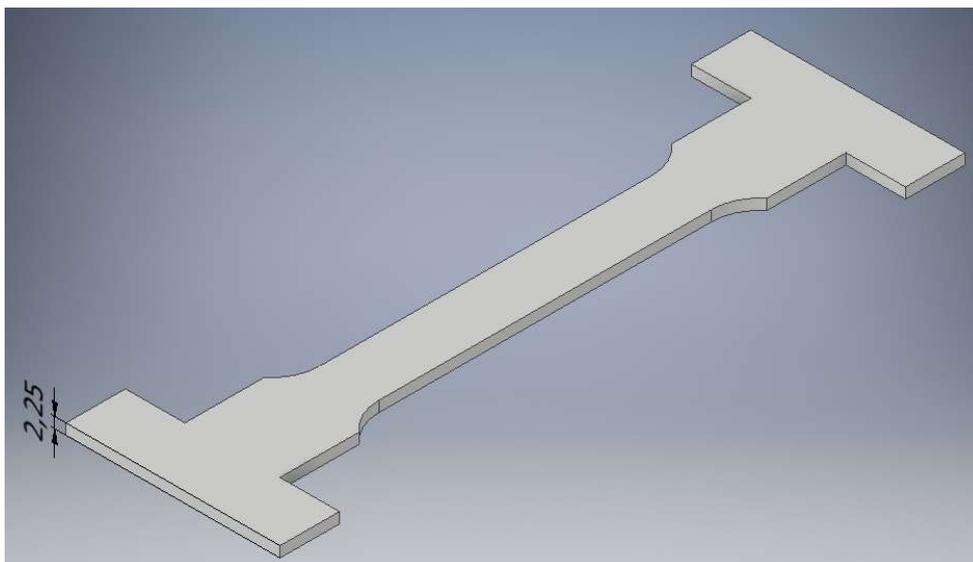


Figura 3-11: Probeta genérica de la Fase 4.

El análisis de estas Regiones será llevado a cabo en la Fase 4, en las que ya se hará un cambio completo de la metodología, ya que se pasará del examen dimensional a un ensayo de resistencia con probetas y material específico.

3.5.4 Datos de la Dureza

Se ha esperado hasta este punto para el realizar el análisis de la dureza, porque no era el parámetro principal del estudio, y al poder sacar este valor de las probetas se han acumulado datos hasta el final de la Fase 3. En la que se tienen datos suficientes como para hacer un estudio [ver Tabla 3-9].

A todas las probetas de las Fases 1,2 y 3 se les ha medido la dureza obteniendo los siguientes valores:

#	DUREZA SHORE	#	DUREZA SHORE
2/115	27	2/127	22
1\4	27	1\22	22
2\103	26	2\105	22
2\5	26	2\82	21
2\100	25	2/122	21
2/119	25	2/124	21
2\4	25	3\7	21
1\5	25	3\7	21
3\3	25	3\7	21
2\4	25	3\104	21
2\94	24	2\73	20
2\98	24	2\74	20
2/113	24	2\77	20
2/118	24	2\79	20
1\4	24	2\85	20
2\86	23	2\91	20
2\92	23	2/125	20
2\97	23	3\1	20
3\25	23	3\43	20
3\25	23	2\17	20
3\25	23	3\1	20
3\25	23	2\109	20
3\106	23	2\68	19
2\80	22	2\70	19
3\19	18	2\33	13
3\19	18	1\28	12
3\19	18	3\35	12
1\107	18	1\22	12
1\109	18	1\28	12
1\105	18	3\110	12
3\108	18	2\22	11
2\28	16	1\17	11
2\21	16	2\22	11
2\28	16	2\46	10
1\33	15	1\46	8
1\21	15	3\49	8
3\31	15	2\107	7
1\111	15	1\39	6
3\112	15	3\42	6
2\111	14	2/130	19

Tabla 3-9: Registro de datos de dureza de las Fases 1, 2 y 3.

3.5.5 Errores de la Fase 3

En la probeta 2-111 se produjo un fallo en la calidad superficial [ver Figura 3-12]. Pero debido a que el objeto de esta Fase es comprobar la compatibilidad de parámetros y no tanto la calidad superficial, se ha dado por válida la probeta ya que el fallo no era generalizado y no impedía la toma de las medidas pertinentes.

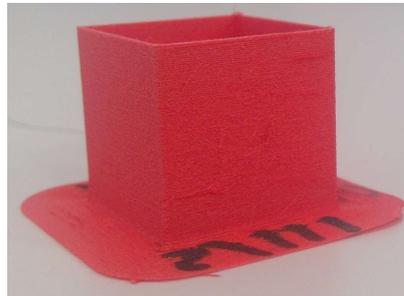


Figura 3-12: Fallo por Z-wobbling en la probeta 2-111.

3.6 Fase 4 de laboratorio

Tras delimitar las regiones de interés, al finalizar la Fase 3 reflejadas en la Figura 3-13, se ha decidido hacer un cambio de ensayo, ya que se va a realizar un estudio estructural y no dimensional como hasta el momento. Los cambios, previstos y justificados en detalle en el apartado 3.2, tanto de las probetas como de los ensayos, se ve motivado por la necesidad de conocer valores de la resistencia que ofrece el LW-PLA a tracción en las regiones de mayor expansión.

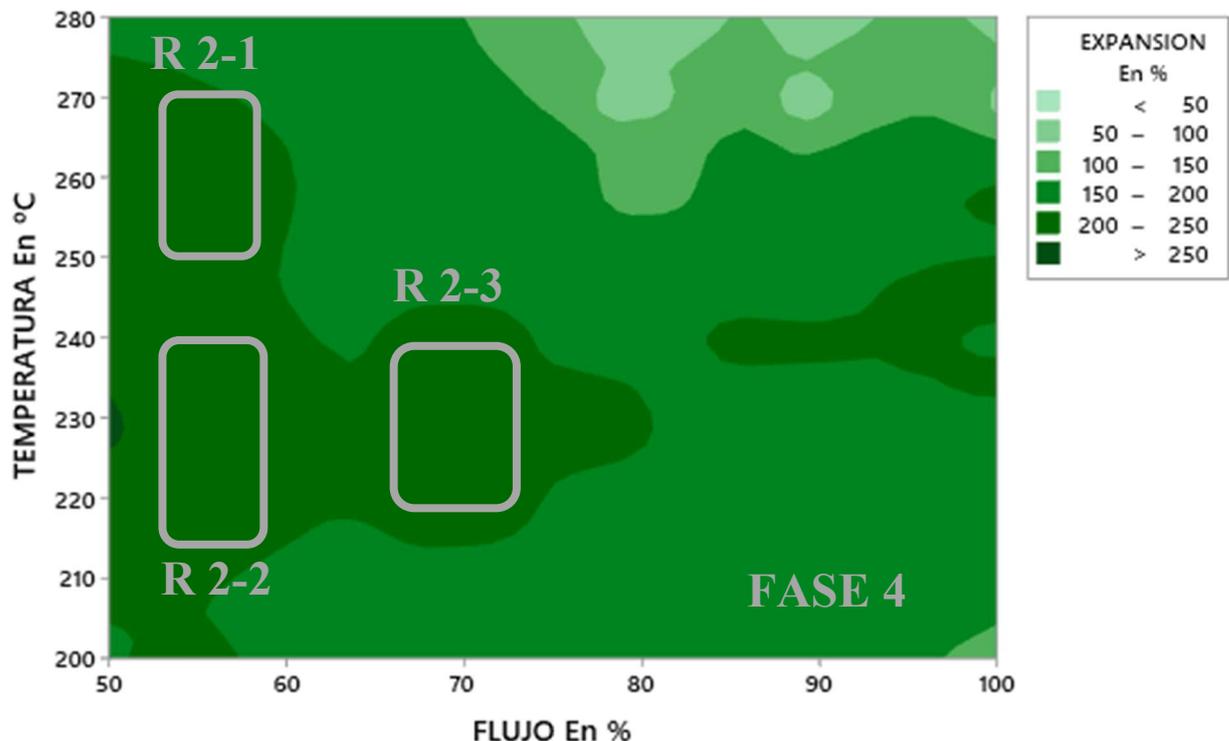


Figura 3-13: Vista previa sobre expansión de la Fase 3.

El montaje propuesto inicialmente fue el de la Figura 3-14. Este contenía un reloj comparador para medir distancias, que posteriormente fue eliminado ya que se determinó que no iba a ser relevante la medición de longitudes, debido a que no se buscaba la relación de la tensión con la deformación si no el límite de rotura.

Otro cambio que se realizó sobre el montaje inicial [ver Figura 3-14], fue la introducción de un sensor LEANSTAR MD30-6 [30], que es un FSR (que es una resistencia variable por presión), con el que se realizará la medición de la fuerza debido a los errores que fueron apareciendo en el desarrollo de la Fase explicados posteriormente.



Figura 3-14: Montaje con reloj comparador.

Dado que el montaje empleado de la resistencia variable no proporciona el valor de la fuerza aplicada directamente sobre la probeta, se ha visto necesario realizar un divisor de tensión como el de la Figura 3-15. Donde la salida analógica se conecta directamente a la Raspberry pi que es la donde se ha programado un código simple [ver Figura Anexo VIII- 1] para la conversión de valores de voltaje en fuerza.



Figura 3-15: Esquema del divisor de tensión.

El código permite conocer tanto el valor de FSR como el V_0 que se obtiene del circuito, a parte del código presentado en el Anexo III, se presentarán las ecuaciones que se realizan dentro del circuito para la obtención de estos datos.

Del divisor de tensión de la Figura 3-15 se obtiene la Ecuación 3-4.

$$V_0 = V_{cc} \frac{R}{R + FSR}$$

Ecuación 3-4: Relación de voltajes de un divisor de corriente.

Siendo:

V_0 : valor fijo de 3.3V que necesita la Raspberry pi para funcionar.

V_{cc} : el valor del voltaje variable que llega a la Raspberry pi.

R : una resistencia de valor fijo que en el caso del estudio es de 10 K Ω .

FSR : valor variable de la resistencia variable por presión.

Despajando la ecuación anterior se obtiene la Ecuación 3-5 con la que se puede calcular el valor buscado de la FSR.

$$FSR = R \left(\frac{V_{cc}}{V_0} - 1 \right)$$

Ecuación 3-5: Valor de la FSR.

El hecho de que se haya tomado una resistencia fija de valor 10 K Ω no ha sido arbitrario, ya que el siguiente paso es la obtención del valor de la FSR y para ello se necesita una sensibilidad suficiente en la región en la que está el límite de tensión a tracción de las probetas, y tras ensayos, que se realizaron en la parte de diseño, se delimitó que este límite se encuentra en los valores de 300 a 500 N por lo que según los valores que toma la FSR bajo dichas presiones una resistencia 10 K Ω es mejor opción que la recomendada por el fabricante de 30 K Ω .

A la vista de los resultados que se obtenían con la Ecuación Anexo VIII 1, se ve justificada la calibración específica del sensor para el caso concreto del ensayo. Para ello, se han usado dos pesas de 5Kg, una dos de 2Kg, una de 1Kg y para los 50 Kg se usó la propia máquina de tracción [ver Figura 3-16].



Figura 3-16: Proceso de calibración.

El proceso consiste en medir la resistencia a la que se corresponde la resistencia variable en función de unos pesos conocidos, en el caso de estudio fueron 5, 10, 15 y 50KG. De esta manera se calcula la

conductancia, que es la inversa de la resistencia (G medida en Siemens) para así poder obtener una relación lineal entre estos dos parámetros, consiguiendo así la recta de la Figura 3-17 que modela el comportamiento del sensor según la Ecuación 3-6.

F (N)	G (S)
50	140,35
100	254,54
150	343,79
500	909,09

Tabla 3-10: Resultados de la calibración.

Obteniendo con los datos de la Tabla 3-10 el siguiente gráfico.

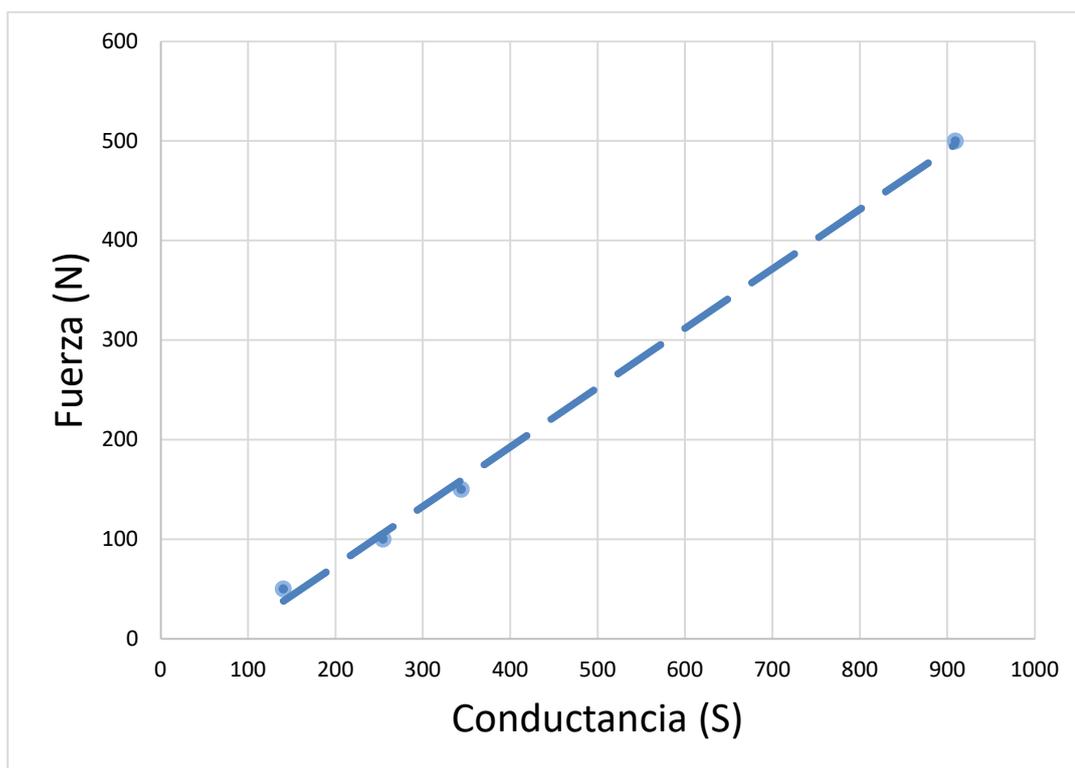


Figura 3-17: Calibrado de la FSR.

Cuya recta de regresión es la que sigue:

$$y = 0,5967x - 45,785$$

Ecuación 3-6: Represión lineal que modela la FSR.

Con un ajuste de $R^2 = 0,9978$ por lo que la regresión lineal empleada es válida.

Una vez finalizados todos los preparativos para la realización de esta Fase 4 se procede al análisis de cada una de las Regiones de interés.

3.6.1 Región 2-1

- Temperatura: 250-270°C.
- Φ (%): 55-60 %.
- Alto de capa: 0,15 mm.

Dejando fijo el alto de capa en 0,15 mm y siendo los límites de 250-270°C en temperatura y 55-60 % en flujo. Se han obtenido los datos de la Tabla 3-11.

#	T (°C)	Φ (%)	F (N)
4\1	250	55	462
4\3	260	55	486
4\4	265	55	419
4\5	270	55	443
4\6	250	60	572
4\7	255	60	503
4\8	260	60	565
4\9	265	60	452
4\10	270	60	529

Tabla 3-11: Modelo de la Región 2-1.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto la gráfica de contorno, la ANOVA, la, el Diagrama de Pareto y la superficie de respuesta asociada a la Tabla 3-11.

3.6.2 Región 2-2

- Temperatura: 205-235°C.
- Φ (%): 55-60 %.
- Alto de capa: 0,15 mm

Dejando fijo el alto de capa en 0,15 mm y siendo los límites de 205-235°C en temperatura y 55-60 % en flujo. Se han obtenido los datos de la Tabla 3-12

#	T (°C)	Φ (%)	F (N)
4\11	205	55	382
4\13	215	55	511
4\15	225	55	515
4\17	235	55	441
4\18	205	60	421
4\20	215	60	530
4\22	225	60	537
4\23	230	60	488
4\24	235	60	572

Tabla 3-12: Modelo de la Región 2-2.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto la gráfica de contorno, la ANOVA, la, el Diagrama de Pareto y la superficie de respuesta asociada a la Tabla 3-12.

3.6.3 Región 2-3

- Temperatura: 215-240°C.
- Φ (%): 65-75 %.
- Alto de capa: 0,15 mm.

Dejando fijo el alto de capa en 0,15 mm y siendo los límites de 215-245°C en T (°C) y 65-75 % e. Se han establecido saltos de 10 en 10°C y en Φ (%) (%) con los que se obtienen los datos de la Tabla 3-13.

#	T (°C)	Φ (%)	F (N)
4\25	215	65	580
4\27	225	65	561
4\28	230	65	516
4\29	235	65	569
4\31	215	75	633
4\32	220	75	524
4\33	225	75	598
4\34	230	75	577
4\35	235	75	579

Tabla 3-13: Modelo de la Región 2-3.

Tratando los datos con Minitab se obtienen tanto la gráfica de contorno, la ANOVA, la, el Diagrama de Pareto y la superficie de respuesta asociada a la Tabla 3-13.

3.6.4 Errores de la Fase 4

Al comienzo de la Fase 4 se apreciaron una serie de eventos que pausaron la actividad en el laboratorio. El principal fue la precisión que se obtenía con el material disponible, además de que la resistencia de la probeta era significativamente menor del valor que se esperaba en un primer momento, tal y como queda reflejado con la Figura 3-18. Por lo que se comenzaron a buscar soluciones con los medios disponibles.



Figura 3-18: Ensayo de tracción de la probeta 4/1.

La primera idea que se propuso para encarar esta eventualidad fue la de duplicar el espesor de las probetas, para que estas tuvieran una resistencia mayor, pero tras los ensayos de verificación [ver Figura 3-19] se decide descartar esa vía para el análisis de las Regiones 2-1,2 y 3, ya que la fuerza alcanzada con el nuevo espesor no aportaba una mayor calidad al experimento y en cambio sí que significaba un coste de tiempo mucho más elevado a la hora de imprimir.

Posteriormente, cuando el montaje ya disponía de precisión suficiente al integrar el FSR, surgieron una serie de errores a la hora de realizar los ensayos, ya que con las mismas fuerzas se registraban valores muy dispares, se demostró que el montaje en sí mismo era erróneo. el problema radicaba en que no se hacía una fuerza uniforme sobre el sensor, por lo que se pensó en encerrar el sensor entre dos placas metálicas, sin ser una decisión acertada.

Finalmente, se tomó la elección de ejercer la fuerza sobre el sensor a través de una moneda aprisionada con un espárrago y con una tuerca fijados a la propia máquina de tracción [ver Figura 3-19]. Este montaje cumple todos los requisitos necesarios para otorgar la repetibilidad (que faltaba en los intentos anteriores), sin bajar ni la calidad ni la precisión en la toma de medidas.



Figura 3-19: Montaje final sobre el sensor.

Marcar también que gracias a la metodología que se ha seguido durante el desarrollo, no solo de esta Fase 4 sino que, a lo largo de todo el proceso, se han conseguido eliminar errores aleatorios producidos a la hora de la medición. Como se vino haciendo con las probetas de las Fases 1, 2 y 3 se ha realizado un muestreo que constaba de tres piezas por configuración, lo cual permitió realizar una media de los valores obtenidos [ver Figura 3-20].



Figura 3-20: Colección de probetas muestreadas en la Fase 4.

Un caso concreto fue la probeta 4-17 en la que se daban unas disparidades muy grandes entre las diferentes fuerzas máximas, que soportaban las probetas en esa configuración. Este error se solucionó con la reimpresión de las tres probetas.

4 RESULTADOS

En este apartado de la memoria se expondrán tanto los resultados gráficos más relevantes en forma de diagramas de contorno y de Pareto, así como las tablas ANOVA, que son imprescindibles para una correcta interpretación de los resultados obtenidos y la secuencia lógica que se ha realizado en el desarrollo. Para ello, los resultados serán presentados por parámetro de análisis. Siendo el primero la variación del espesor, seguida de la expansión, continuando con la dureza y finalizando con la resistencia a tracción [ver Figura 3-2].

4.1 Variación del espesor

Se ha considerado que, para facilitar la lectura de los resultados obtenidos, estos se van a presentar fase a fase .

4.1.1 Análisis de la Fase 1

Tras el primer muestreo fallido en el rango de flujos del 0% al 50% y una vez obtenidos los primeros valores válidos expuestos en Tabla 3-1 y obteniendo que tanto la temperatura como el flujo son las variables más relevantes tal y como se muestra en la Figura Anexo VII- 1. La idea fuerza que se obtiene de esta primera recogida de datos es la necesidad de más datos, lo que justifica la acotación de la etapa de optimización de la Fase 1, quedando reflejada el área de mayor interés en el área resaltada en la Figura 4-1.

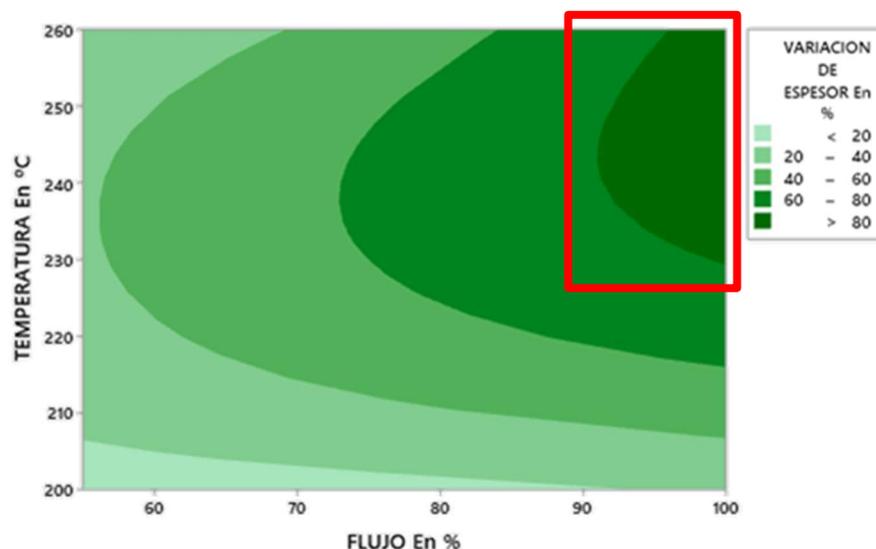


Figura 4-1: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1.

Ya finalizado este segundo muestreo se obtienen una zona de mayor relevancia, que concuerda con la obtenida del primer sondeo, pero esta vez con una resolución mayor, tal y como se muestra en la Figura 4-2.

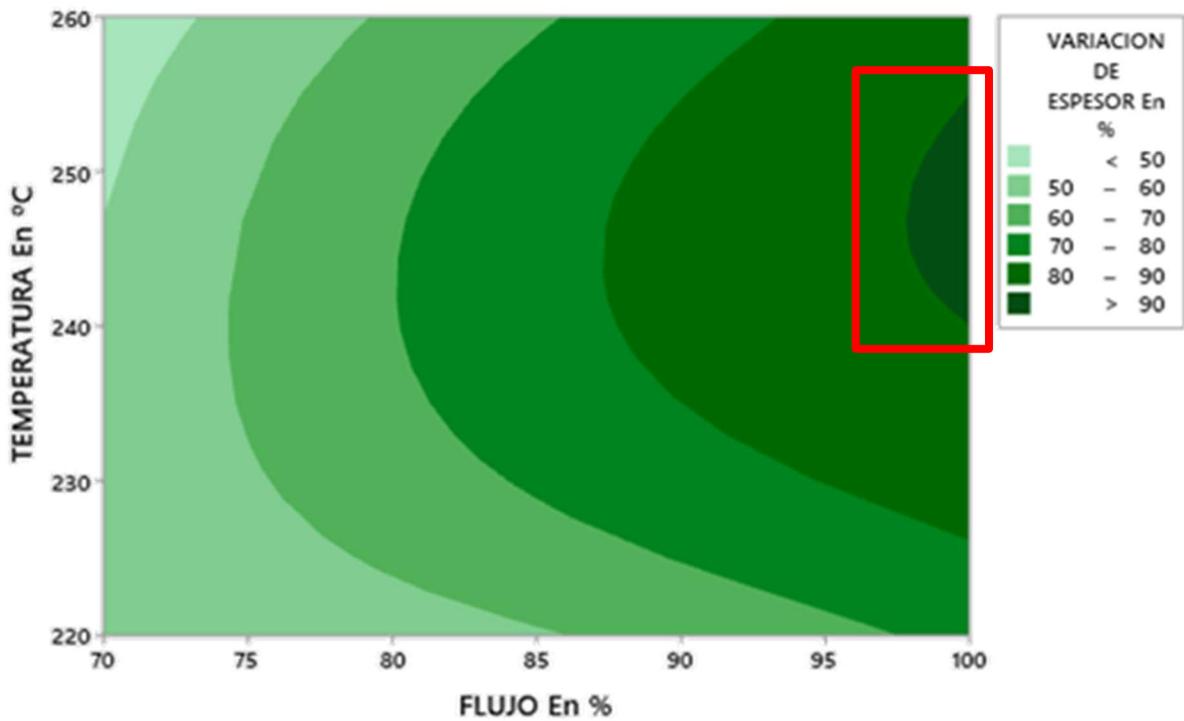


Figura 4-2: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Optimización Fase 1.

Para acabar el análisis de la variación del espesor de la Fase 1 se ha visto productivo realizar el análisis de la situación acumulada. Para de esta manera, integrar todos los valores disponibles y mejorar la calidad de predicción de las regresiones. Como se puede apreciar en la Figura 4-3, al cruzar los datos reunidos, se obtienen regiones mucho más acotadas, que serán el objeto de análisis durante la fase 2.

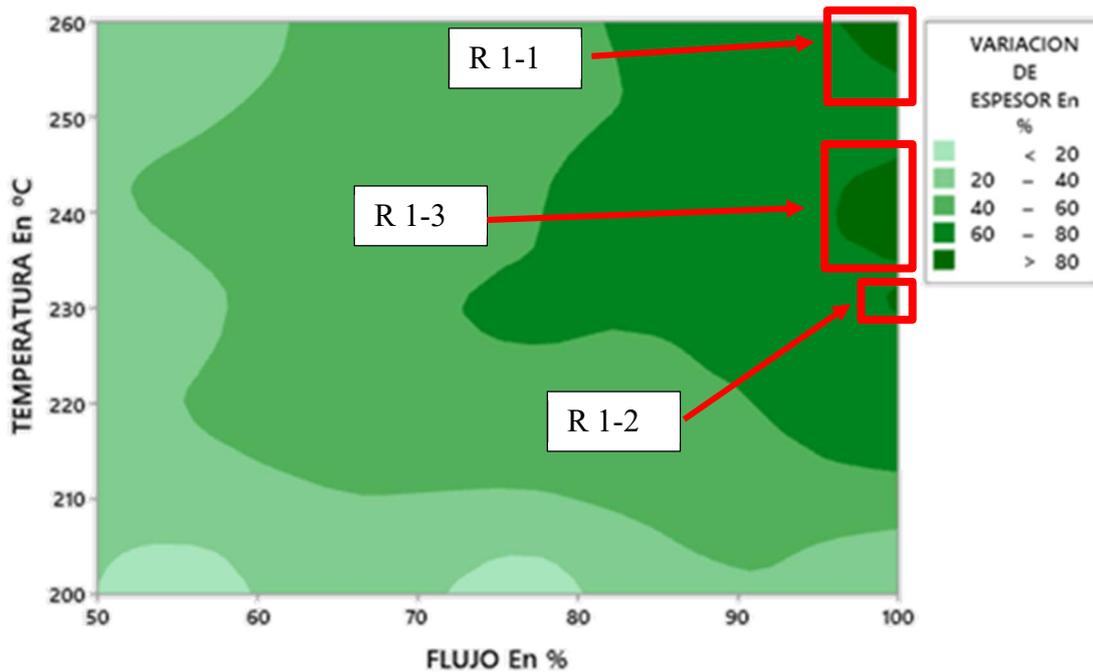


Figura 4-3: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Fase 1 completa.

4.1.2 Análisis de la Fase 2

Ya que lo que se busca en este punto es ver donde se produce la máxima variación del espesor, se ha hecho una toma de datos más detallada para cada una de las Regiones citadas con anterioridad. El denominador común de las Regiones 1-1 y 1-2 y diferenciador respecto a los análisis que se han hecho hasta el momento es que, en estas áreas mucho más delimitadas solo un parámetro es significativo. Siendo en ambos casos ilustrada esta idea tanto con los diagramas de Pareto (Figura 4-4 y Figura 4-5) como con las correspondientes ANOVA (Tabla 4-1 y Tabla 4-2).

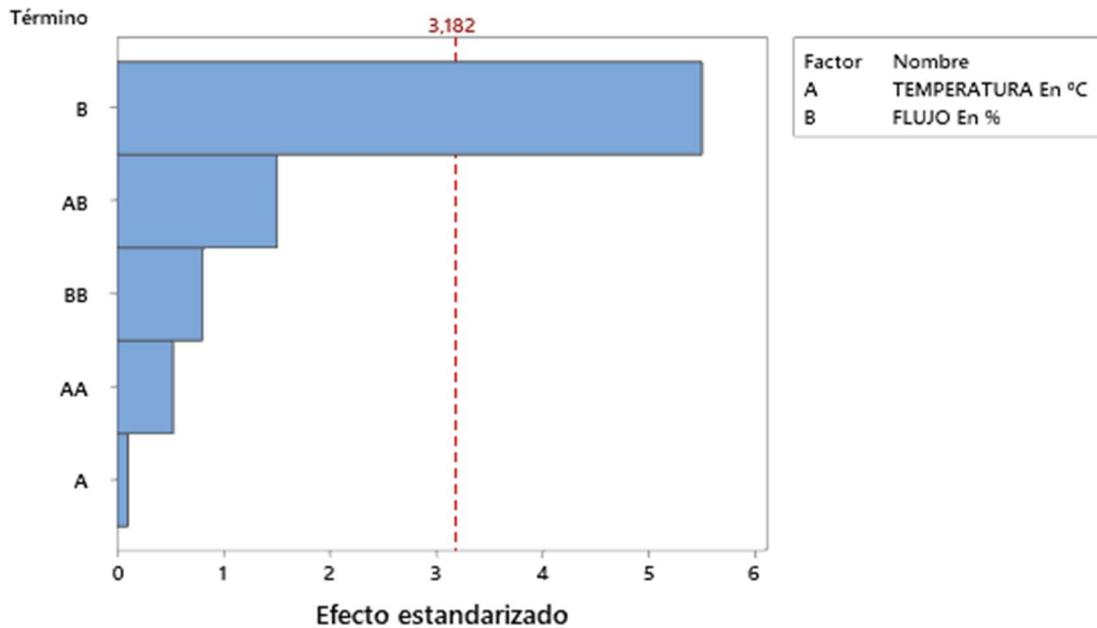


Figura 4-4: Diagrama de Pareto para la Región 1-1.

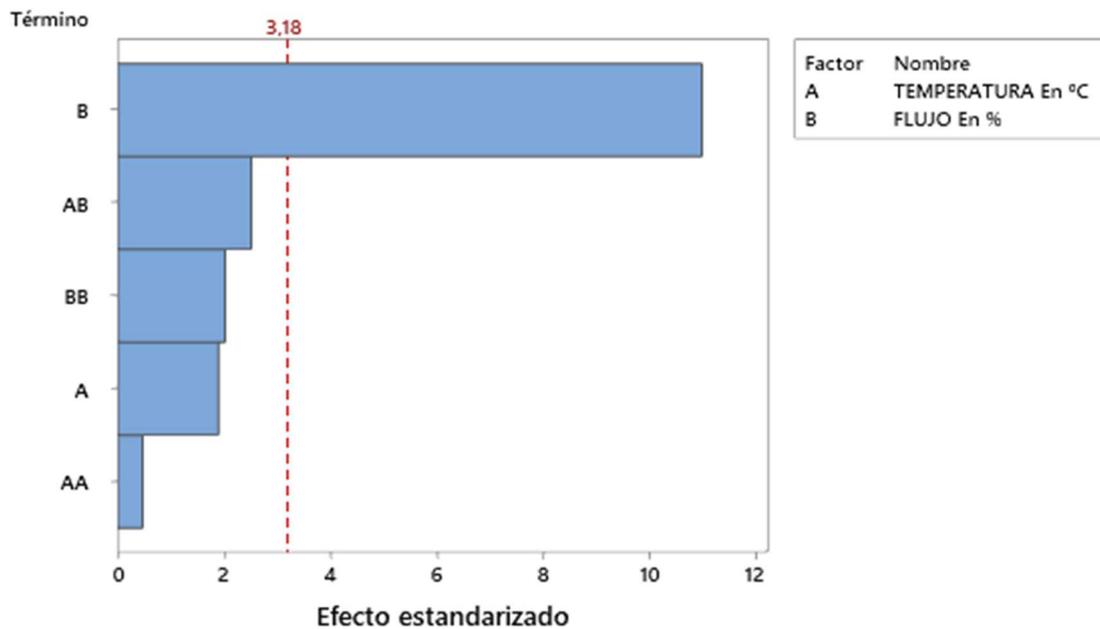


Figura 4-5: Diagrama de Pareto para la Región 1-2.

Una vez conocido el hecho de que solo el flujo es relevante, y haciendo una interpretación de los diagramas de contorno. De la Figura 4-6 se puede asegurar que la región de mayor variación de espesor se encuentra en el rango de 259-260°C y de 257°C en ambos casos con un flujo del 99-100%.

Destacas que exista un máximo en el límite superior de temperatura motiva la realización de la Fase 3, ya que es de interés conocer si el máximo local que se presenta es en efecto un máximo o simplemente queda relegado a un segundo plano con valores más elevados.

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,925
Φ	0,012
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,633
$\Phi * \Phi$	0,477
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T* Φ	0,228

Tabla 4-1: ANOVA de la Región 1-1.

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,154
Φ	0,002
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,671
$\Phi * \Phi$	0,136
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T* Φ	0,087

Tabla 4-2: ANOVA de la Región 1-2.

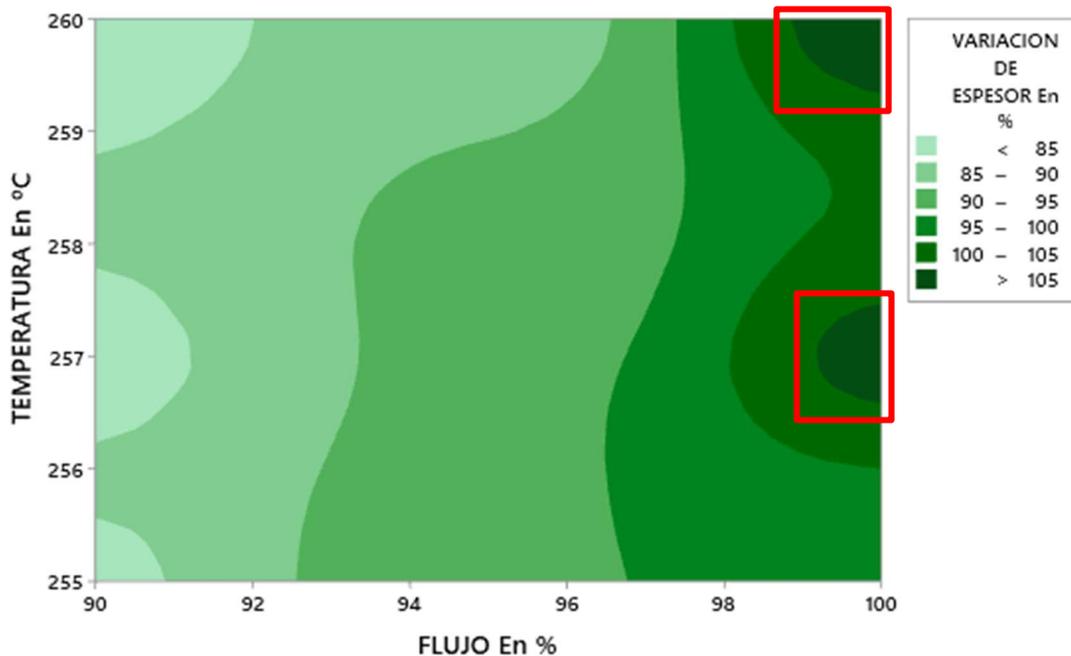


Figura 4-6: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Región 1-1.

De la Figura 4-7 se puede obtener la conclusión de que la región óptima de impresión si busca expansión es el rango de 228-235°C con un Φ (%) del 99-100%

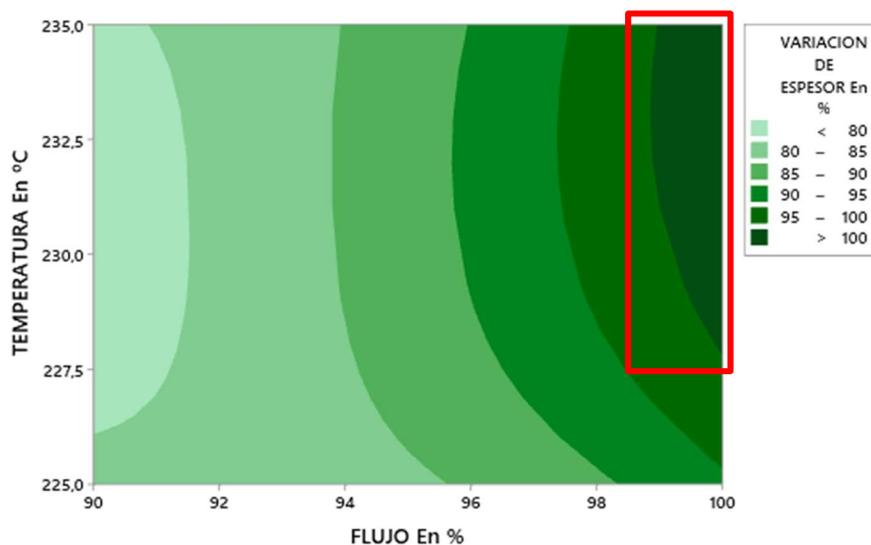


Figura 4-7: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Región 1-2.

En cambio, en la Región 1-3, y por primera vez en todo el trabajo, no se destaca ninguna variable como significativa. Tal y como se muestra en la Tabla 4-3 y en la Figura 4-8

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,140
Φ	0,244
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,080
Φ * Φ	0,834
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T* Φ	0,548

Tabla 4-3: ANOVA de la Región 1-3.

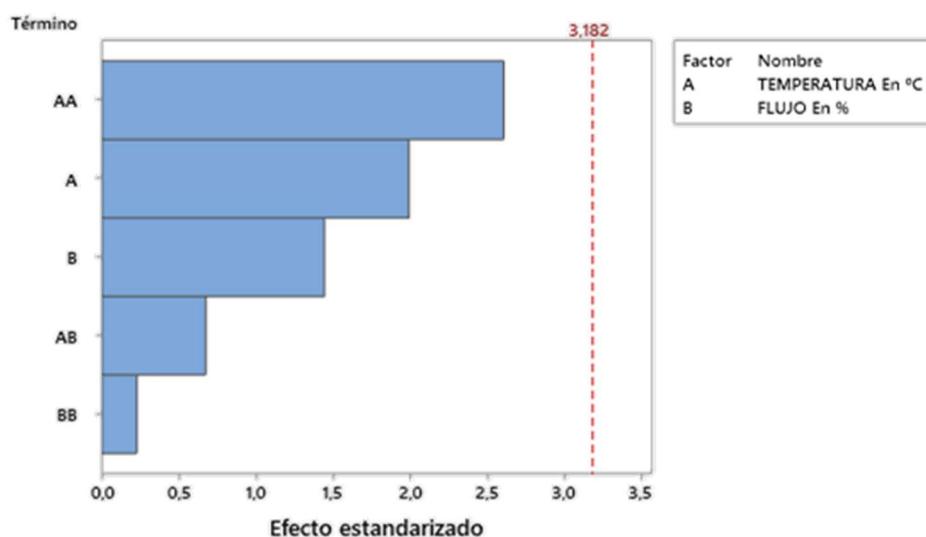


Figura 4-8: Diagrama de Pareto de la Región 1-3.

Sin embargo, gracias al diagrama de Pareto se puede realizar un escalado de significancia viendo que la temperatura en su segundo orden, seguida de la temperatura en primer orden, es el parámetro con mayor relevancia en esta región.

De la Figura 4-9 se puede obtener la conclusión de que la región de máxima variación en el espesor es el rango de 237°C, 244°C con un flujo del 99-100% y en el punto de 239°C con un flujo de 90%

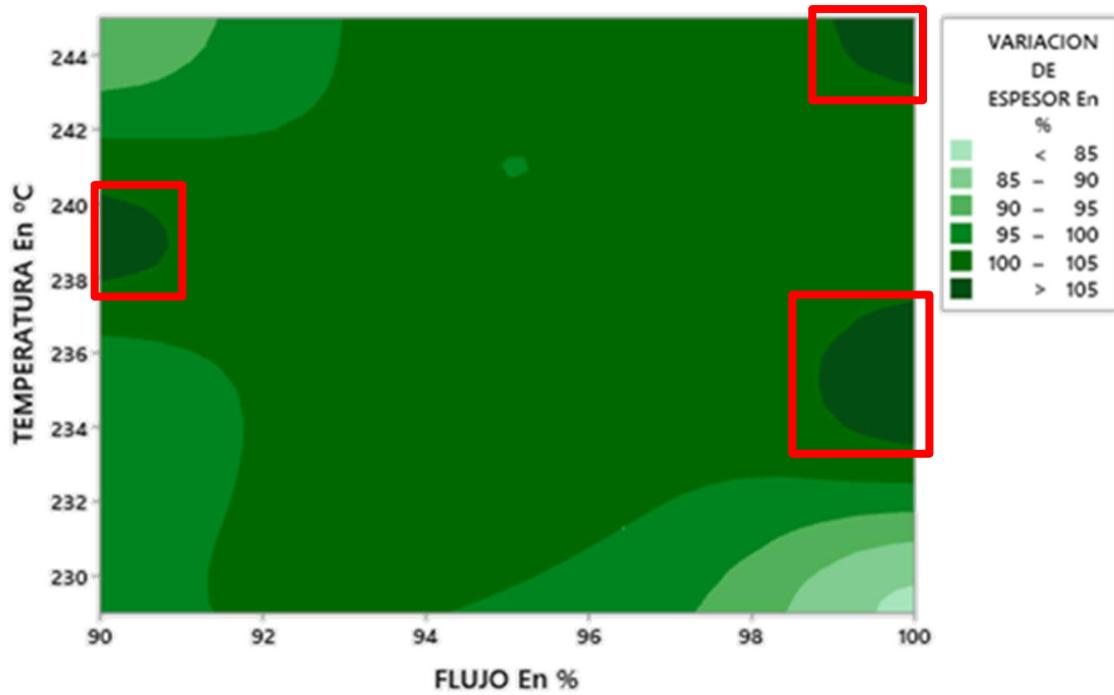


Figura 4-9: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Región 1-3.

4.1.3 Análisis de la Fase 3

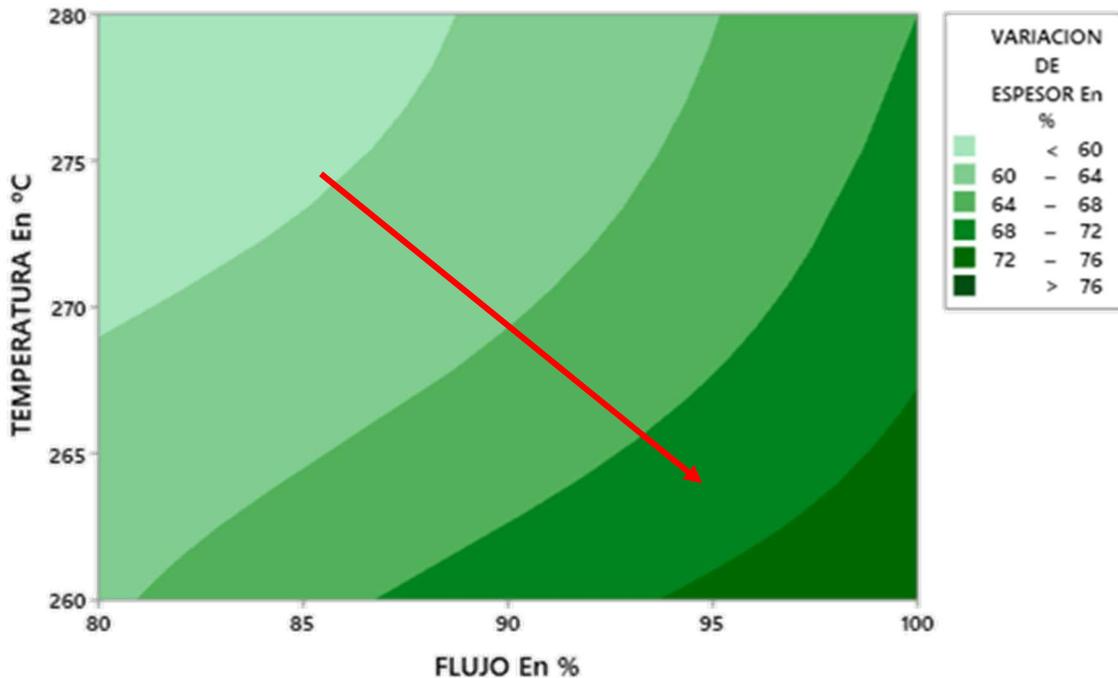


Figura 4-10: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 3.

Tras descubrir un máximo en el límite superior de la temperatura se decidió aumentar la misma hasta los 280°C. Obteniendo el diagrama de contorno que se ilustra con Figura 4-10.

Se demuestra con la Figura 4-11 que efectivamente el máximo se encontraba en la Región 1-1, como era de suponer viendo la tendencia que esta llevaba.

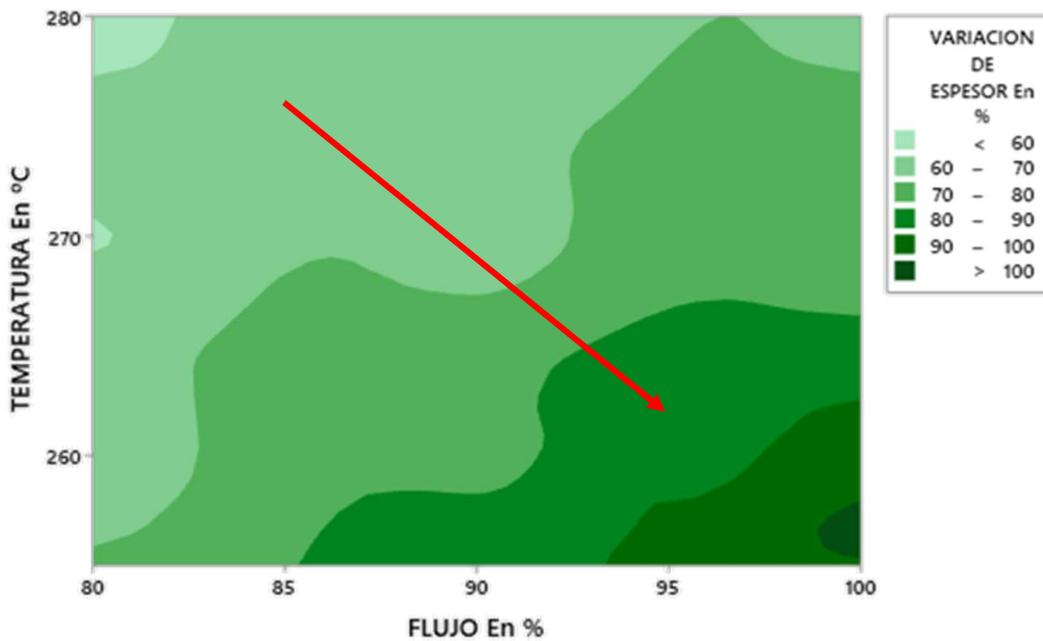


Figura 4-11: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Región 1-1 y Fase 3.

4.1.4 Análisis global de la variación del espesor

Una vez finalizados todos los muestreos de datos para este parámetro los resultados obtenidos son los que se reseñan en la Figura 4-12, ya que gracias a la Figura 4-14 se puede afirmar que el grafico de contorno más relevante es el mostrado a continuación dada la gran diferencia de significancia que tienen tanto el flujo como la temperatura en su segundo orden.

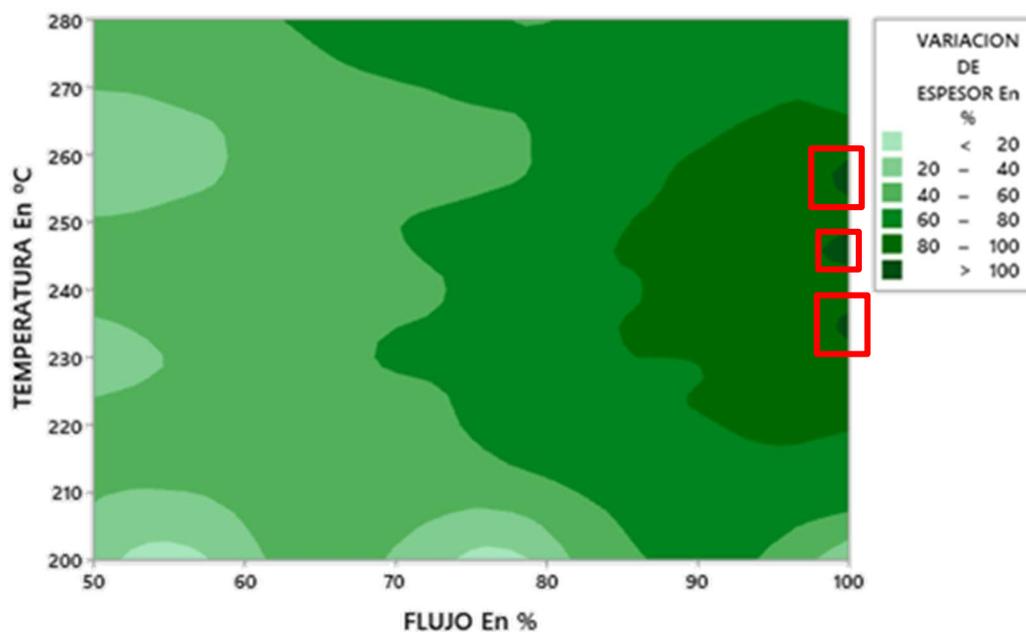


Figura 4-12: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1,2 y 3.

De igual relevancia es hacer referencia a las regiones que generan menores variaciones en el espesor y por lo tanto aportan una mayor fidelidad al objeto final.

Como se puede apreciar en la Figura 4-13 son los flujos del 55-60% los que ofrecen una mayor fidelidad.

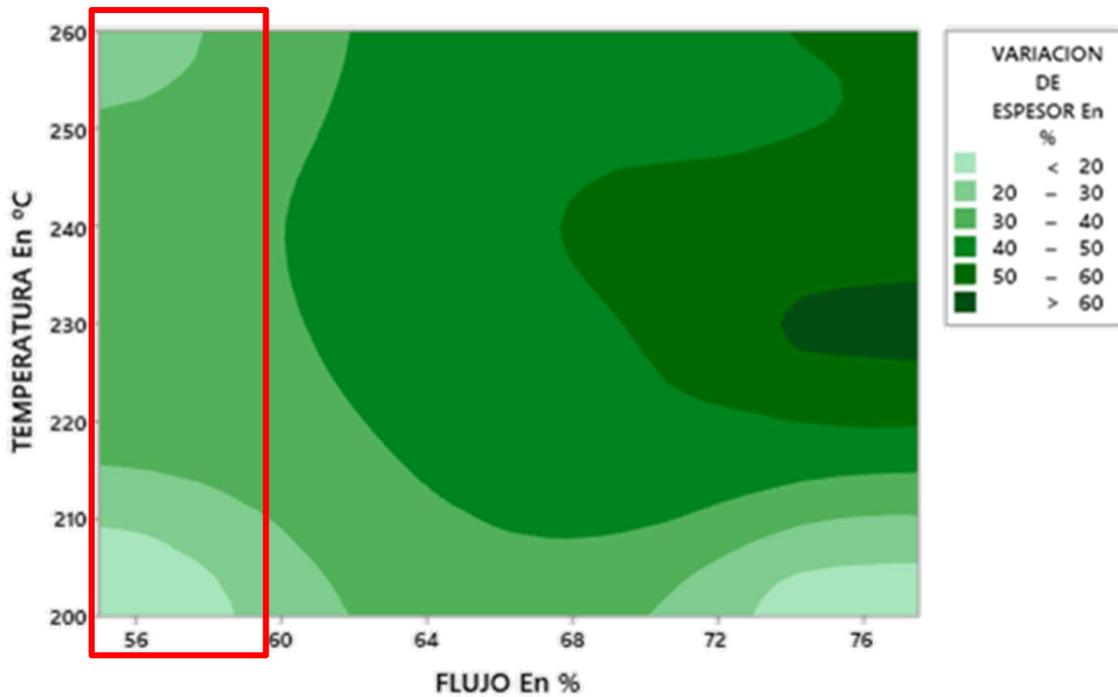


Figura 4-13: Detalle de la Figura 4-12 zonas de menor ΔV (%).

Destacar en esta ocasión, otra vez, que la significancia de los parámetros que se han calificado como relevantes no se ve apoyada por los p-valores de la Tabla Anexo V- 10.

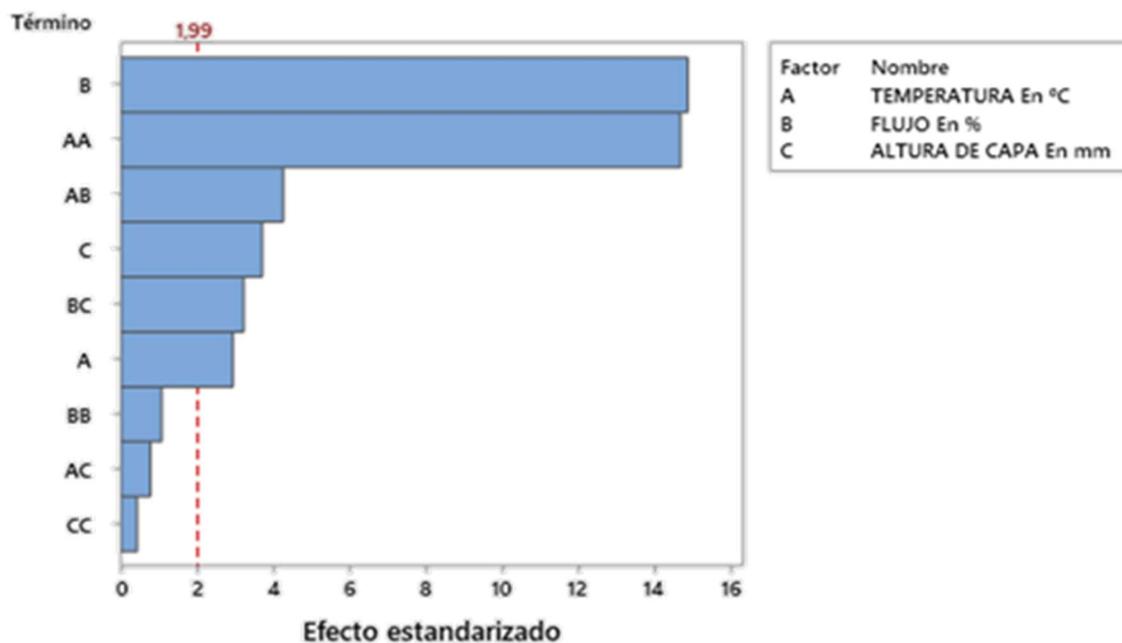


Figura 4-14: Diagrama de Pareto de la Tabla Anexo V- 10

Teniendo en cuenta que la significancia es algo arbitrario, se ha visto acertado el uso del diagrama de Pareto para graduar la importancia de cada una de las variables. Pudiendo ilustrar el peso que tienen la temperatura y el flujo.

Las mayores variaciones se dan con el alto de capa de 0,2 mm, tal y como se refleja en la Figura 4-15, por lo que con altos de capa más reducidos existirá una fidelidad dimensional mayor.

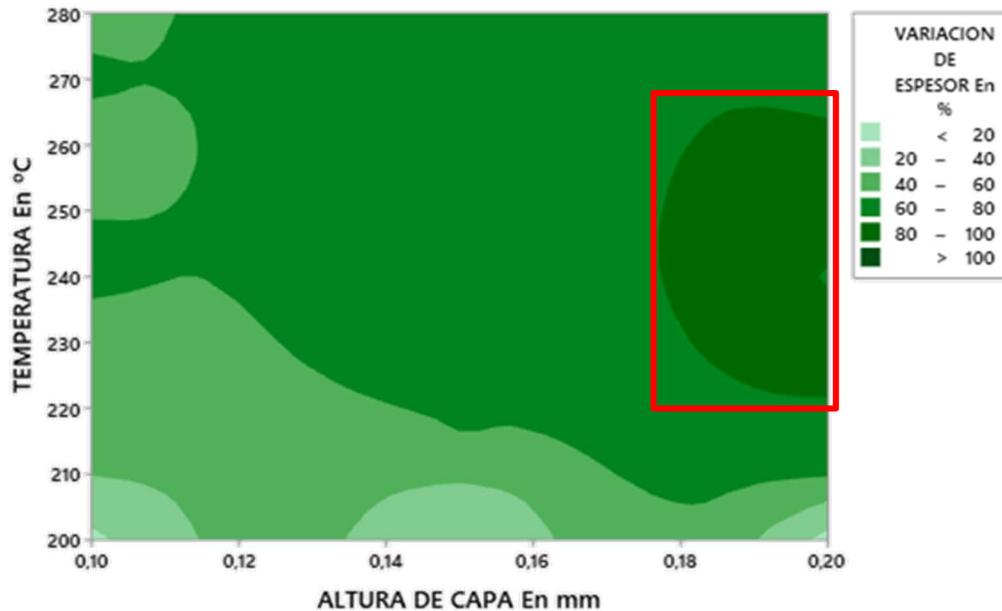


Figura 4-15: Diagrama de contorno de h (mm) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1,2 y 3.

4.2 Expansión

De igual manera que se ha hecho con la variación del espesor se realizará, por fases, el estudio de la expansión.

4.2.1 Análisis de la Fase 1

Tras realizar el primer muestreo se puede apreciar que la zona de mayor expansión se sitúa en los flujos más bajos [ver Figura 4-2].

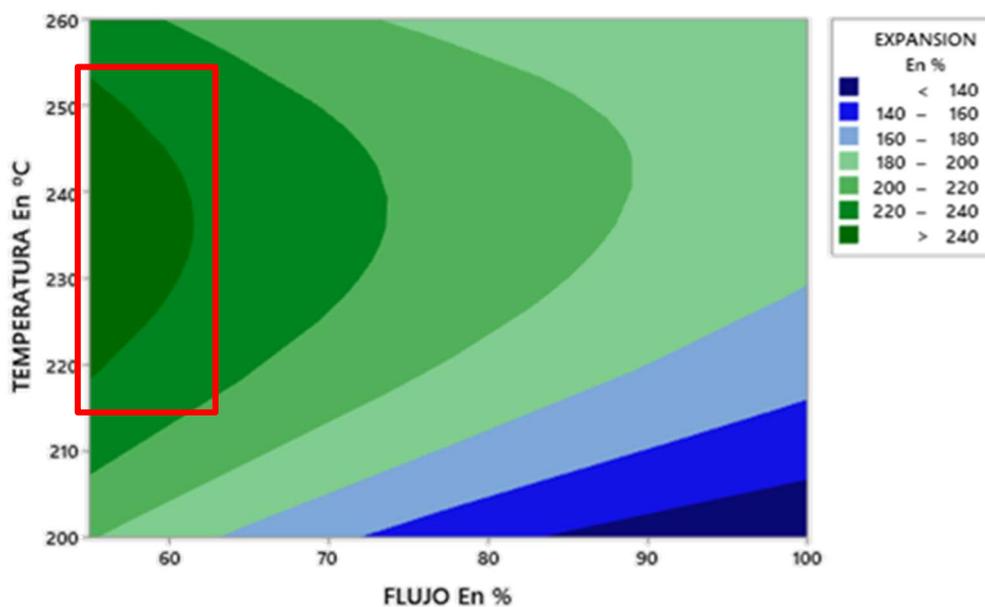


Figura 4-16: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a Exp (%) Fase 1

Como ya se comprobó con la variación de espesor, los flujos por debajo del 55% no son válidos por lo que se aprovecharán las probetas del ensayo anterior. Tras el procesado de los datos de expansión de la fase 1 al completo, incluyendo la optimización de la misma Fase, se obtiene Figura 4-17.

Como se muestra en la Figura Anexo VII- 6 todas las variables con significativas, así que se seguirá la misma decisión tomada con el espesor y se aprovecharán las probetas ya disponibles para el cálculo de las expansiones en busca de más datos para generar la regresión con una mayor precisión, hasta que se encuentren cuáles son los valores significativos en caso de existir.

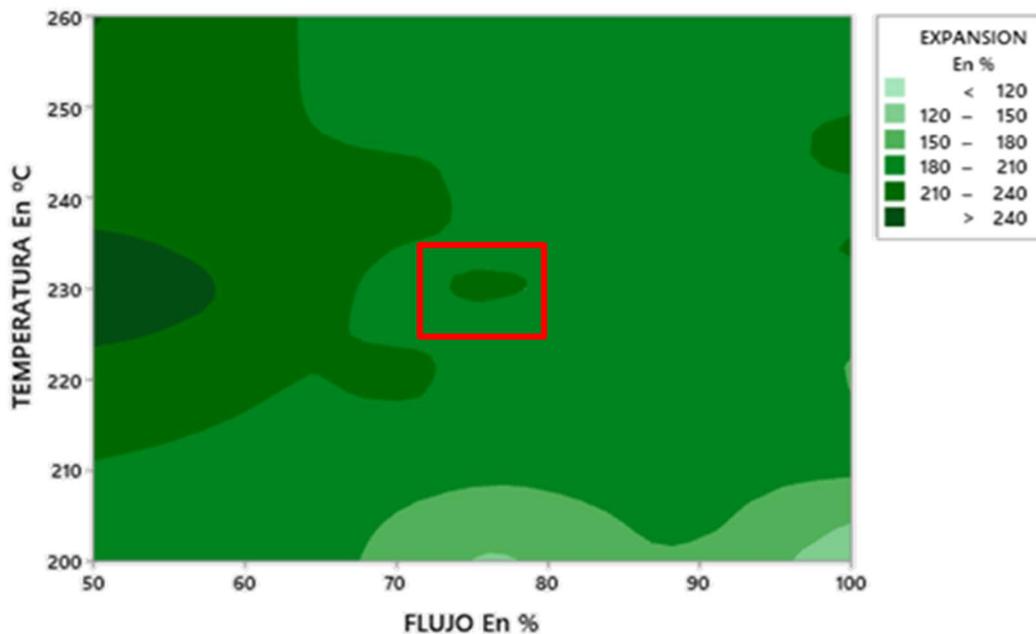


Figura 4-17: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a Exp (%) de la Fase 1 completa

Aun así, cabe destacar la existencia del intervalo de interés marcado en la Figura 4-17.

4.2.2 Análisis de la Fase 2

Al término de la Fase 2 se dispone de una cantidad de valores relevante por lo que la visión global de la situación es la que se presenta en la Figura 4-18.

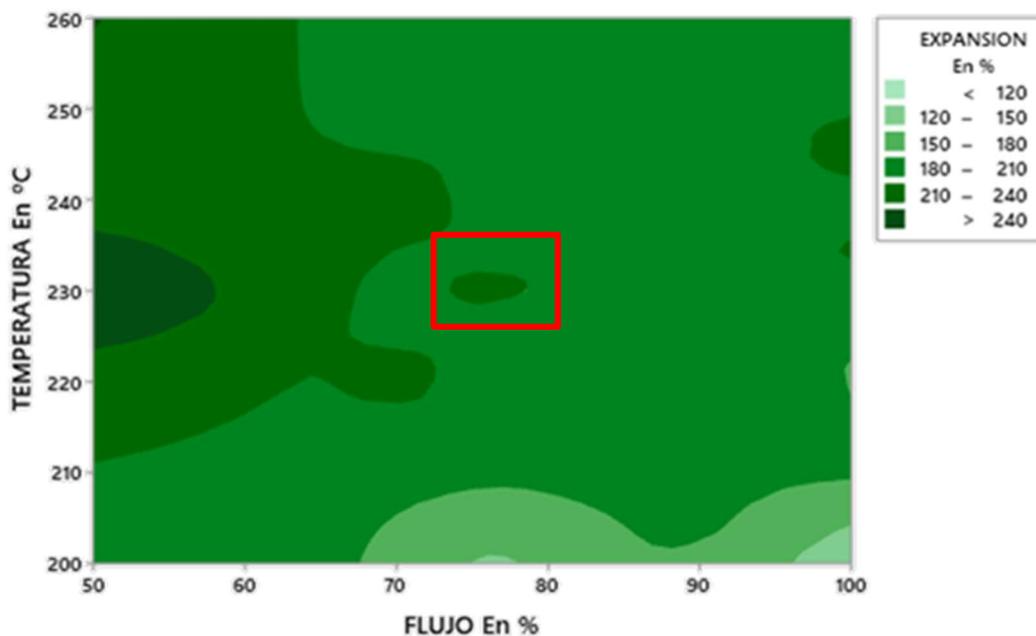


Figura 4-18: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a Exp (%) de la Fase 1 y 2 completa.

Destacar la gran similitud de esta con la Figura 4-17 del apartado anterior, lo que quiere decir que la regresión que se había generado en un primer momento no dista mucho de la realidad, ya que con más datos, estas siguen coincidiendo.

4.2.3 Análisis de la Fase 3

Al igual que sucedió con el espesor, la Fase 3 ha dejado en evidencia que temperaturas más altas no generan máximos superiores de los que ya se disponían en la Fase 2.

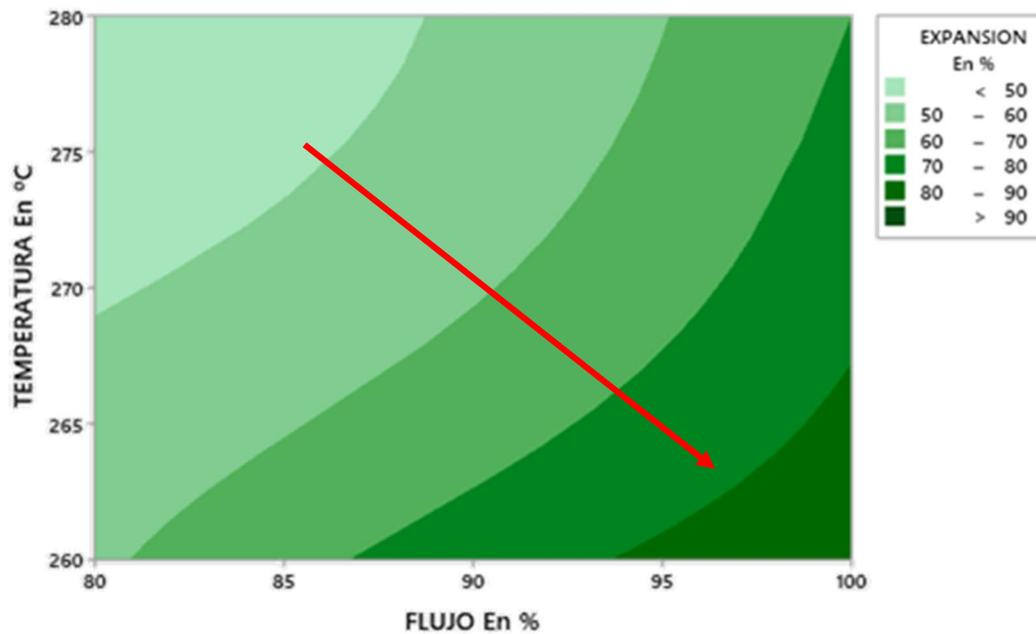


Figura 4-19: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a Exp (%) Fase 3.

4.2.4 Análisis global de la variación de la expansión

Una vez se tienen los datos de todas las fases cabe reseñar que las fases dos y tres simplemente han servido para verificar que no existen máximos en los flujos superiores como queda presentado en la Figura 4-20, siendo de interés las Regiones marcadas sobre la misma, y que serán el objeto de estudio de la Fase 4.

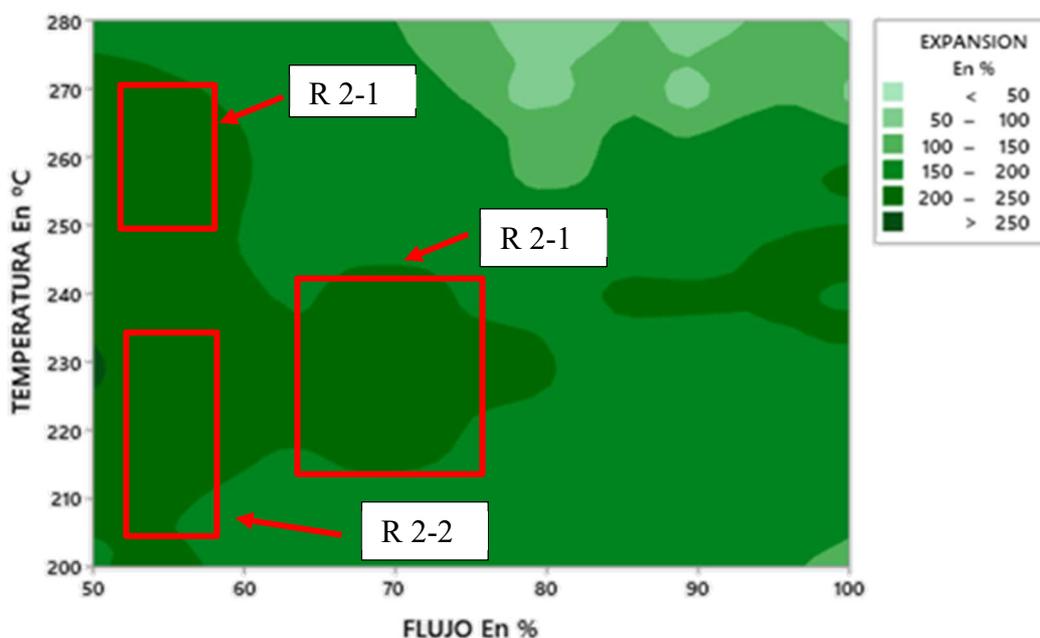


Figura 4-20: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a Exp (%) Fase 1,2 y 3.

Para la expansión, al igual que para el espesor, los factores con más relevancia son la temperatura y el flujo [ver Figura 4-21]. A pesar de ello, es de justicia marcar el hecho de que con la altura de capa de

0,1 mm no se alcanzan los niveles de expansión obtenidos con las otras alturas de estudio [ver Figura Anexo VI- 24].

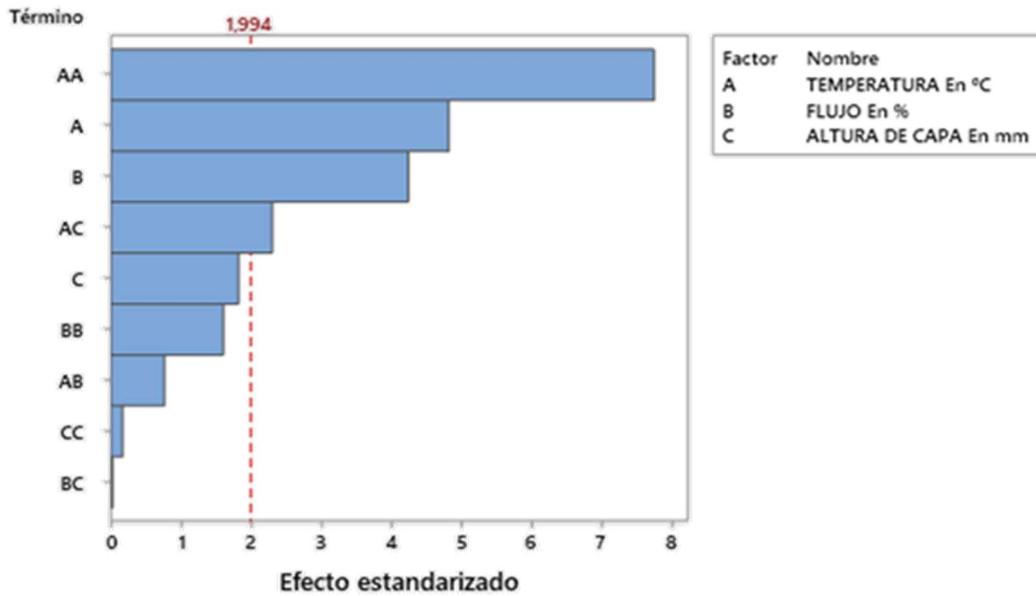


Figura 4-21: Diagrama de Pareto de las Fases 1 ,2 y 3.

4.3 Ensayo de dureza

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,025
Φ	0,231
h	0,325
ΔV (%)	0,143
Exp (%)	0,986
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,108
Φ *Φ	0,205
h *h	0,108
ΔV (%) *ΔV (%)	0,162
Exp (%) *Exp (%)	0,539
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,116
T*h	0,060
T*ΔV (%)	0,048
T*Exp (%)	0,734
Φ *h	0,231
Φ *ΔV (%)	0,153
Φ *Exp (%)	0,144
h *ΔV (%)	0,138
h *Exp (%)	0,073
ΔV (%) *Exp (%)	0,076

Tabla 4-4: ANOVA con los datos de la dureza.

En este caso con el estudio de los p-valores se puede observar que la temperatura junto con la interacción de esta con la variación del espesor son los parámetros más significativos para la dureza (recordar que para la variación de espesor las variables significativas son principalmente el flujo y la temperatura).

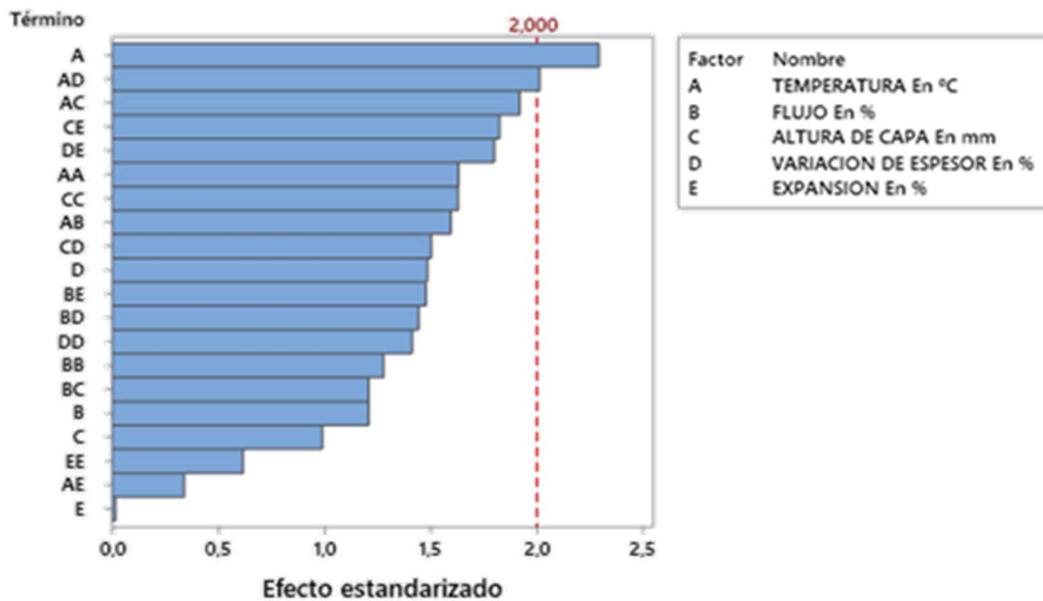


Figura 4-22: Diagrama de Pareto de la Tabla 4-4.

Con el diagrama de Pareto se refleja lo dicho anteriormente con los p-valores. La temperatura y la relación de esta con la variación de espesor son las variables significativas para la dureza.

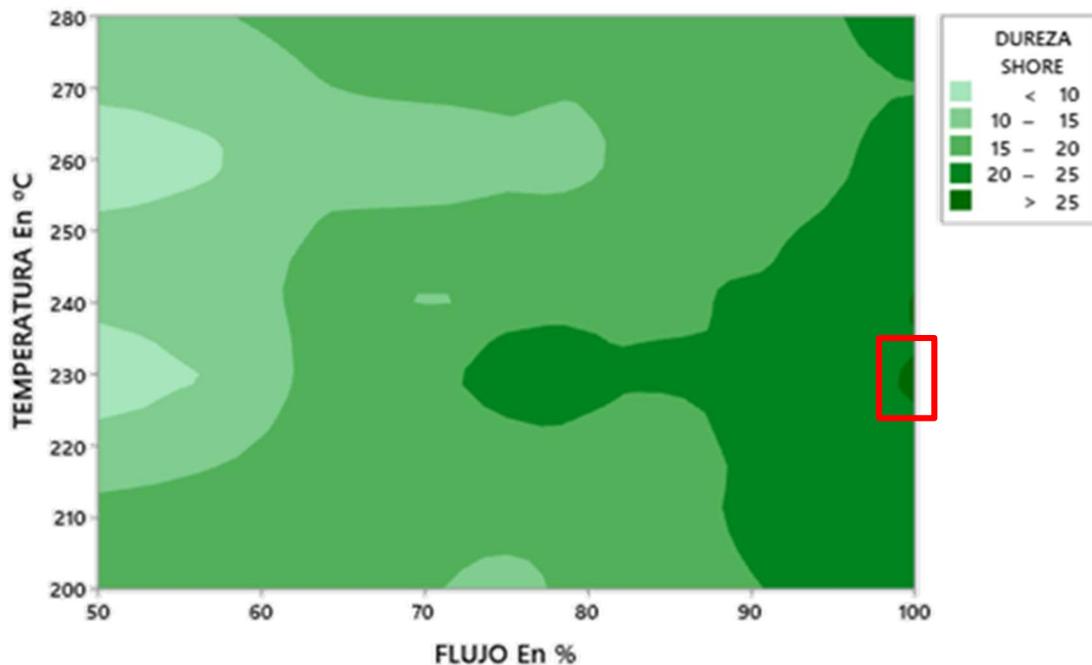


Figura 4-23: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a Dureza.

En la Figura 4-23 se puede apreciar la clara tendencia de mayores durezas con flujos mayores, pero también es de interés la franja de los 250°C a 235°C en la que, si bien es cierto no son valores máximos, se presentan durezas equivalentes a plásticos medios duros según la Figura Anexo I- 2

4.4 Ensayo de tracción

Ya habiendo sido explicado cómo se ha realizado el experimento de tracción y con los datos obtenidos se procede a la explicación de los resultados.

Para la Región 2-1 [ver Figura 4-24] se confirmó que ninguno de los parámetros variables es significativo tanto en la ANOVA [ver Tabla Anexo V- 12] de cada una de las Regiones como con los diagramas de Pareto [ver Figura Anexo VII- 10].

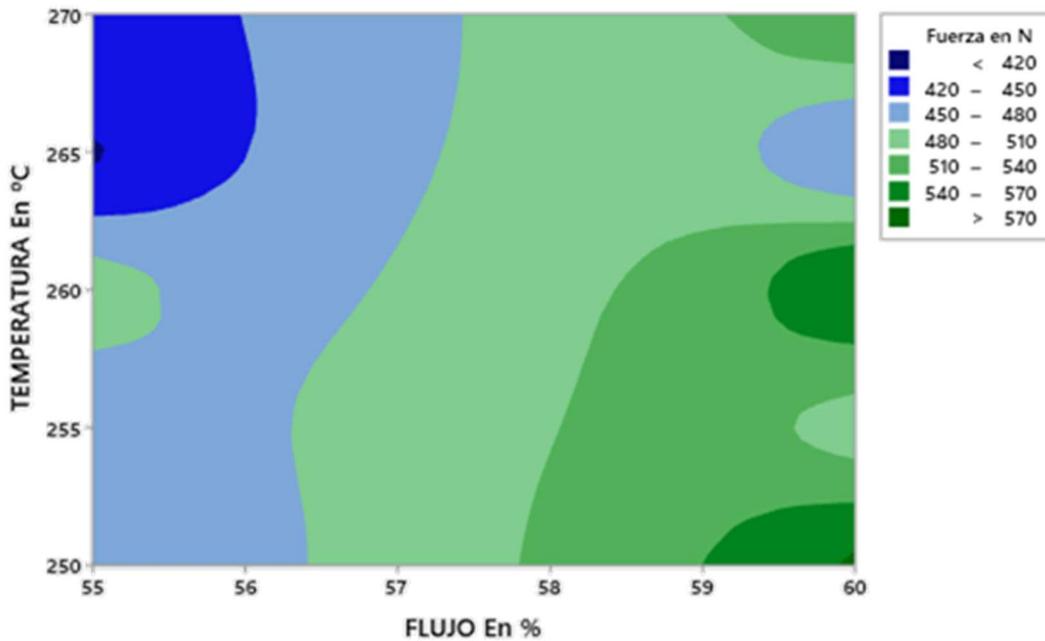


Figura 4-24: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a F (N) de la Región 2-1.

Para la Región 2-2 [Figura 4-25] sucede lo mismo que en la Región anterior como queda reflejado en la ANOVA [ver Tabla Anexo V- 13] y el diagrama de Pareto [ver Figura Anexo VII- 11].

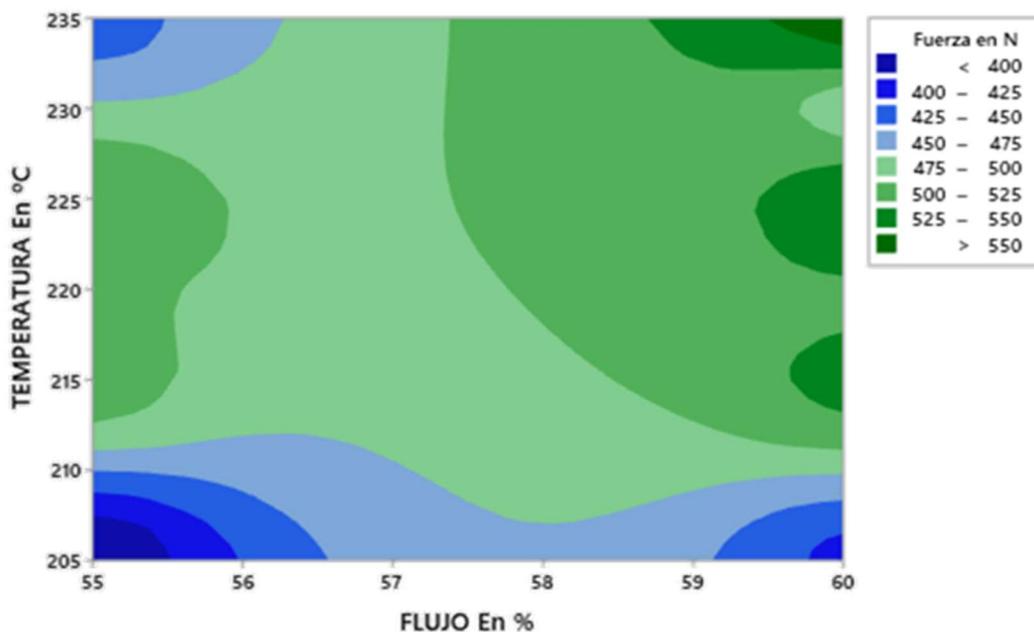


Figura 4-25: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a F (N) de la Región 2-2.

Terminando con la Región 2-3 [ver Figura 4-26], al igual que con las regiones anteriores ningún valor es relevante quedando respaldado con la Tabla Anexo V- 14 y la Figura Anexo VII- 12. Los resultados de las Regiones analizadas individualmente no arrojan ninguna propiedad común a simple vista. Esto motiva un análisis de todos los datos de manera conjunta [ver Figura 4-27].

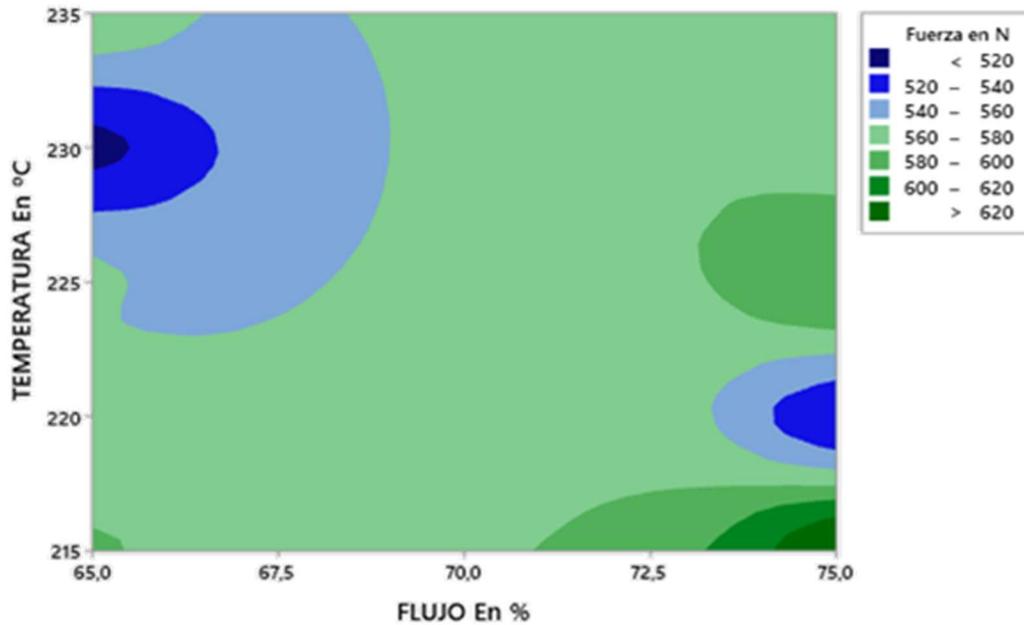


Figura 4-26: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a F (N) de la Región 2-3.

Tal y como se puede apreciar en la visión global del examen de tracción, existe un punto de mayor resistencia a tracción. Con un flujo de 75% y una temperatura de 215°C se obtiene una resistencia de 633N.

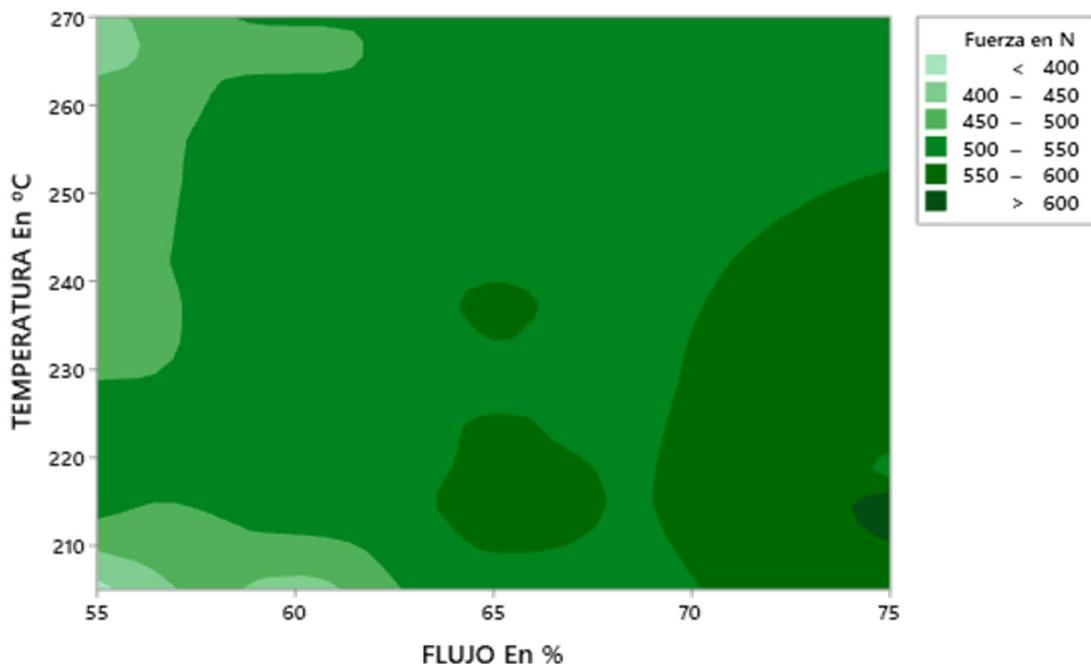


Figura 4-27: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a F (N) de la Fase 4.

En el análisis de los datos al completo de la Fase 4 sí que se muestra una significancia de las variables, siendo relevante el flujo en su primer orden y la temperatura en el segundo orden. Tal y como queda expuesto con la Figura Anexo VII- 13 y la Tabla Anexo V- 15.

4.5 Globales

Una vez citadas las conclusiones particulares a cada uno de los parámetros se ha decidido cruzar todos los datos y sacar las conclusiones del LW-PLA. Como se puede apreciar en la Figura 4-28:

- I. No existe superposición entre la dureza y ningún otro parámetro.
- II. Pueden encontrarse tres áreas Z1, Z2 y Z3 en las que se puede alcanzar una alta fiabilidad en el espesor y expansiones elevadas.
- III. En las áreas Z5 y Z6 se puede conseguir una gran expansión con altas resistencias a tracción.
- IV. Existe un área Z4 en la que se puede conseguir una alta resistencia a tracción y una alta fiabilidad en el espesor.

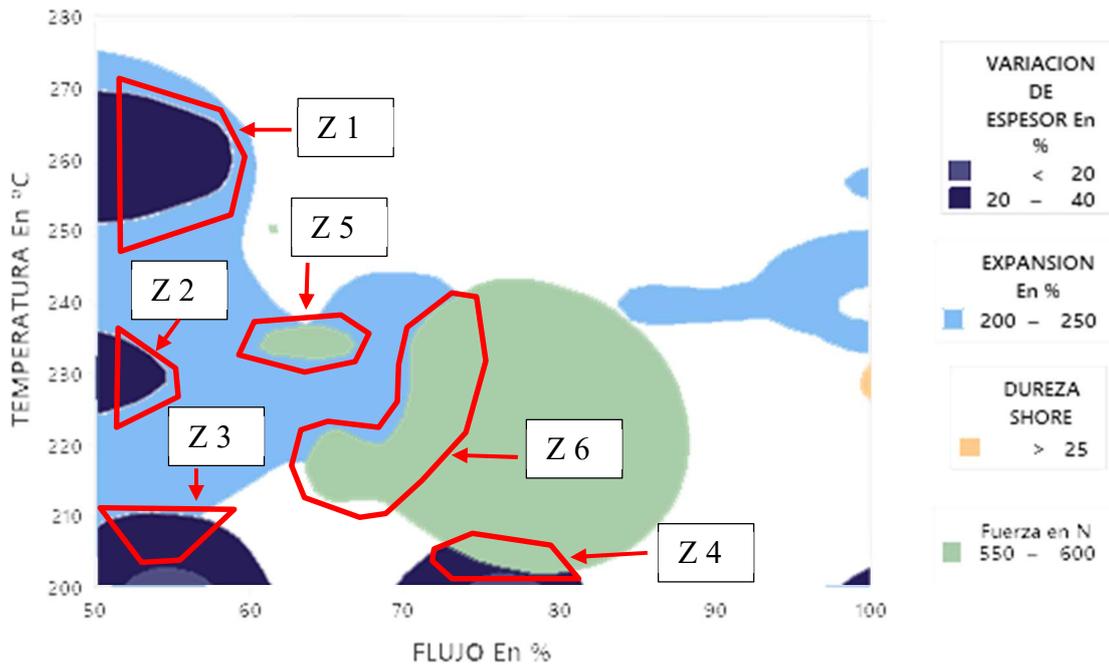


Figura 4-28: Superposición de resultados.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Las conclusiones de este trabajo se dejarán en un primer apartado las conclusiones y posteriormente las líneas futuras a desarrollar que abre este trabajo.

5.1 Conclusiones

Dada la estructura y temática de la que versa el escrito se ve relevante hacer un desglose de las conclusiones que no se verían justificadas en otro tipo de trabajo, ya que al tratarse de una caracterización de un material del que no se dispone mucha bibliografía formal, lo más conveniente es reflejar las diferentes conclusiones a las que se han llegado, tanto para cada uno de los parámetros, como con la relación existente entre ellos.

Una vez completado el trabajo se puede concluir que se ha determinado la influencia de los parámetros variables seleccionados sobre las características a considerar, cumpliendo así con los objetivos propuestos, de la manera que a continuación se detalla.

5.1.1 Conclusiones para la variación de espesor

Tras lo expuesto en el apartado 4.1 y disponiendo de todos los datos se puede afirmar:

1. Esta propiedad solo es representativa para calidades superficiales, ya que en el rango de medidas de la probeta de tracción estas variaciones dejan de seguir el modelo expuesto en este estudio.
2. Los resultados sirven para generar un manual de correcciones de impresión, ya que se pueden hacer correcciones previas a la impresión. Permitiendo obtener la fidelidad en piezas pequeñas.

La corrección sería la que se muestra en la Ecuación 5-1:

$$ESPEJOR FINAL = ESPEJOR DE DISEÑO * (\Delta V + 1)$$

Ecuación 5-1: Predicción del espesor final.

Siendo para cada configuración ΔV el valor obtenido en la Tabla 3-1, Tabla 3-3, Tabla 3-5, Tabla 3-6, Tabla 3-7 y Tabla 3-8.

3. La mayor variación de espesor se produce en:

T (°C)	Φ (%)	h (mm)	ΔV (%)
248,5	100	0,2	103

Tabla 5-1: Máximo de variación de espesor.

4. Las mayores variaciones se dan con el alto de capa de 0,2 mm, tal y como se refleja en la Figura 4-15, por lo que con altos de capa más reducidos existirá una fidelidad dimensional mayor.

5. La mejor fidelidad en la impresión se da con $\Delta V = 0$ que se obtiene con la configuración de la Tabla 5-2.

T (°C)	Φ (%)	h (mm)
273,5	52,5	0,2

Tabla 5-2: Parámetros para $\Delta V = 0$.

6. Con el resultado recién presentado, se demuestra que la mejor manera para aumentar la fidelidad de impresión es aumentar la temperatura.

5.1.2 Conclusiones para la expansión

Tras lo expuesto en el apartado 4.2 y disponiendo de todos los datos se puede afirmar:

1. El LW-PLA se puede llegar a expandir para piezas finales lo que el fabricante asegura en su publicidad. [1]
2. El máximo de expansión se encuentra con la configuración que se presenta en la Tabla 5-3.

T (°C)	Φ (%)	h (mm)	Exp (%)
233	50	0,2	267,8

Tabla 5-3: Máximo de expansión.

5.1.3 Conclusiones para la dureza

Para el parámetro de la dureza, como era de esperar son los flujos más altos los que generan durezas mayores, tal y como se puede ver en la Figura 4-23.

T (°C)	Φ (%)	h (mm)	Dureza Shore
233	100	0,1	27

Tabla 5-4: Máximo de dureza.

5.1.4 Conclusiones para la resistencia a tracción

Tras los datos aportados en el apartado 4.4 se puede apreciar que a mayor flujo la tendencia es de mayores resistencias, teniendo en cuenta que el rango de valores de temperatura que encierra las mayores resistencias es la franja baja de 210°C a 215°C.

Remarcar que el máximo para la resistencia a tracción se encuentra en la configuración de la Tabla 5-6.

T (°C)	Φ (%)	h(mm)	F (N)
233	72	0,15	590

Tabla 5-5: Máximo de resistencia a tracción.

5.1.5 Conclusiones para la situación global

A la vista de la Figura 4-28 las zonas de mayor dureza se ven muy alejadas de las de mayor expansión. Además, destacar que las regiones de estudio de la Fase 4 son aquellas en las que existe menor variación en el espesor y que aportan una mayor expansión. Por lo que se puede asegurar que la Z1 es la mejor decisión.

T (°C)	Φ (%)	h mm	Exp (%)	ΔV (%)
200	55	0,1	216	1,75

Tabla 5-6: Impresión óptima para diseños sin esfuerzos tensionales.

En el caso de que no se tenga en cuenta la resistencia del objeto final ya que, en esta zona se alcanzan expansiones superiores al 200% y variaciones menores al 20% tal y como se reflejó en detalle en la Figura 4-13. Con el apoyo de la Figura 4-28 . La mejor configuración, teniendo en cuenta únicamente

los parámetros de expansión y variación de espesor es la marcada en la Tabla 5-6. En cambio si lo que se busca es una configuración óptima para la resistencia esta es la mostrada en la Tabla 5-7.

T (°C)	Φ (%)	h(mm)	F (N)
232,5	72	0,15	589,161

Tabla 5-7: Impresión óptima para diseños resistentes.

5.2 Líneas futuras

Teniendo en cuenta que el método de trabajo ha sido con la finalidad de encontrar la intersección de zonas de mayor expansión y mayor resistencia a tracción se considera de interés la realización de futuros análisis:

- Estudio general de la resistencia, ya que en este estudio la resistencia se ha visto acotada por las regiones de mayor expansión.
- Completar el estudio realizado en este documento con un estudio de tensión-deformación, con el fin de obtener los módulos de Young correspondientes a cada configuración.
- Estudio de flexión, ya que debido a sus altas prestaciones en el ahorro de peso es especialmente interesante en la aplicación de drones y la carga más significativa a la que están sometidos estos es la de flexión.
- Estudio de compresión, ya que su bajo peso lo hace competidor de cualquier otro polímero en el ámbito de la mecánica.
- De igual manera se ven justificados los estudios de pandeo y fatiga.
- Un estudio de la resistencia térmica y desgaste a la intemperie, ya que este material en el caso de no disponer de grandes resistencias mecánicas, podría ser usado en cubiertas y de embellecedores de maquinaria.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Home - Learn ColorFabb». <https://learn.colorfabb.com/> (accedido 27 de enero de 2022).
- [2] «LW-PLA», *Learn ColorFabb*, 12 de abril de 2019. <https://learn.colorfabb.com/lw-pla/> (accedido 28 de enero de 2022).
- [3] «La fotoescultura de Françoise Willeme | IDIS». <https://proyectoidis.org/la-fotoscultura-de-francoise-willeme/> (accedido 24 de diciembre de 2021).
- [4] «Breve historia de la tecnología disruptiva del siglo XXI: La Impresión 3D», *TRESDE*, 8 de abril de 2019. <https://tresde.pe/historia-de-la-impresion-3d/> (accedido 24 de diciembre de 2021).
- [5] «Anthony Atala, el científico peruano que busca un lugar en la historia de la medicina con una impresora», *BBC News Mundo*, 17 de marzo de 2016. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/03/160315_atala_impresora_organos_am (accedido 24 de diciembre de 2021).
- [6] «Home page». <https://www.reprap.me/> (accedido 28 de enero de 2022).
- [7] «Una impresora 3D replicante - Impresoras 3D», *Imprimalia 3D*. <http://imprimalia3d.com/noticias/2013/09/28/0057/una-impresora-3d-replicante> (accedido 25 de enero de 2022).
- [8] «3D Printing Service», *Shapeways*. <https://www.shapeways.com/> (accedido 28 de enero de 2022).
- [9] «Llega el primer dron comercial impreso en 3D». <https://www.todrone.com/primer-dron-comercial-impreso-3d/> (accedido 28 de enero de 2022).
- [10] «Impresora 3d gran formato: El futuro es ahora – Concreto». <https://concreto.com/noticia-1/> (accedido 28 de enero de 2022).
- [11] «Crean un método de impresión 3D que utiliza a pantalla dun smartphone para producir medicamentos», *Universidad de Santiago de Compostela*.

<https://www.usc.gal/gl/xornal/novas/crean-metodo-impresion-3d-utiliza-pantalla-smartphone-producir-medicamentos> (accedido 28 de enero de 2022).

- [12] «COMPRAR IMPRESORAS 3D - ComprarImpresoras-3D.com! ?», *ComprarImpresoras-3D.com!* <https://comprarimpresoras-3d.com/> (accedido 25 de diciembre de 2021).
- [13] «Estereolitografía | Tecnologías y materiales de impresión 3D». <https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/estereolitografia> (accedido 25 de diciembre de 2021).
- [14] «Home», *3Dnatives*. <https://www.3dnatives.com/es/> (accedido 26 de diciembre de 2021).
- [15] «【 Impresoras DLP 】 ¿Qué es la TECNOLOGIA DLP, cómo funciona?», *Innovación y Tecnología*, 2 de octubre de 2020. <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/impresoras-3d-tecnologia-dlp/> (accedido 25 de diciembre de 2021).
- [16] «Laser SLA vs DLP vs Masked SLA 3D Printing Technology», *The Ortho Cosmos*, 23 de marzo de 2017. <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/> (accedido 26 de diciembre de 2021).
- [17] «▷ Impresoras3D.com - La mejor tienda de impresoras 3D en España», *impresoras3d.com*. <https://www.impresoras3d.com/> (accedido 10 de enero de 2022).
- [18] «▷ Impresora 3D en polvo: ¿Cómo funciona la impresión 3D en polvo? - [enero 2022]». <https://tu3dprintlab.club/impresora-3d-en-polvo-como-funciona-la-impresion-3d-en-polvo> (accedido 13 de enero de 2022).
- [19] «Tecnología de impresión 3D FDM vs impresión 3D SLA. [2021 diciembre]». <https://elmundo3d.com/fdm-vs-sla/> (accedido 29 de diciembre de 2021).
- [20] «Defectos de impresión 3D en FDM y cómo solucionarlos», *Abax Innovation Technologies*, 13 de enero de 2021. <https://abax3dtech.com/2021/01/13/defectos-de-impresion-3d-en-fdm-y-como-solucionarlos/> (accedido 29 de diciembre de 2021).
- [21] «Impresoras 3D FDM para Modelismo ▷▷ SmallCarsGarage», *SmallCarsGarage*. <https://www.smallcarsgarage.com/impresoras-3d-fdm/> (accedido 10 de enero de 2022).
- [22] «Ender 3 (Pro/V2) Layer Shift: How to Avoid It», *All3DP*, 26 de junio de 2021. <https://all3dp.com/2/ender-3-pro-layer-shift-how-to-avoid-it/> (accedido 10 de enero de 2022).
- [23] «Rellenos en impresión 3D. Definen estructura, resistencia y peso.», *3DWork*, 26 de enero de 2019. <https://3dwork.io/rellenos-en-impresion-3d/> (accedido 10 de enero de 2022).
- [24] «Impresoras 3D- Fabricación propia», *Abax Innovation Technologies*. <https://abax3dtech.com/> (accedido 29 de diciembre de 2021).
- [25] «Ultimaker Community of 3D Printing Experts», *Ultimaker Community of 3D Printing Experts*. <https://community.ultimaker.com> (accedido 10 de enero de 2022).

- [26] «¿Qué son los diseños de superficie de respuesta, los diseños centrales compuestos y los diseños de Box-Behnken?» <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/#what-is-a-box-behnken-design> (accedido 11 de enero de 2022).
- [27] «RPubs - Metodología de superficie de respuesta (RSM)». https://rpubs.com/Cristina_Gil/RSM (accedido 11 de enero de 2022).
- [28] «Box-Behnken design». <https://develve.net/Box-Behnken%20design.html> (accedido 11 de enero de 2022).
- [29] «Ultimaker Cura: software de impresión 3D potente y fácil de usar | Ultimaker», *ultimaker.com*. <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura> (accedido 28 de enero de 2022).
- [30] «2003312029_LEANSTAR-MD30-60-30kg_C507290.pdf». Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2003312029_LEANSTAR-MD30-60-30kg_C507290.pdf
- [31] «DUROMETRO SHORE A SAUTER HBA 100-0 - DCL metrología». <https://www.instrumentacion-metrologia.es/HBA-100-0-Durometro-Shore-A> (accedido 11 de enero de 2022).
- [32] «Introducción al Durómetro», *De Máquinas y Herramientas*. <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/durometro-tipos> (accedido 12 de enero de 2022).
- [33] J. N. Rouder, C. R. Engelhardt, S. McCabe, y R. D. Morey, «Model comparison in ANOVA», *Psychon. Bull. Rev.*, vol. 23, n.º 6, pp. 1779-1786, dic. 2016, doi: 10.3758/s13423-016-1026-5.
- [34] S. Greenland *et al.*, «Statistical tests, P values, confidence intervals, and power: a guide to misinterpretations», *Eur. J. Epidemiol.*, vol. 31, n.º 4, pp. 337-350, abr. 2016, doi: 10.1007/s10654-016-0149-3.
- [35] R. A. Fisher, «Statistical Methods for Research Workers», en *Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution*, S. Kotz y N. L. Johnson, Eds. New York, NY: Springer New York, 1992, pp. 66-70. doi: 10.1007/978-1-4612-4380-9_6.
- [36] J. Backhaus, «The Pareto Principle», *Anal. Krit.*, vol. 2, n.º 2, pp. 146-171, 1980, doi: 10.1515/aug-1980-0203.
- [37] «Productos». <https://www.gunt.de/es/productos/ensayo-de-materiales-20kn/020.30000/wp300/glct-1:pa-150:pr-1540> (accedido 3 de marzo de 2022).
- [38] «Thonny, Python IDE for beginners». <https://thonny.org/> (accedido 7 de marzo de 2022).

Anexo I: Método De Ensayo De Dureza Shore

Este tipo de medición es no destructivo y solo requiere de un durómetro. [21] Un durómetro es un aparato de medición de dureza, para así poder determinar la calidad. El modo de empleo se basa en un elemento penetrador, llamado indentador, el cual dejará una huella en la superficie del material de estudio. Estos elementos penetradores pueden ser una bola de acero o cónico, estos últimos se emplean en materiales de mayor dureza.



Figura Anexo I- 1:Durómetro Shore. [31]

Dado que se hará un ensayo de dureza según la escala Shore se empleará un durómetro del mismo nombre. Este tipo de medidor apareció alrededor del año 1920, fue inventado por Albert Shore, quien también definió su propia escala para medir la dureza. Este se destina para medir la dureza de los plásticos.

La escala de dureza de este tipo de durómetros se divide en: A y D. Siendo la escala A para los plásticos blandos, y D para los duros.



Figura Anexo I- 2: Representación de las escalas A y D Shore. [32]

Anexo II: Ultimaker Cura

Este es el software propio de la marca Ultimaker. Es gratuito y sostenido por la propia marca. Una de las ventajas más reseñables a la hora de usar este programa es su interfaz amigable que la aproxima casi a cualquier usuario. A continuación, se adjuntarán una serie de figuras para ilustrar las funcionalidades básicas y aquellas que han sido empleadas durante el estudio. Comenzando con la visión más general de la interfaz.

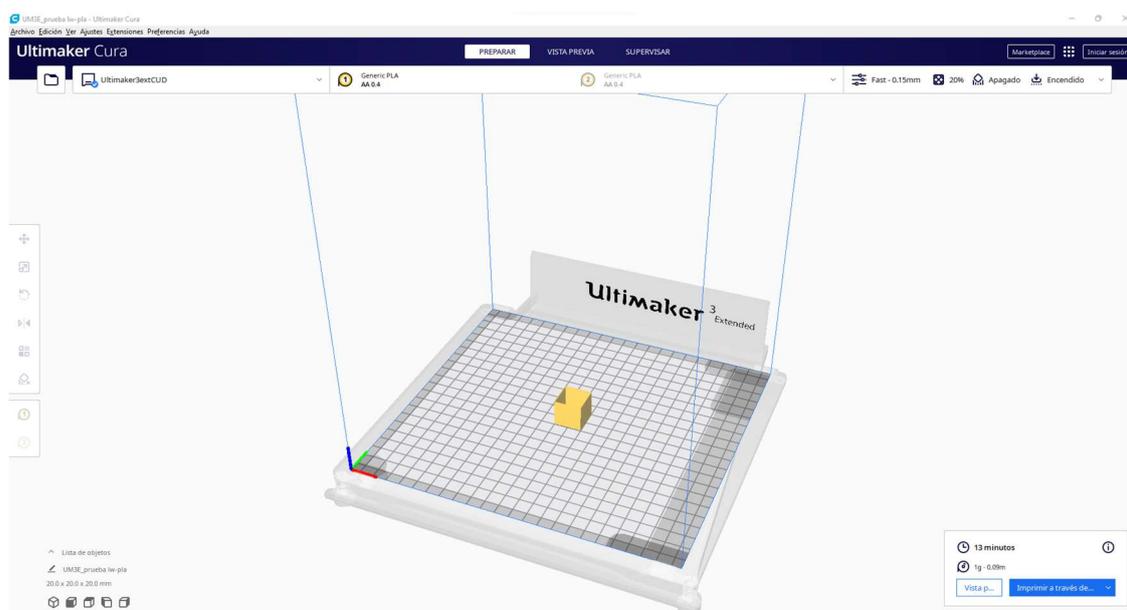


Figura Anexo II- 1: Visión general Ultimaker Cura.

En la parte superior se dispone de los menús de búsqueda de archivos [ver Figura Anexo II- 3] y el de configuración de las boquillas [ver Figura Anexo II- 2] así como el menú de opciones de impresión en sí mismo ya sea en su versión básica [ver Figura Anexo II- 4] o en la avanzada [ver Figura Anexo II- 5].

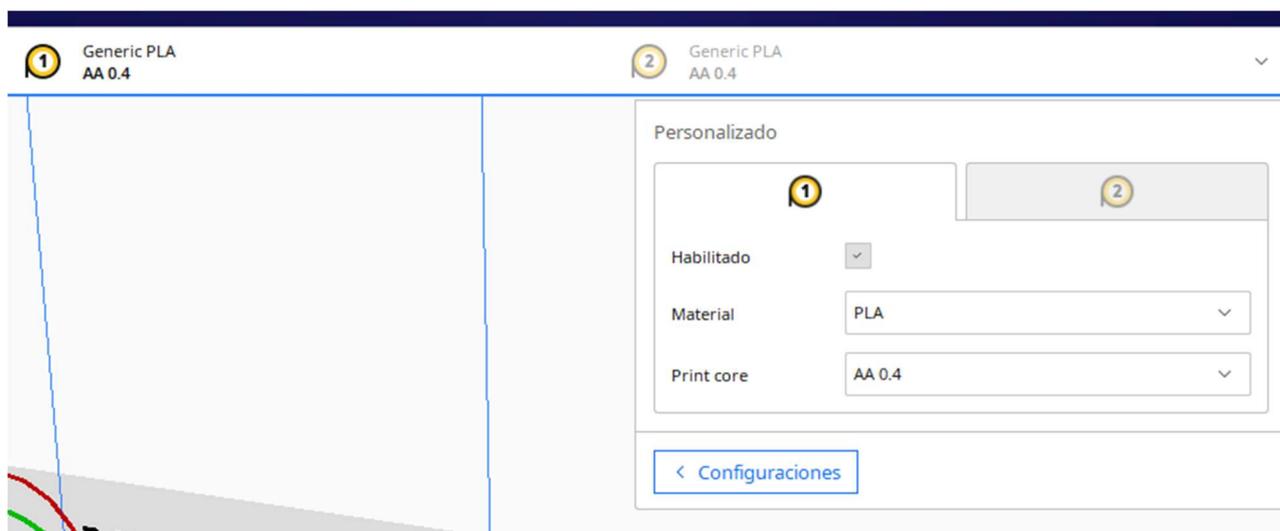


Figura Anexo II- 2: Configuración de las boquillas.

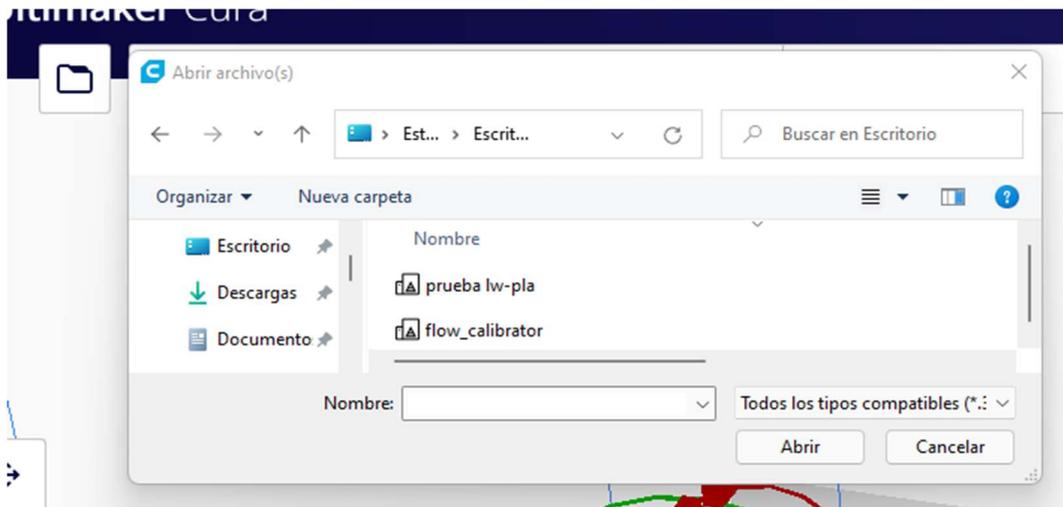


Figura Anexo II- 3: Menú de búsqueda de archivos.

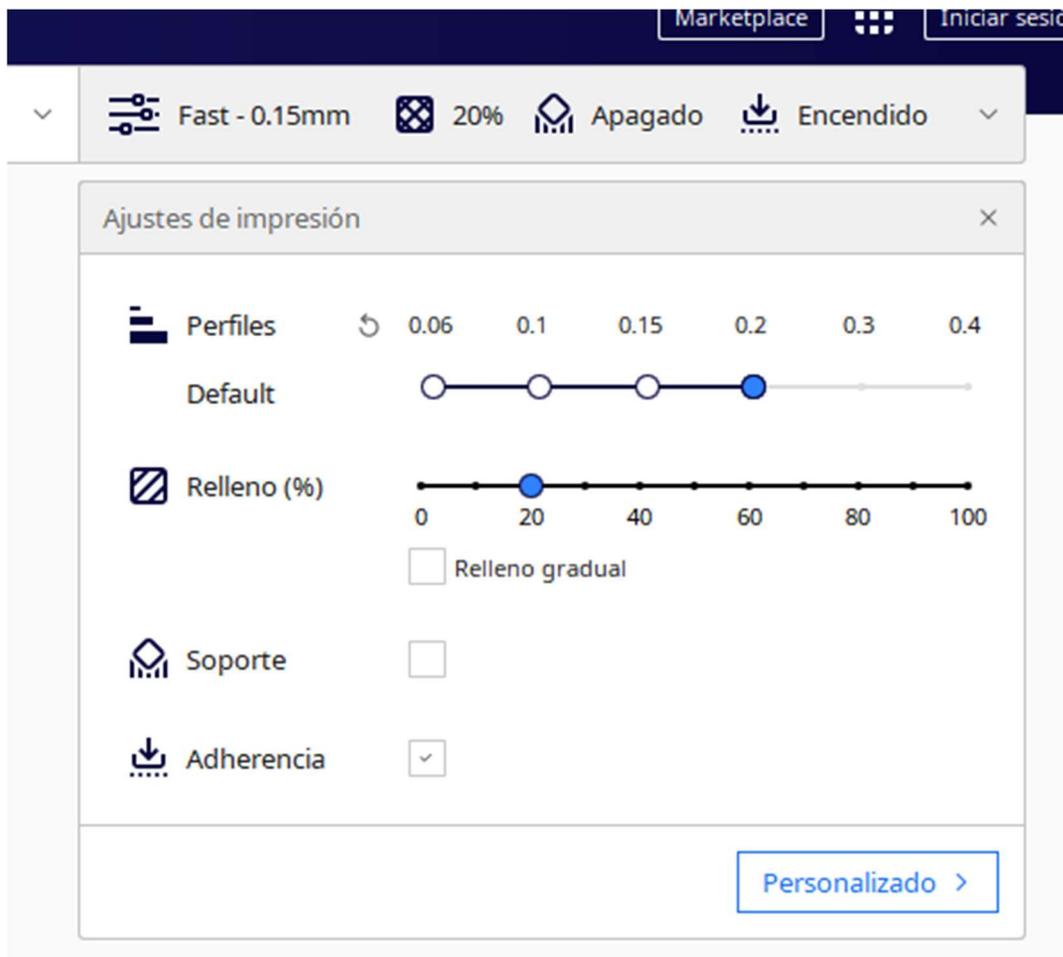


Figura Anexo II- 4: Menú de opciones de impresión básicas.

Destacar la amplia cantidad de parámetros que ofrece el software para modificar las impresiones dejando así un abanico de investigación inmenso. Sin embargo, marcar, que los parámetros que se han modificado en el estudio son aquellos cuyos desplegables han sido activados en la Figura Anexo II- 5.

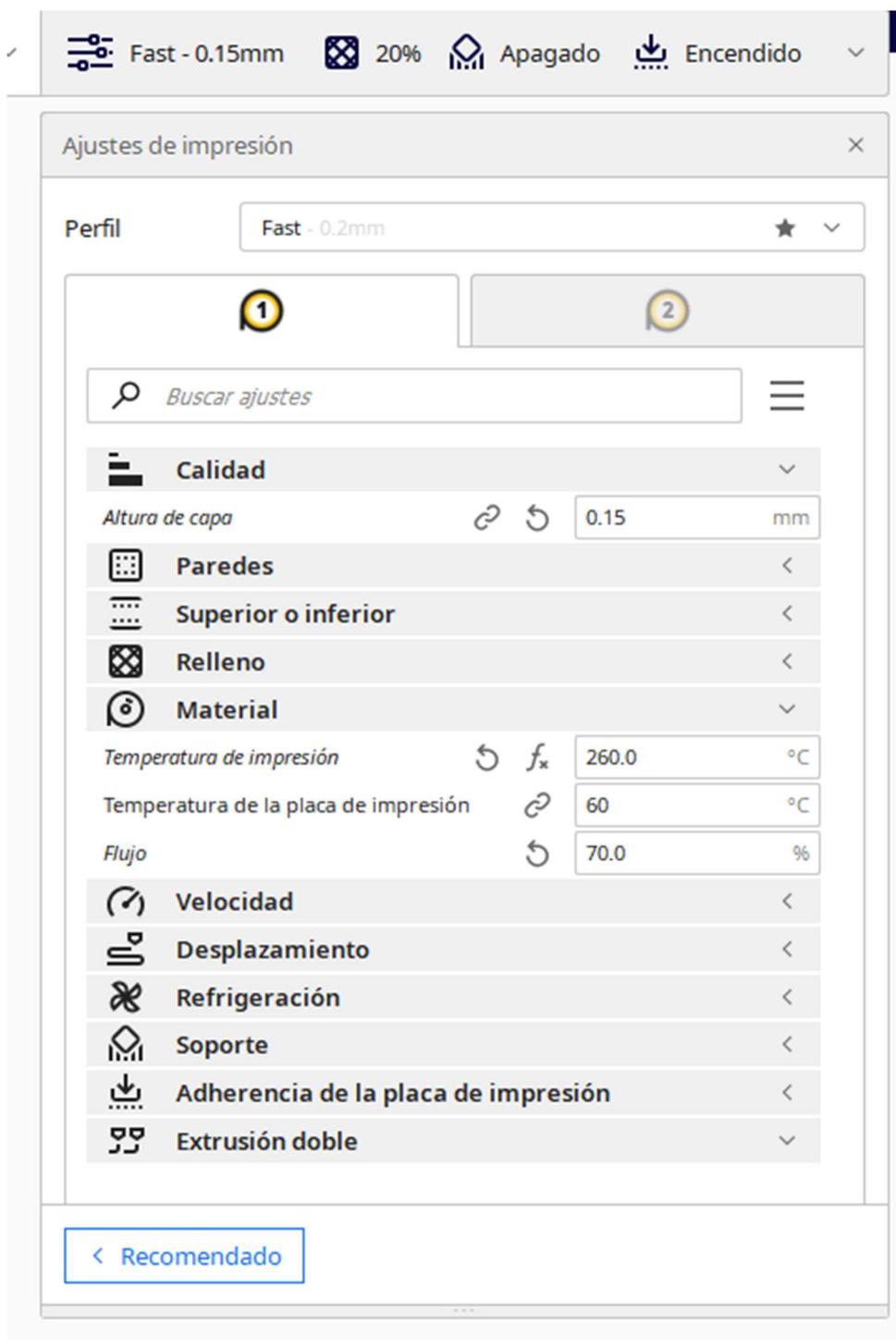


Figura Anexo II- 5: Menú de opciones avanzado.

El menú de búsqueda de impresoras [ver Figura Anexo II- 6] también se encuentra en la zona superior de la página principal.

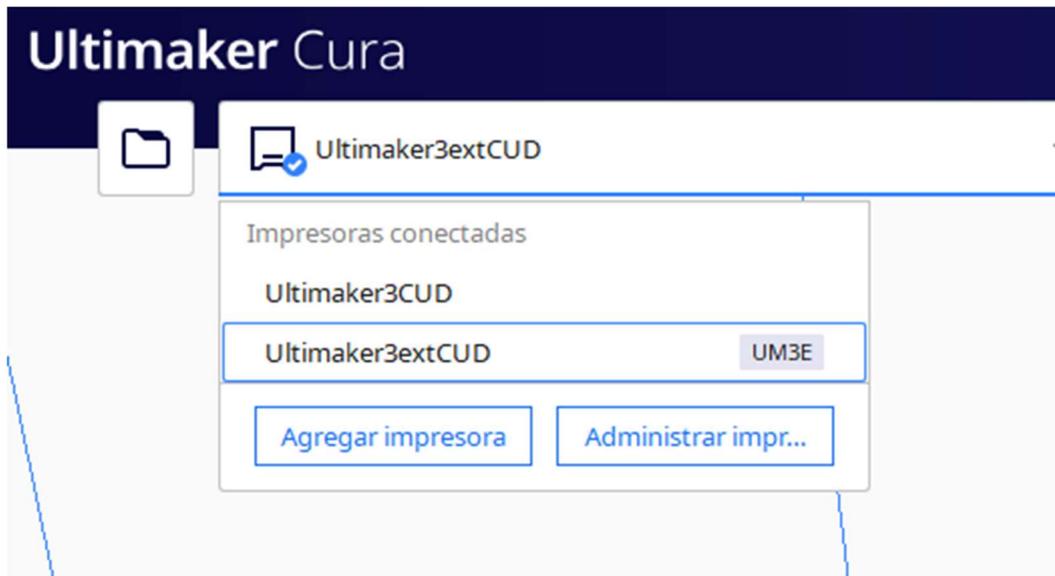


Figura Anexo II- 6: Menú de impresoras.

Una vez se tiene claro como buscar una pieza y esta se ha añadido a la impresora aparecerá de la siguiente manera.

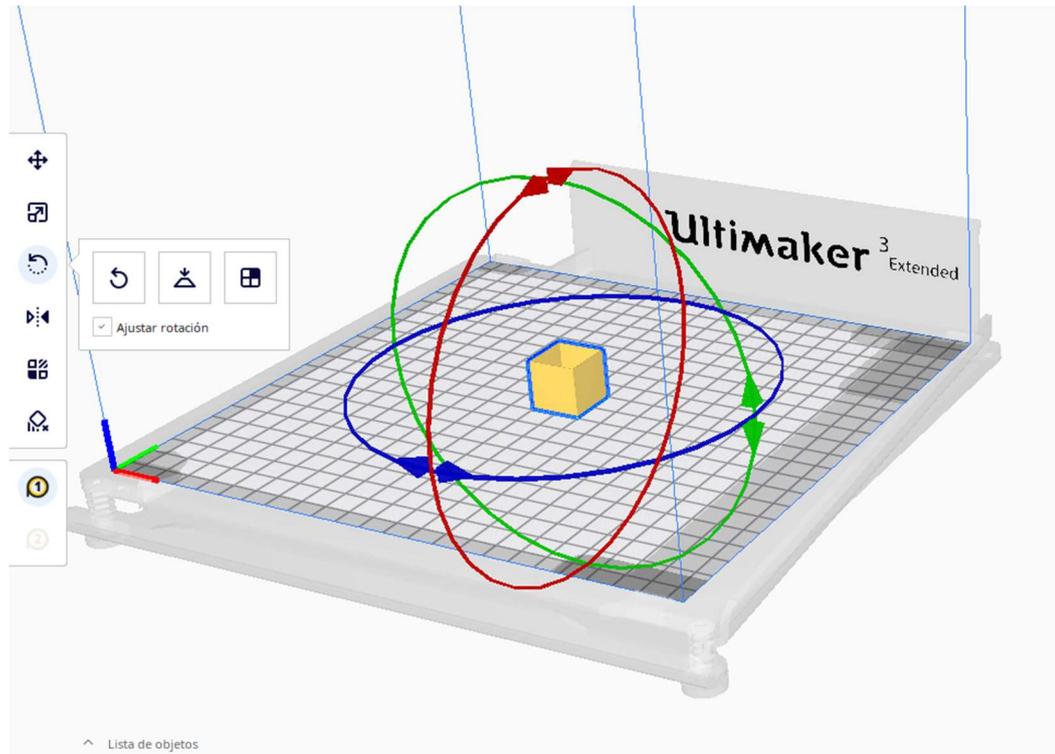


Figura Anexo II- 7: Disposición de una pieza genérica en el software.

Apareciendo al hacer doble clic sobre la pieza el menú lateral que se puede ver en la Figura Anexo II- 7. Además, si se quieren otras funcionalidades como pueden ser multiplicar la pieza o centrarla en la cama caliente, solo ha de pulsar clic izquierdo sobre la pieza y aparecerá un menú de opciones.

Ya teniendo la pieza y la disposición en la base, antes de imprimir hay que segmentar el objeto [ver Figura Anexo II- 8] y el programa dará resultado del tiempo de impresión y de la cantidad de material a usar [ver Figura Anexo II- 9].

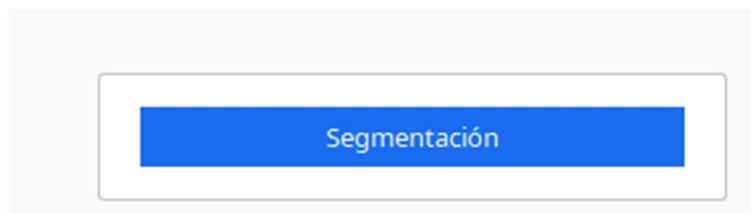


Figura Anexo II- 8: Botón de segmentar.

Una vez pulsado, este botón se convertirá en otro tal y como se muestra a continuación.

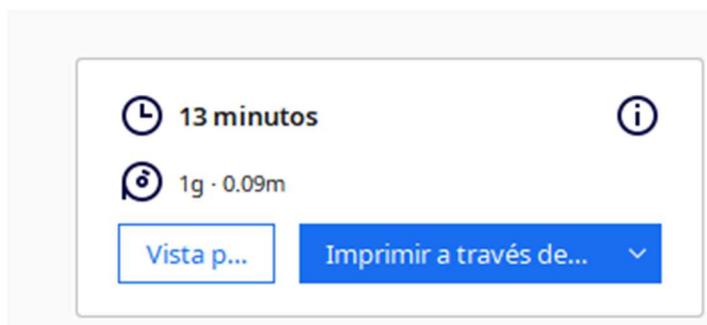


Figura Anexo II- 9: Vista del tiempo de impresión y cantidad de material necesario.

Tras pulsar el botón de impresión ya no se verán más cambios u opciones en la pantalla general habrá que cambiar a la zona de supervisar tal y como se muestra en la Figura Anexo II- 10.

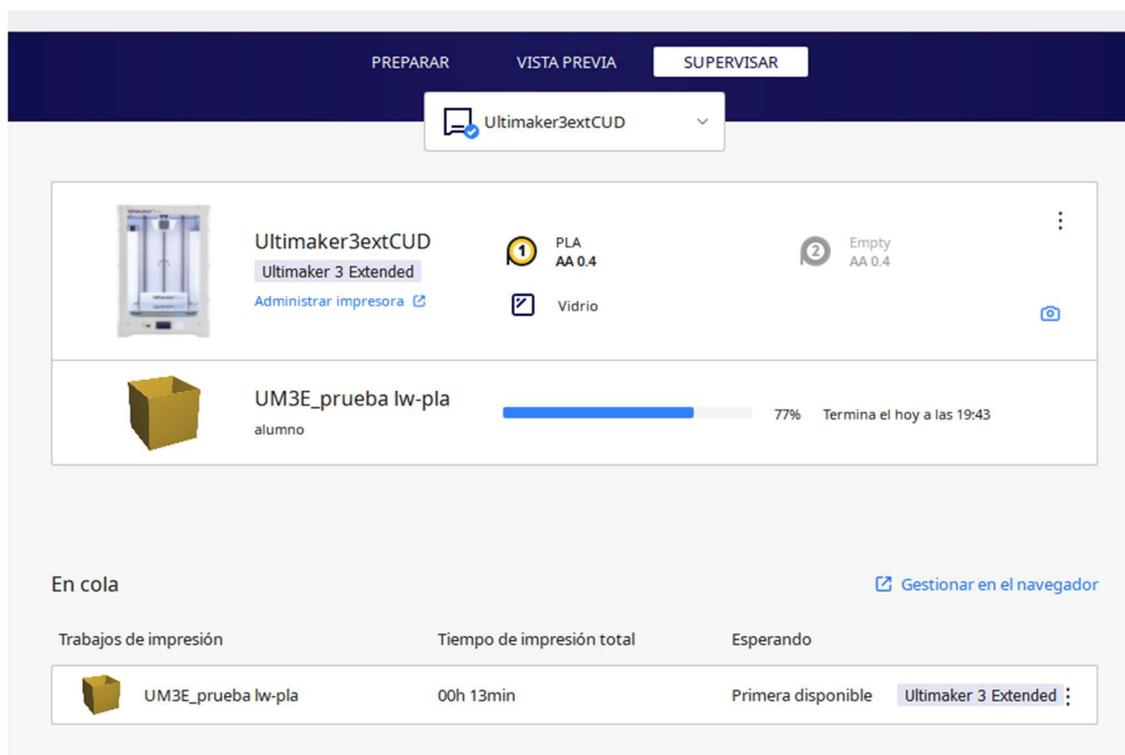


Figura Anexo II- 10: Panel de control de las impresiones en curso y futuras.

En esta pantalla se puede apreciar tanto el progreso de la impresión en curso, así como la lista de impresiones que ya se han ordenado.

En esta región, de supervisar, también se dispone de la función de una cámara remota [ver Figura Anexo II- 11] con la que comprobar el estado real de la figura que se está imprimiendo. Destacar que la calidad de la cámara es la suficiente como para detectar un error fatal en la impresión, con esto se evita la pérdida de mucho material en caso ya que se podría ver a simple golpe de vista. Pero de ningún modo permite una detección de errores de calidad de impresión.

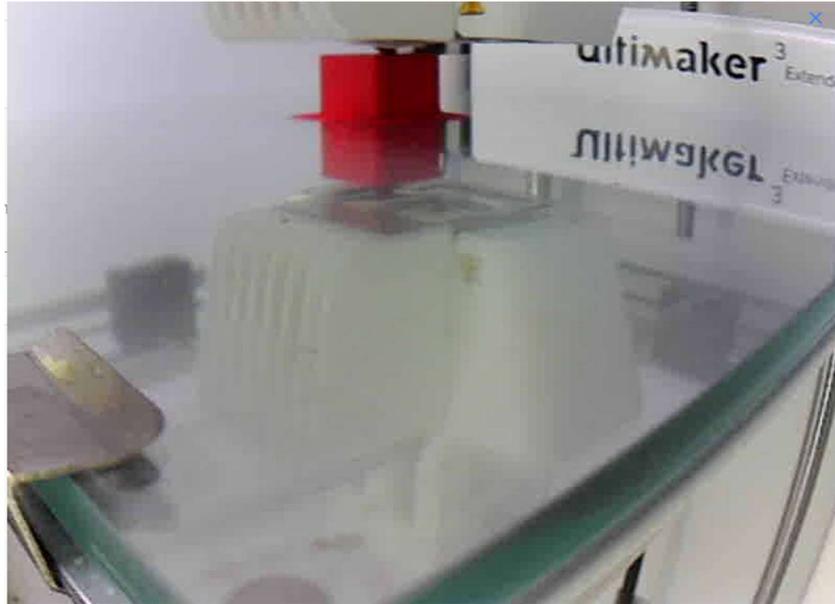


Figura Anexo II- 11: Cámara de supervisión de impresión.

Anexo III: Conceptos de Estadística

El software que se ha decidido emplear para la generación de las superficies de respuesta es Minitab. Es un programa diseñado para ejecutar operaciones en el campo de la estadística. Una gran ventaja de este programa es su interfaz compatible con Microsoft Excel con la capacidad de ejecución de análisis estadísticos. Minitab es frecuentemente usado con la implantación la metodología de mejora de procesos.

Los conceptos que se van a emplear a lo largo de la memoria son:

- **Análisis de la varianza.**

También conocido como tabla ANOVA [33]. Fue desarrollado por R.A. Fisher en la década de 1930. La ANOVA refleja si existen diferencias significativas entre los grupos del análisis, mediante el p-valor. Gracias a una ANOVA la variabilidad obtenida en un experimento puede descomponerse en factores. Que permitirán, a posteriori, determinar si los rendimientos medios de la respuesta se deben a cada uno de esos valores y en qué medida. Con lo que se consigue saber cuáles son los parámetros que realmente hacen que el resultado varíe en mayor medida.

- **P-valor**

En estadística y contrastes de hipótesis, el valor p [34] se define como la probabilidad de que un valor estadístico calculado sea posible dada una hipótesis nula cierta. En términos simples, el valor p ayuda a diferenciar resultados que son producto del azar del muestreo, de resultados que son estadísticamente significativos. Si el valor p cumple con la condición de ser menor que un nivel de significancia impuesto arbitrariamente, este se considera como un resultado estadísticamente significativo y, por lo tanto, permite rechazar la hipótesis nula.

El p-valor por lo tanto, refleja la probabilidad del error que se produce al aceptar como válida cierta hipótesis. El umbral de significación se ha fijado en el 5%, acorde con los estudios del estadístico y biólogo **Ronald Fisher** en “*Statistical Methods For Reaserch Workers*” [35] establece que si un suceso se produce 1 de cada 20, es decir el 5%, es un suceso inusual. Por lo que, sabiendo que este umbral se puede elegir de manera arbitraria, para este experimento se ha decido seguir el estándar fijado por Fisher en 1925.

En resumidas cuentas, el p-valor en el caso de estudio es un marcador que indica significancia de los parámetros del análisis y por lo tanto que variable es más importante en cada caso.

- **Diagrama De Pareto**

El diagrama de Pareto no es más que una representación gráfica del principio estadístico del mismo nombre también conocido como el “*Teorema Del 80-20*” [36]. En el cual, se enuncia que la sociedad esta divida en dos grupos, “*los muchos de poco y los pocos de mucho*” dividiéndose en grupos de 80 y 20 % tal y como cabe esperar por el nombre popular del teorema. Su teorema sugiere que en cualquier grupo hay una minoría que es vital y una mayoría que es trivial.

En el caso del estudio se ha decido para complementar la selección de los parámetros significativos no solo por el cribado de p-valor, sino que combinar el ANOVA con el Diagrama de Pareto, para ver el efecto estandarizado para el análisis de varianza. Durante de desarrollo de los diferentes experimentos del laboratorio, se ha visto que el diagrama de Pareto ha sido de especial utilidad ya que no solo muestra las variables significativas, de cada análisis y de manera muy visual, sino que también hace un escalado de la relevancia de las mismas. Siendo de especial importancia a la hora de tomar decisiones.

Anexo IV: Superficies De Respuesta

En este anexo se adjuntan las diferentes superficies de respuesta obtenidas en los diferentes ensayos del laboratorio.

- ❖ Fase 1
 - Espesor

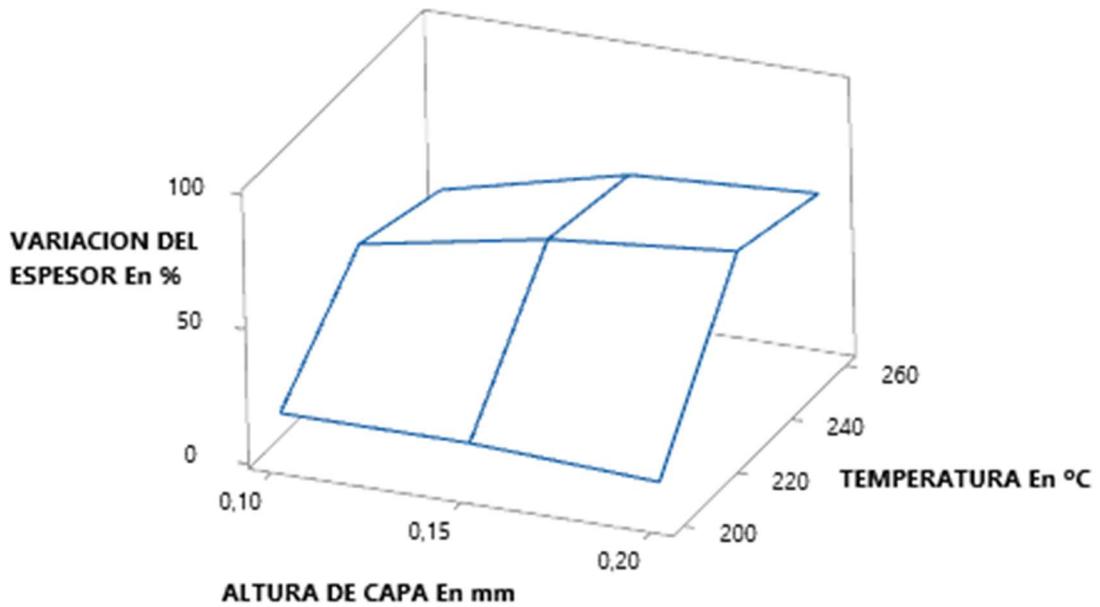


Figura Anexo IV 1: h (mm) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1.

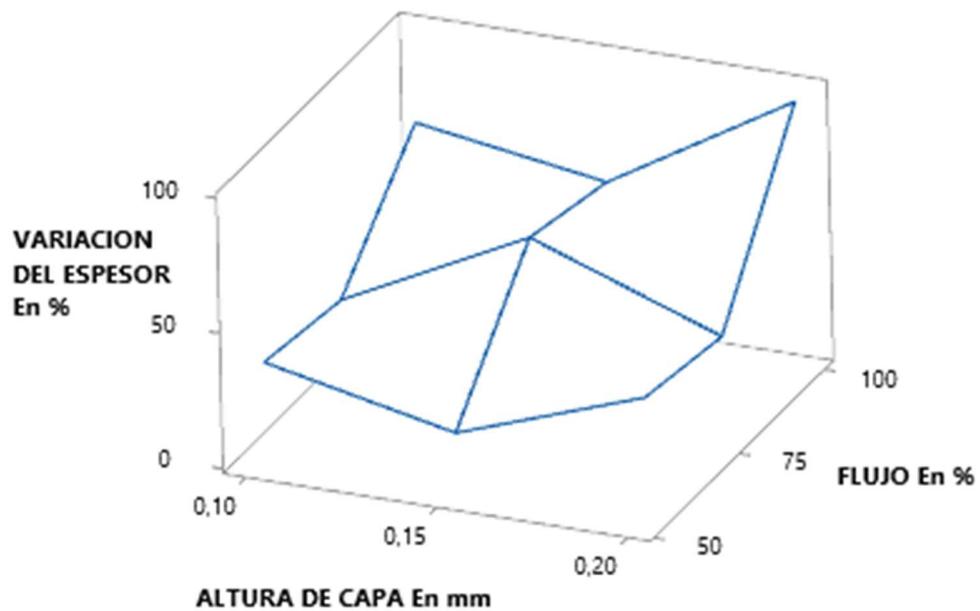


Figura Anexo IV 2: h (mm) vs Φ (%) frente a ΔV (%) Fase 1.

➤ Expansión

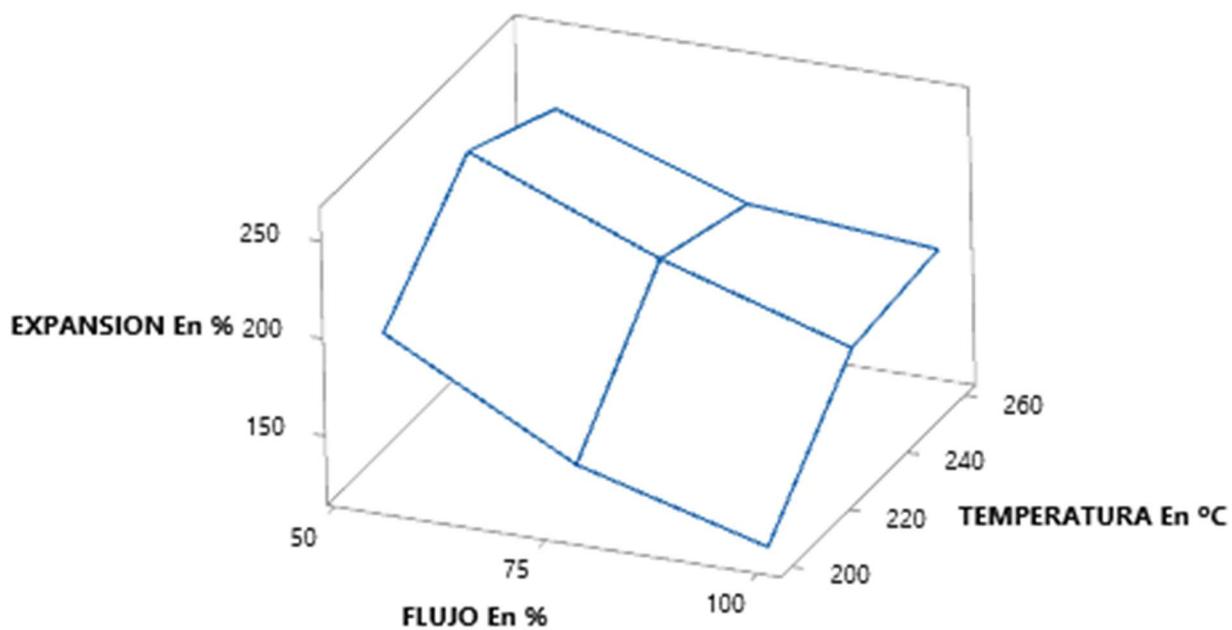


Figura Anexo IV 3: Φ (%) vs T (°C) frente a exp (%) Fase 1.

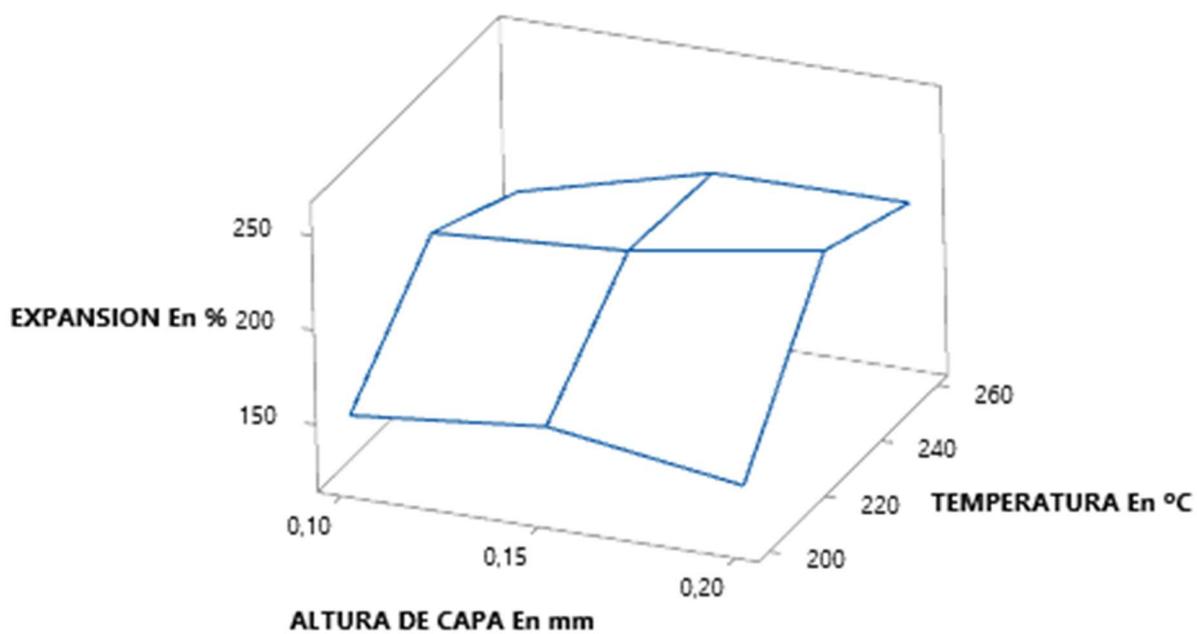


Figura Anexo IV 4: h (mm) vs T (°C) frente a exp (%) Fase 1.

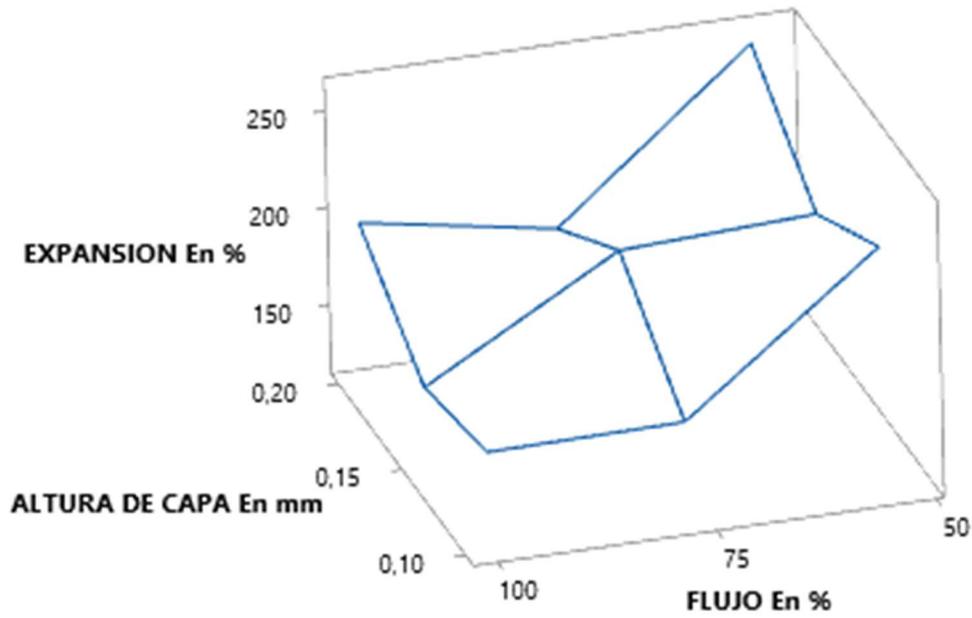


Figura Anexo IV 5: h (mm) vs Φ (%) frente a exp (%) Fase 1.

- ❖ Optimización de la fase 1
 - Espesor

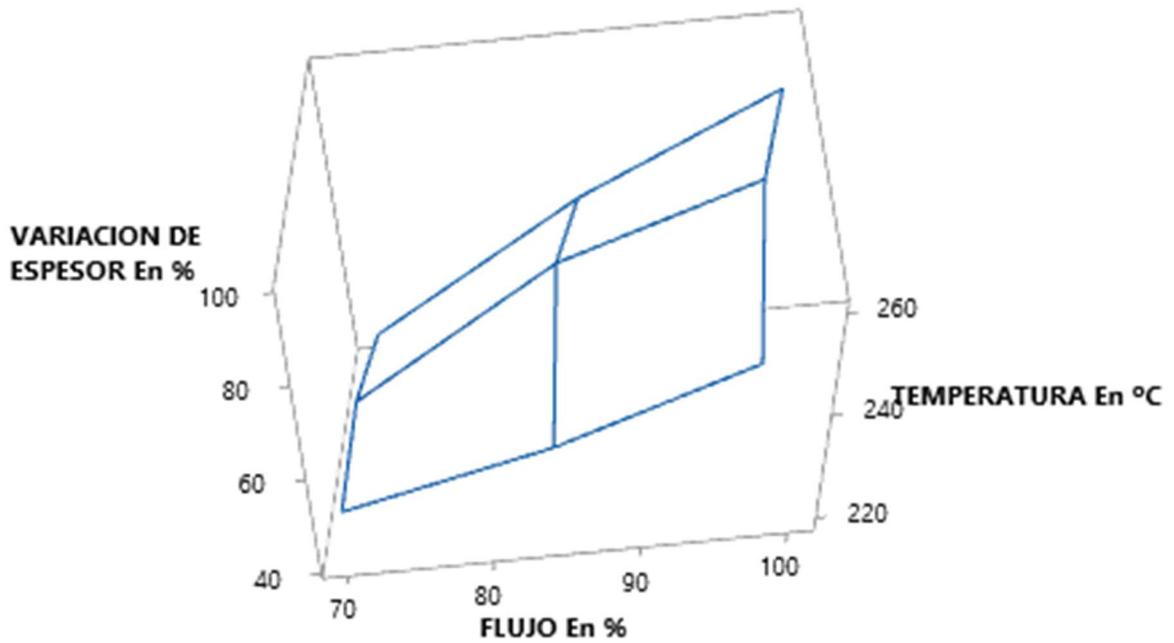


Figura Anexo IV 6: Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Optimización Fase 1.

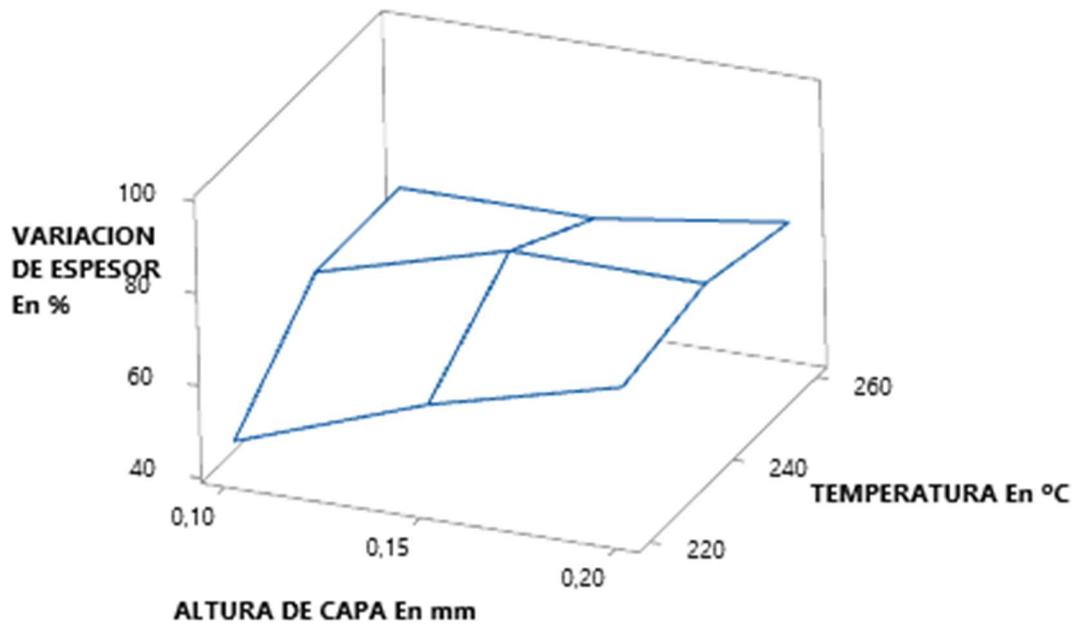


Figura Anexo IV 7: h (mm) vs T (°C) frente a ΔV (%) Optimización Fase 1.

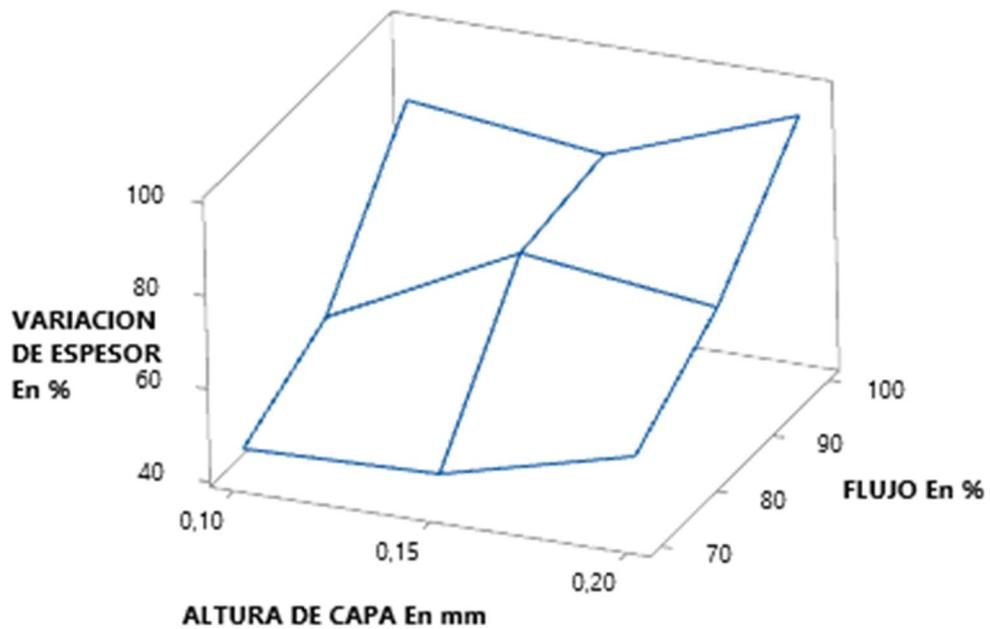


Figura Anexo IV 8: h (mm) vs Φ (%) frente a ΔV (%) Optimización Fase 1.

➤ Expansión

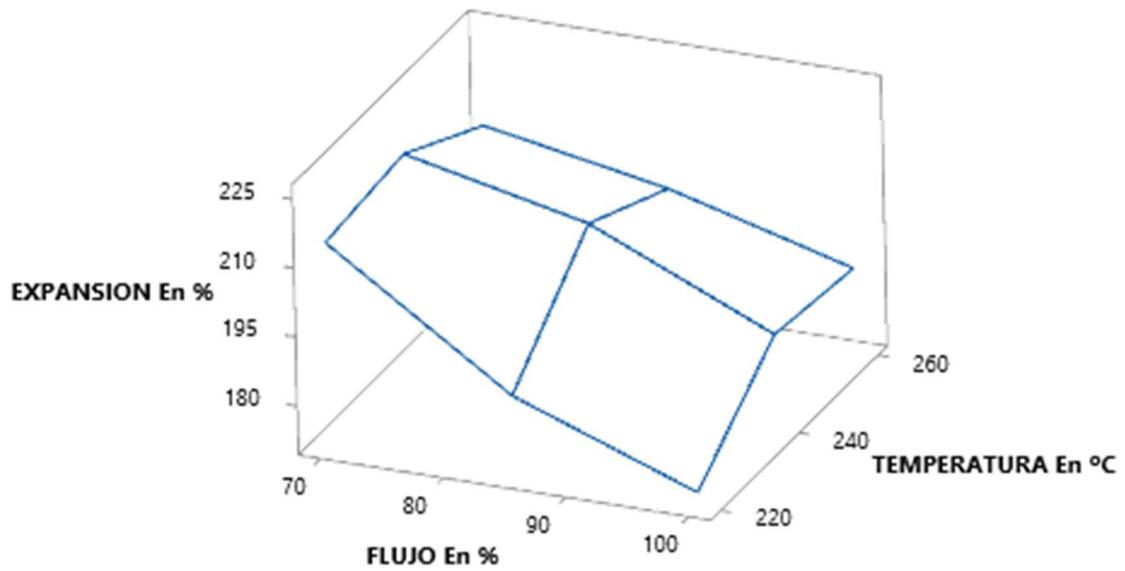


Figura Anexo IV 9: Φ (%) vs T (°C) frente a exp (%) Optimización Fase 1.

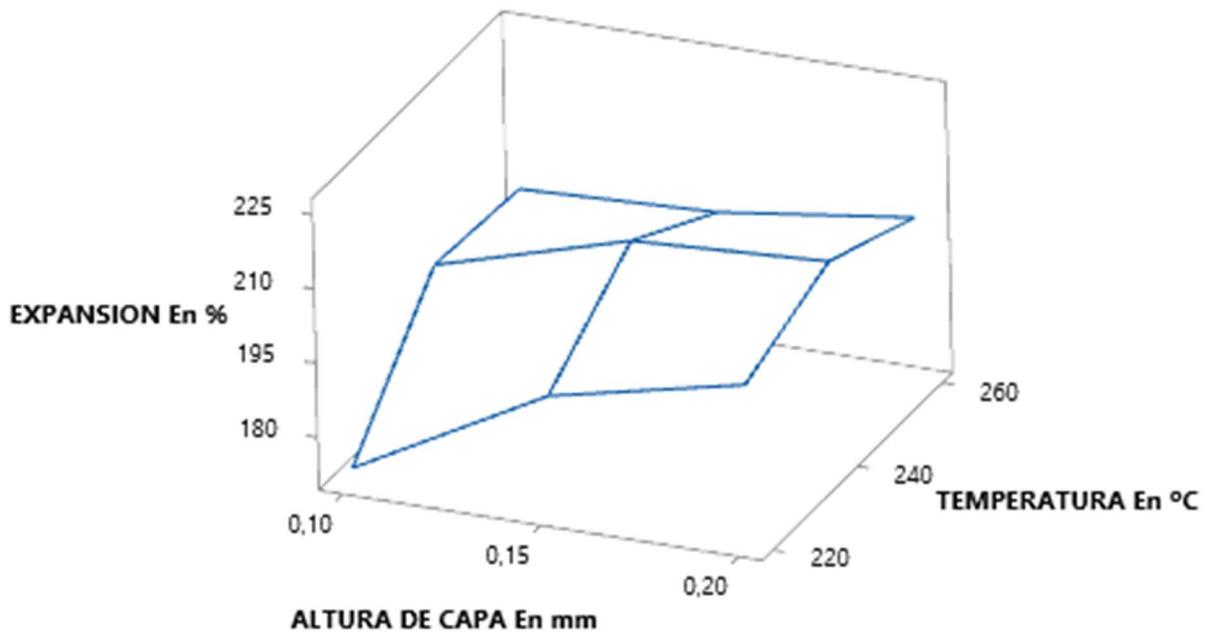


Figura Anexo IV 10: h (mm) vs T (°C) frente a exp (%) Optimización Fase 1.

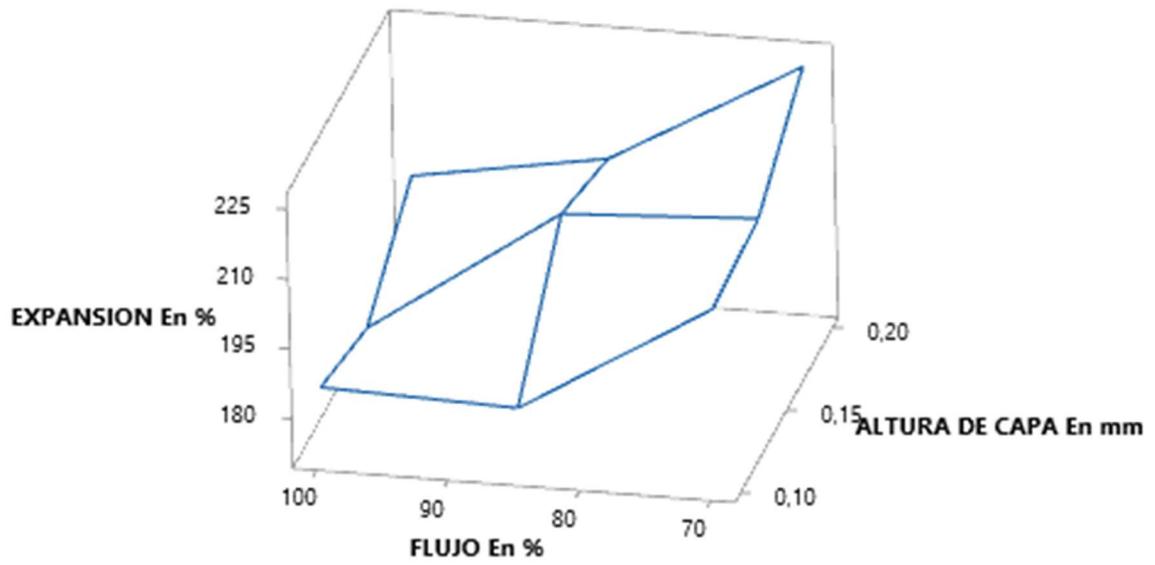


Figura Anexo IV 11: h (mm) vs Φ (%) frente a exp (%) Optimización Fase 1.

- ❖ Total fase 1
 - Espesor

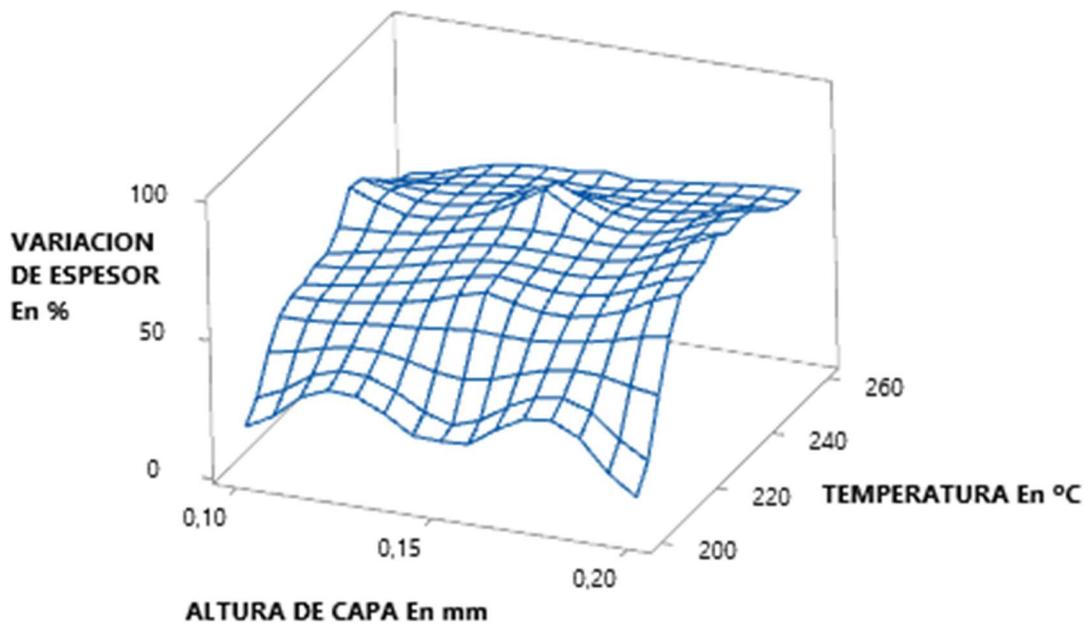


Figura Anexo IV 12: T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Fase 1 completa.

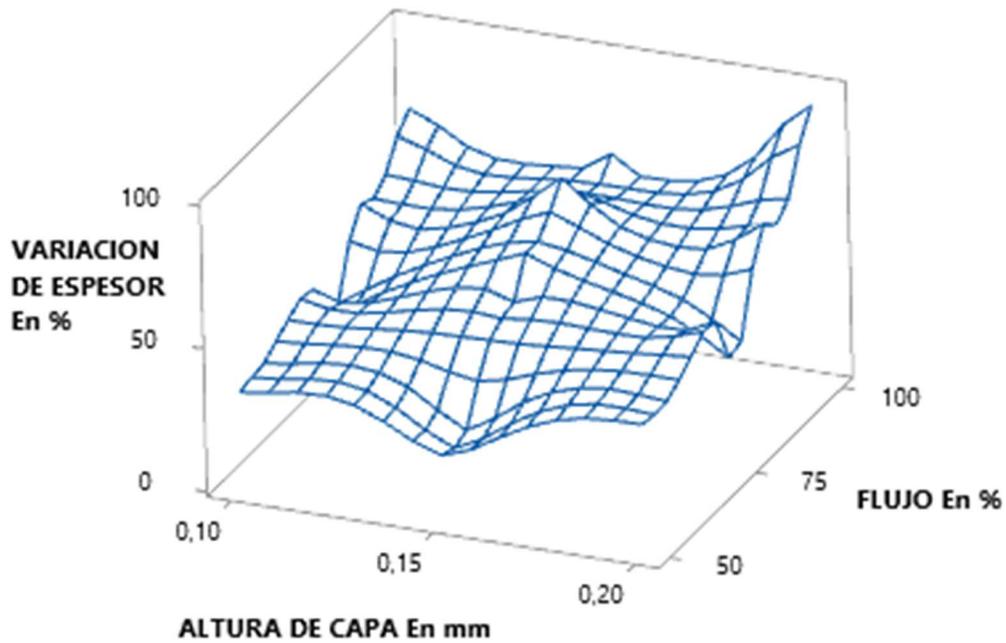


Figura Anexo IV 13: T (°C) vs h (mm) frente a ΔV (%) de la Fase 1 completa.

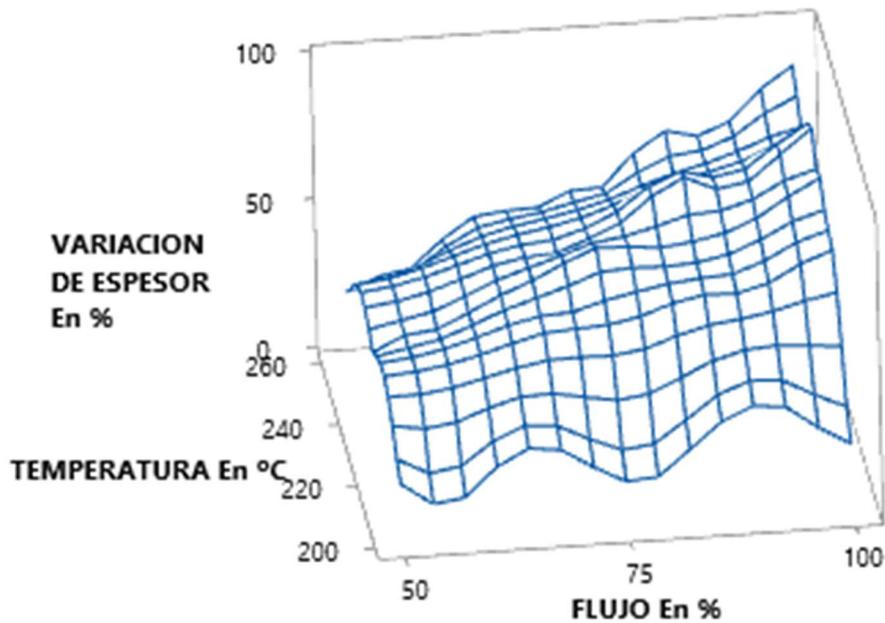


Figura Anexo IV 14: Φ (%) vs h (mm) frente a ΔV (%) de la Fase 1 completa.

➤ Expansión

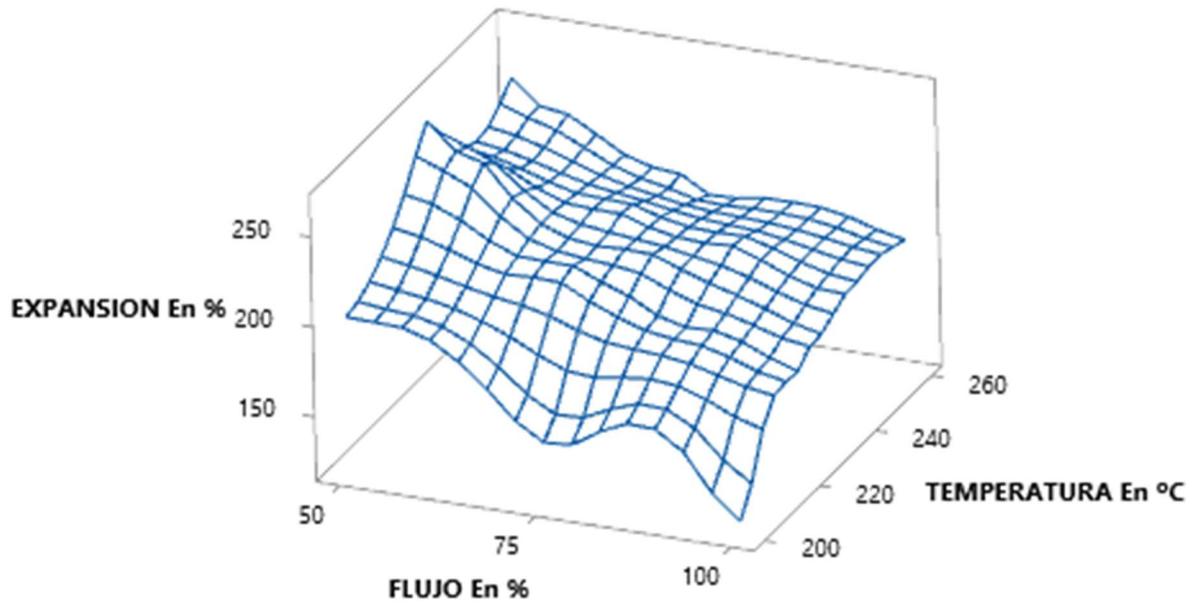


Figura Anexo IV 15: T (°C) vs Φ (%) frente a Exp (%) de la Fase 1 completa.

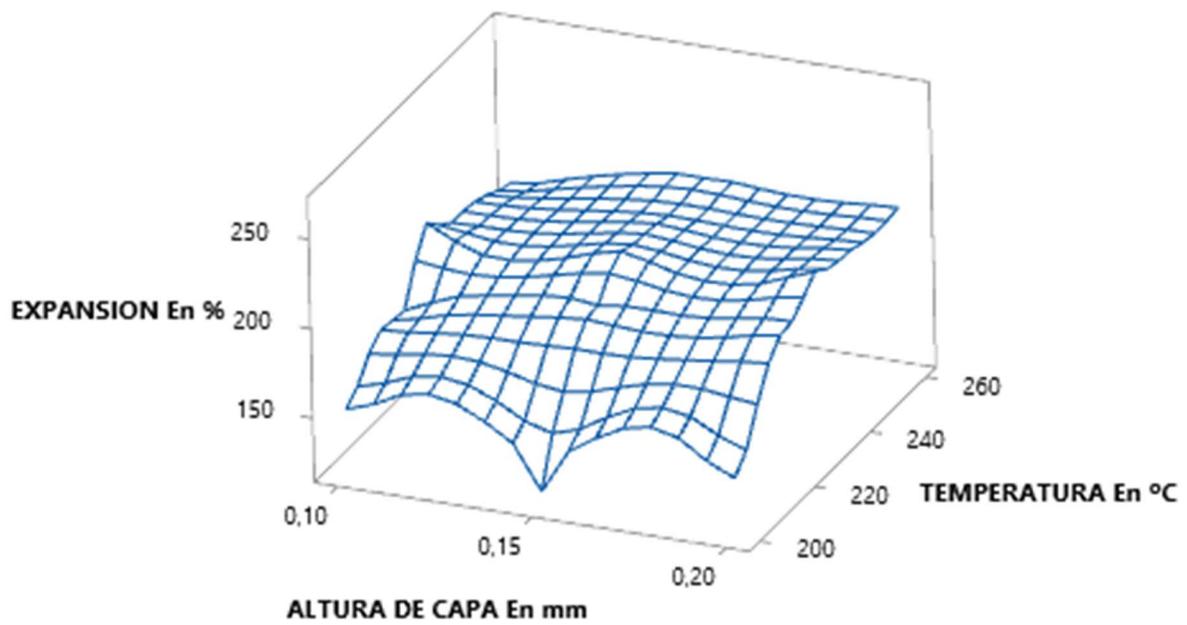


Figura Anexo IV 16: la T (°C) vs h (mm) frente a la Exp (%) de la Fase 1 completa

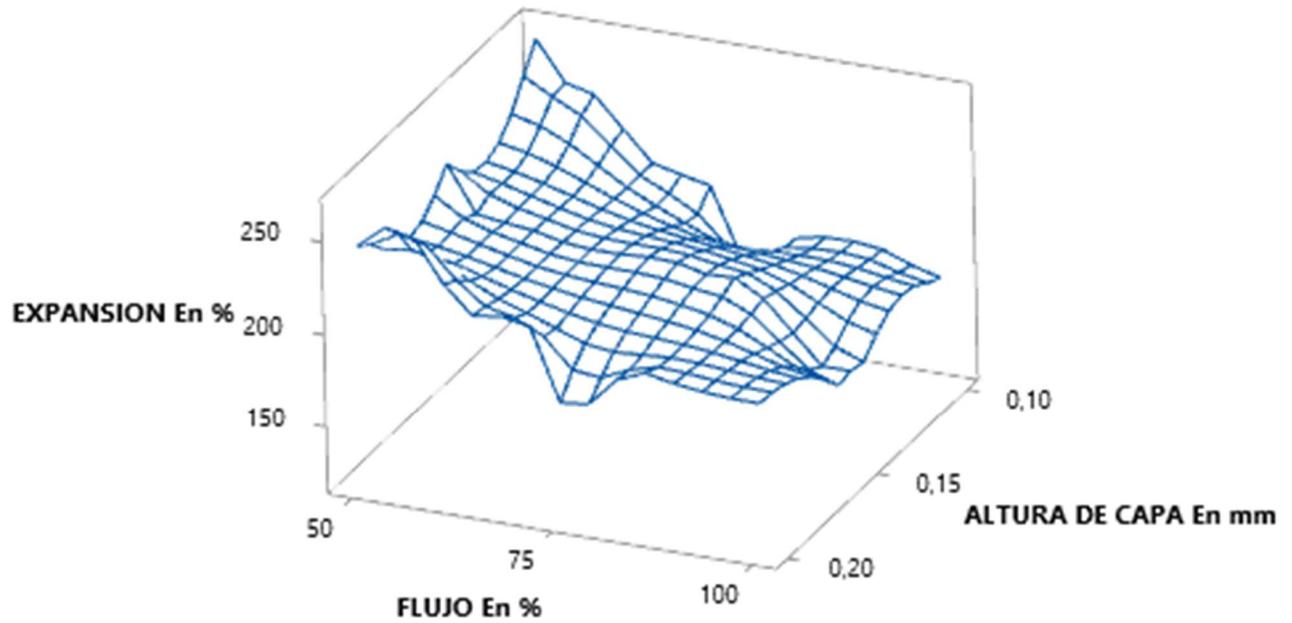


Figura Anexo IV 17: Φ (%) vs h (mm) frente a la Exp (%) de la Fase 1 completa

- ❖ Fase 2
 - Región 1-1

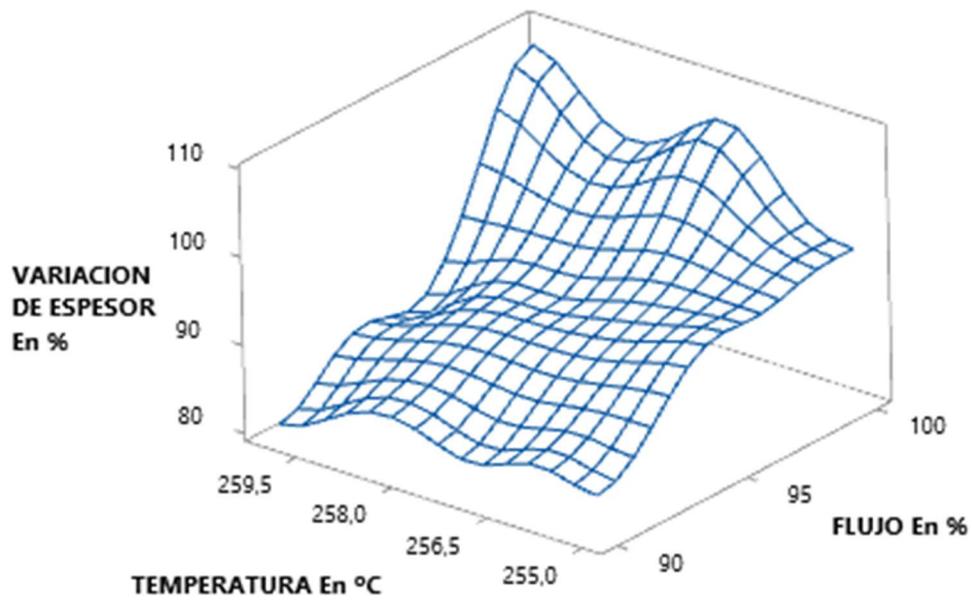


Figura Anexo IV 18: Superficie de respuesta de la ΔV (%) de la Región 1-1.

➤ Región 1-2

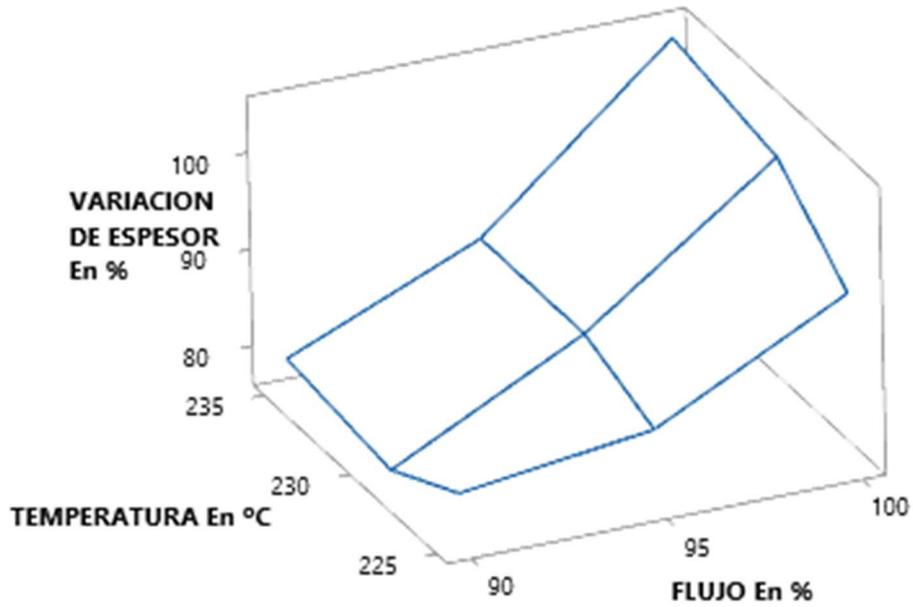


Figura Anexo IV 19: Superficie de respuesta de la ΔV (%) de la Región 1-2.

➤ Región 1-3

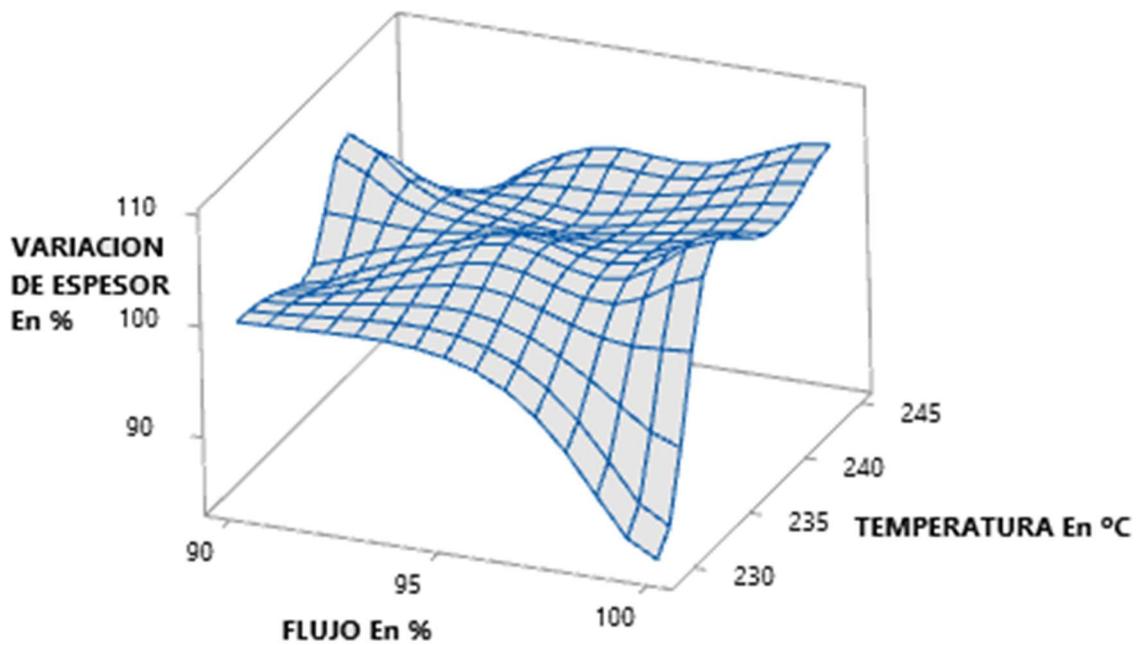


Figura Anexo IV 20: Superficie de respuesta de la ΔV (%) de la Región 1-3.

- ❖ Fase 1 y 2
 - Espesor

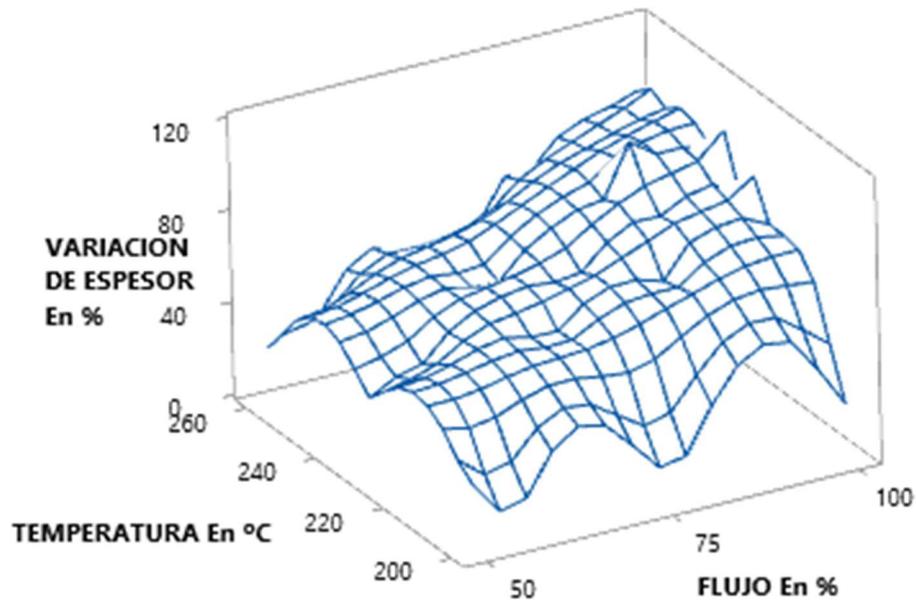


Figura Anexo IV 21: T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Fase 1 y 2 completa.

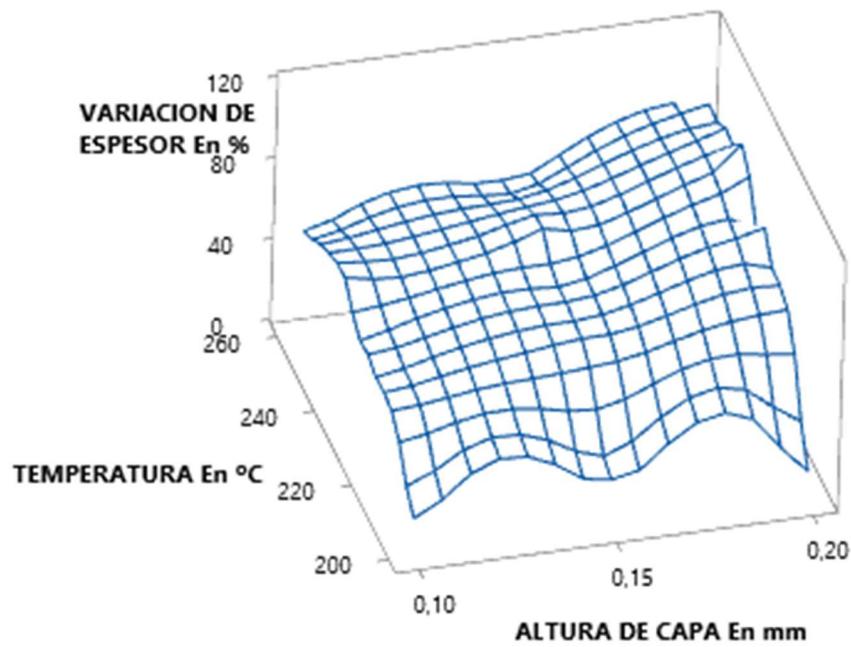


Figura Anexo IV 22: T (°C) vs h (mm) frente a ΔV (%) de la Fase 1 y 2 completa.

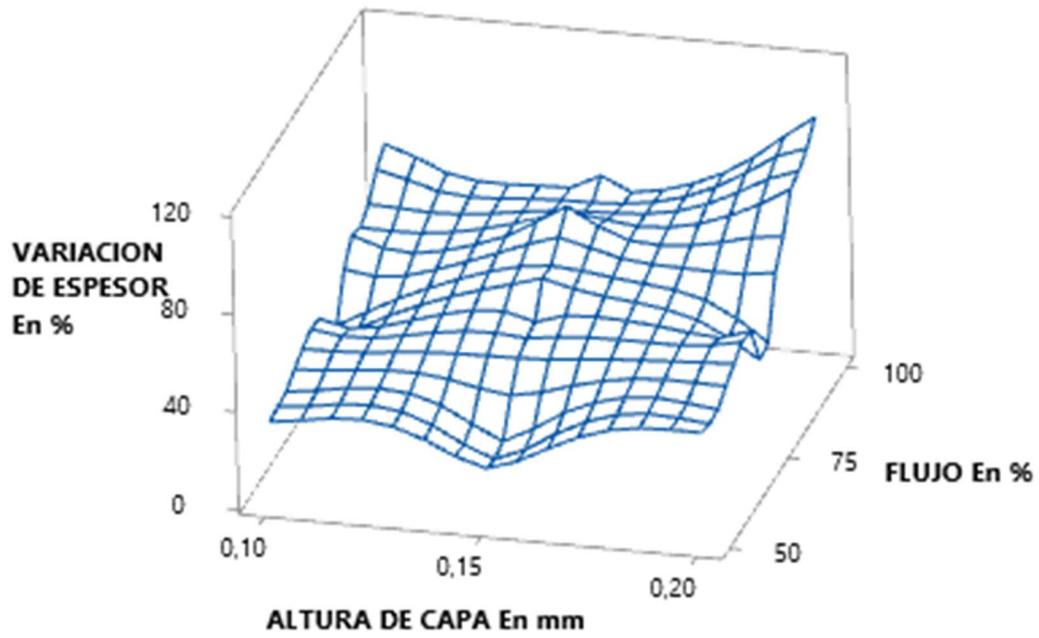


Figura Anexo IV 23: Φ (%) vs h (mm) frente a ΔV (%) de la Fase 1 y 2 completa.

➤ Expansión

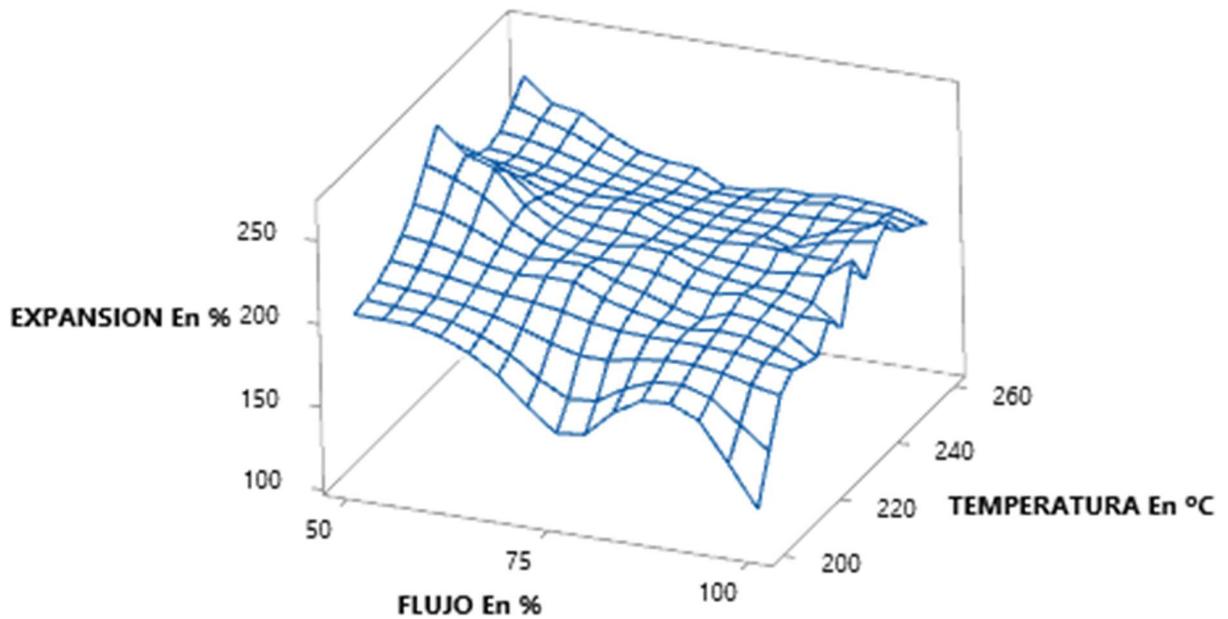


Figura Anexo IV 24: T (°C) vs Φ (%) frente a exp (%) de la Fase 1 y 2 completa

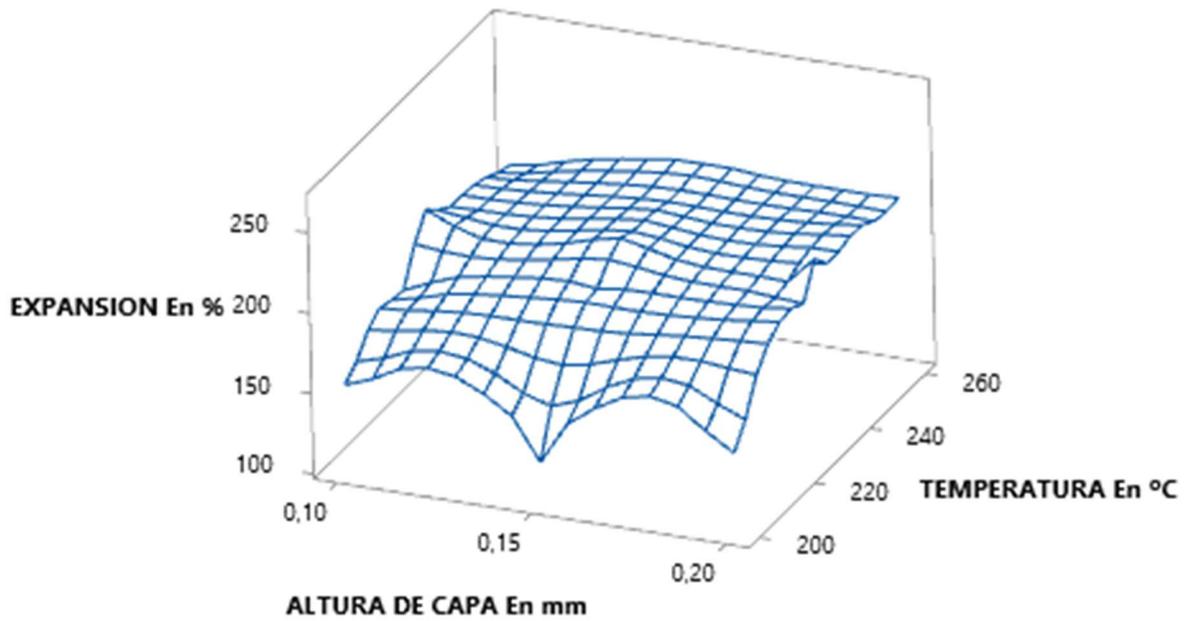


Figura Anexo IV 25: T (°C) vs h (mm) frente a exp (%) de la Fase 1 y 2 completa.

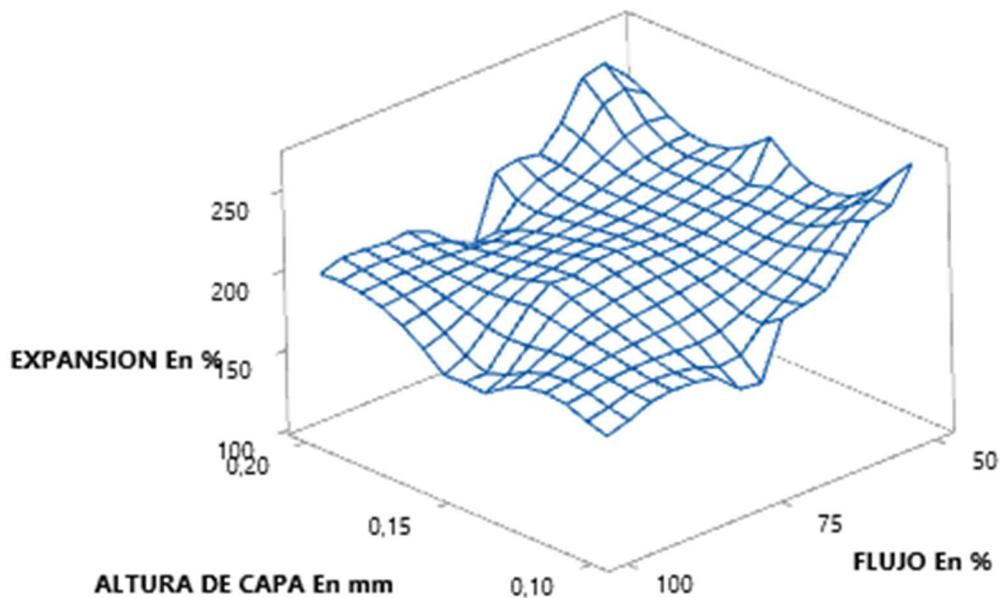


Figura Anexo IV 26: Φ (%) vs h (mm) frente a exp (%) de la Fase 1 y 2 completa.

- ❖ Fase 3
 - Espesor

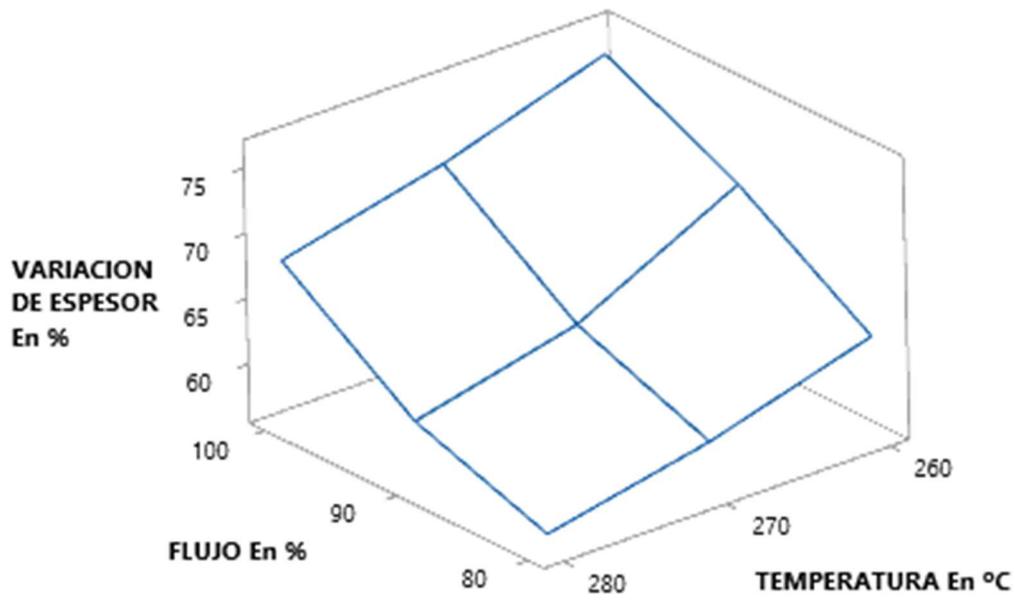


Figura Anexo IV 27: Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 3.

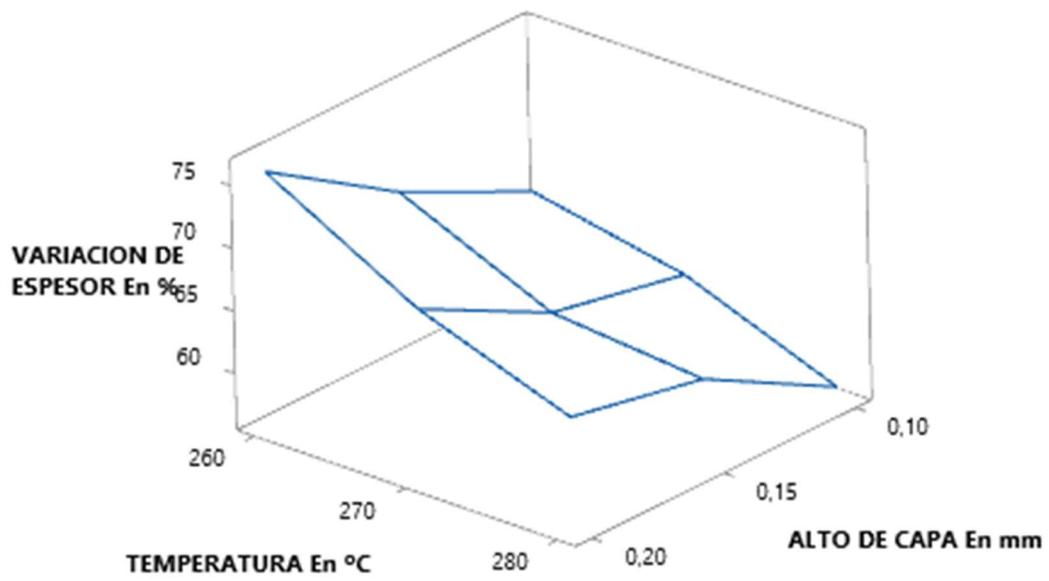


Figura Anexo IV 28: h (mm) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 3.

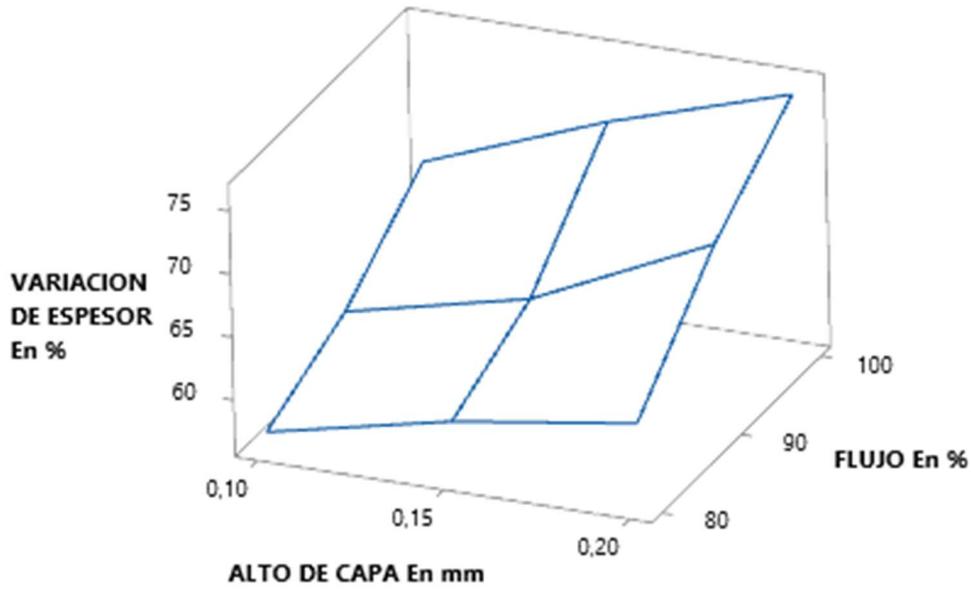


Figura Anexo IV 29: h (mm) vs Φ (%) frente a ΔV (%) Fase 3.

- ❖ Fase 1, 2 y 3
 - Espesor

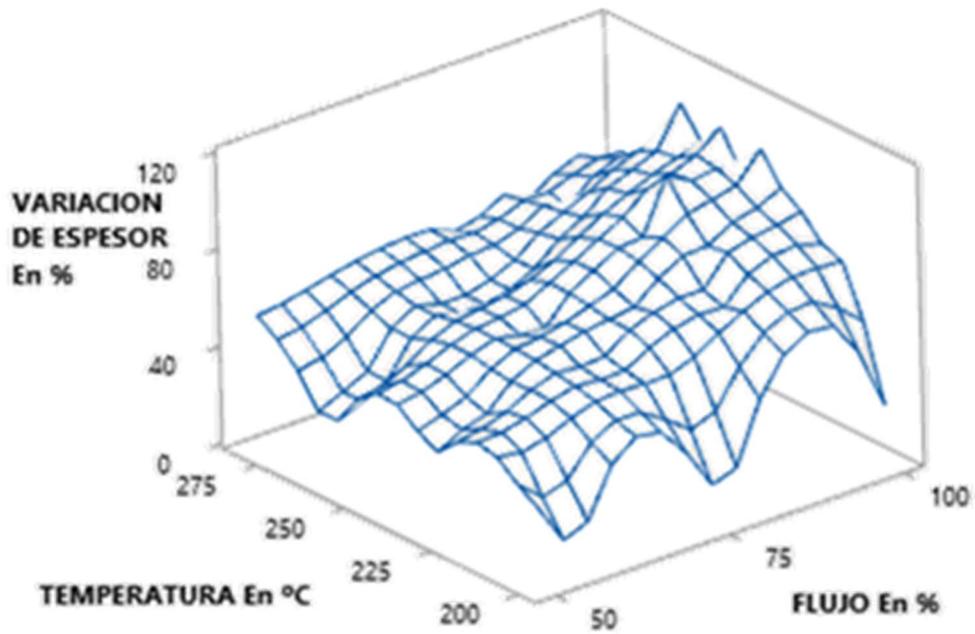


Figura Anexo IV 30: Φ (%) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1, 2 y 3.

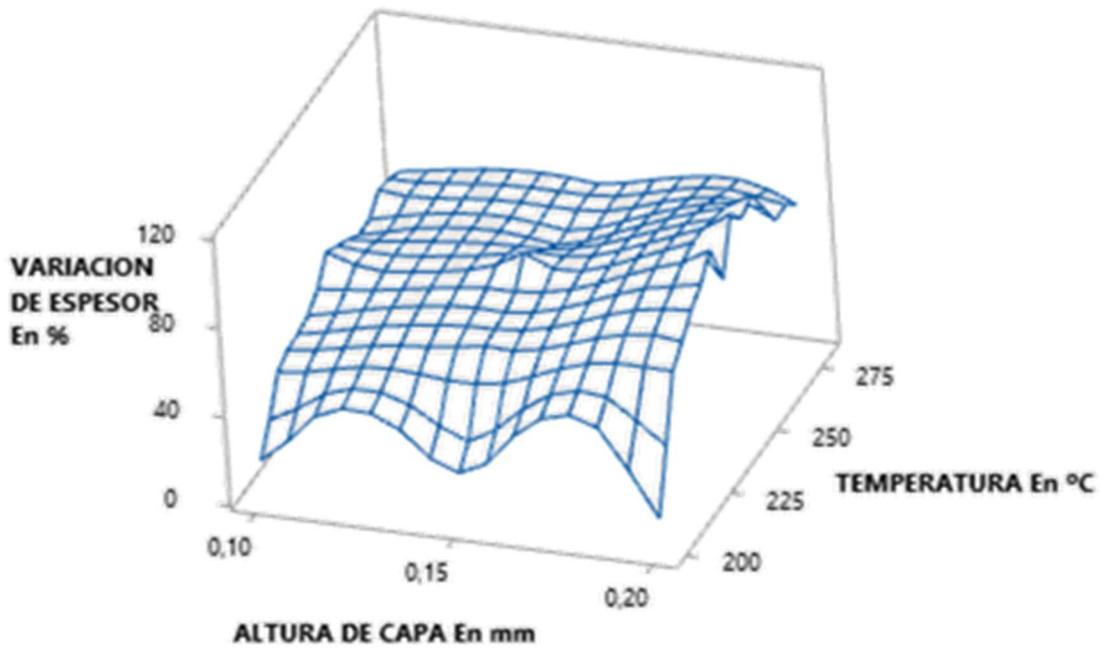


Figura Anexo IV 31: h (mm) vs T ($^{\circ}\text{C}$) frente a ΔV (%) Fase 1, 2 y 3.

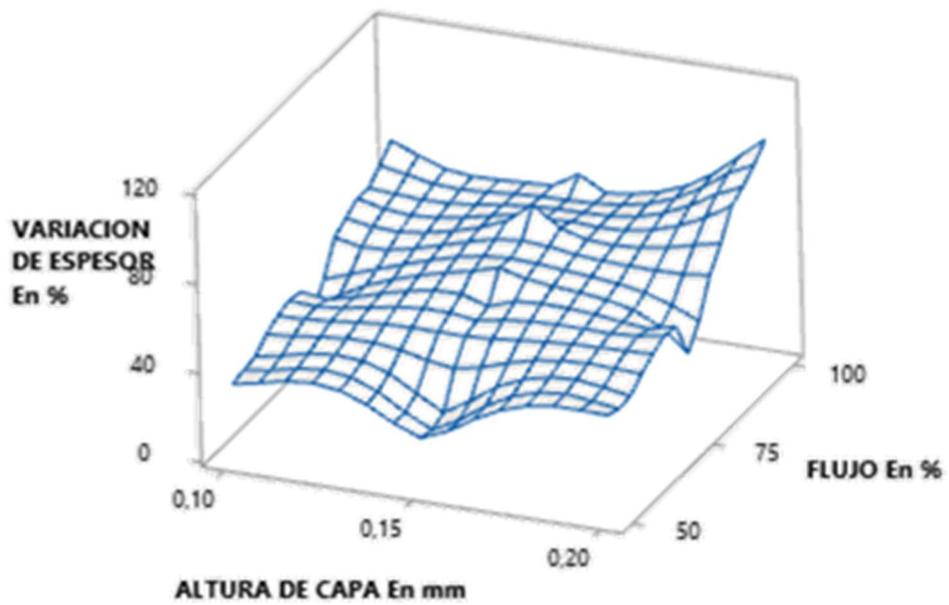


Figura Anexo IV 32: h (mm) vs Φ (%) frente a ΔV (%) Fase 1, 2 y 3.

➤ Expansión

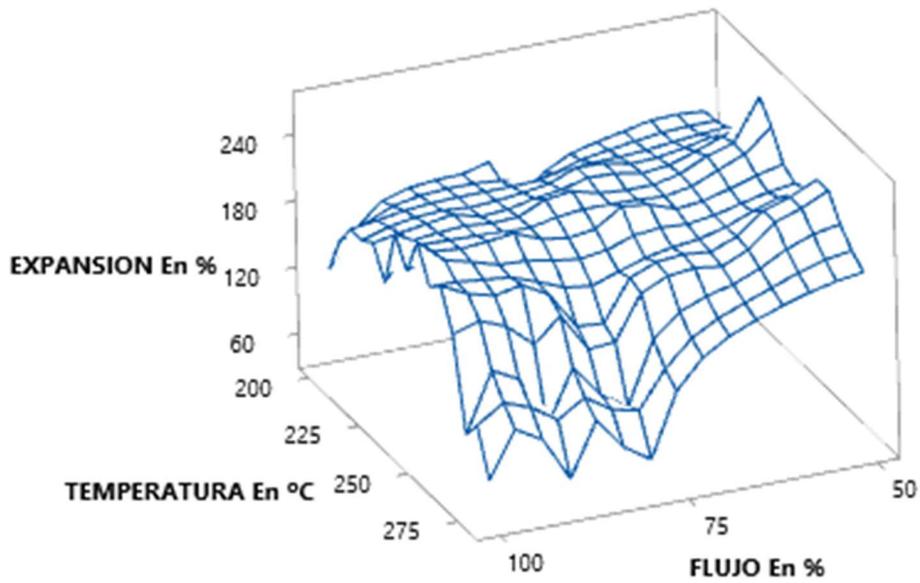


Figura Anexo IV 33: Φ (%) vs T (°C) frente a exp (%) Fase 1, 2 y 3.

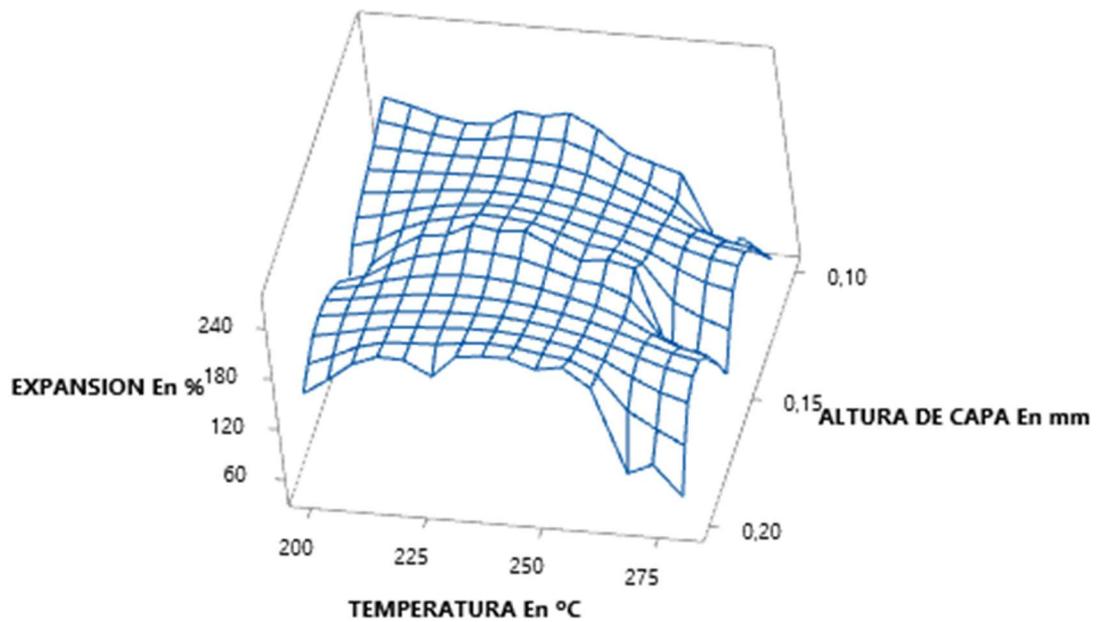


Figura Anexo IV 34: h (mm) vs T (°C) frente a exp (%) Fase 1, 2 y 3.

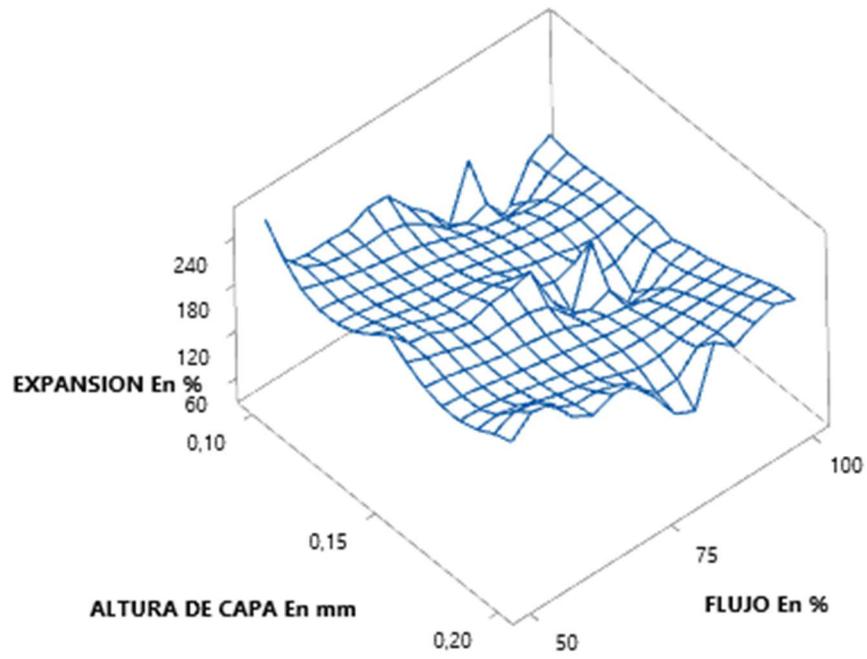


Figura Anexo IV 35: h (mm) vs Φ (%) frente a exp (%) Fase 1, 2 y 3.

Anexo V: Tablas ANOVA

- ❖ Fase 1
 - Espesor

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,000
Φ	0,000
h	0,005
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,000
Φ *Φ	0,857
h *h	0,167
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,002
T*h	0,035
Φ *h	0,056

Tabla Anexo V- 1: ANOVA con los datos de la Tabla 3-1 para el análisis de ΔV (%) Fase 1.

Según los datos mostrados, todos los ellos son relevantes. Pero gracias a la Figura Anexo VII- 1 se puede hacer un escalado, pudiendo afirmar que son la temperatura y el flujo los más importantes, seguidos por la interacción de la temperatura consigo misma, teniendo un margen amplio a la siguiente variable con significancia.

- Expansión

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,000
Φ	0,000
h	0,004
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,000
Φ *Φ	0,018
h *h	0,178
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,012
T*h	0,024
Φ *h	0,231

Tabla Anexo V- 2: ANOVA con los datos de la Tabla 3-2 para el análisis de la expansión.

Como ocurría con la variación de espesor todas las variables muestran una significancia a tener en cuenta, pero con el escalado que nos aporta el diagrama de Pareto, se puede concluir que en este caso el flujo es la variable más significativa seguida de la interacción de la temperatura consigo misma y de la temperatura por si sola.

❖ Optimización de la fase 1

➤ Espesor

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,015
Φ	0,000
h	0,001
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,001
Φ *Φ	0,080
h *h	0,116
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,013
T*h	0,017
Φ *h	0,774

Tabla Anexo V- 3: ANOVA obtenida de la Tabla 3-3 para el análisis de ΔV (%) Optimización Fase 1.

En este caso siguen siendo significativas las tres variables. El flujo sigue siendo la más relevante, seguida de la interacción temperatura consigo misma, pero se puede apreciar una diferencia respecto a los casos anteriores ya que en este el tercer más significativo es la altura de capa igualada con la interacción de la temperatura recién citada.

➤ Expansión

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,022
Φ	0,000
h	0,001
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,001
Φ *Φ	0,505
h *h	0,096
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,014
T*h	0,016
Φ *h	0,336

Tabla Anexo V- 4: ANOVA con los datos de la Tabla 3-4 para el análisis de la Exp (%) .

Siendo los niveles de significancia similares a los de la variación del espesor en la optimización, que se mostraron en el apartado anterior. Manteniéndose el flujo, seguido de la interacción de la temperatura consigo misma los más relevantes, esta última igualada con el flujo para el resultado de expansión. Tal y como sucedía en la primera toma de datos.

- ❖ Total fase 1
 - Espesor

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,000
Φ	0,000
h	0,000
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,000
Φ *Φ	0,860
h *h	0,046
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,000
T*h	0,038
Φ *h	0,013

Tabla Anexo V- 5: ANOVA para ΔV (%) generada con la totalidad de los datos de la Fase 1.

A la vista de la ANOVA generada todas las variables son significantes por la discriminación de los p-valores, pero gracias al diagrama de Pareto se puede resaltar la importancia del flujo y de la temperatura, ya sea en su primer o segundo orden.

- Expansión

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,000
Φ	0,000
h	0,000
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,000
Φ *Φ	0,000
h *h	0,028
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,000
T*h	0,022
Φ *h	0,064

Tabla Anexo V- 6: ANOVA para la Exp (%) generada con la totalidad de los datos de la Fase 1.

Al igual que en casos anteriores las variables siguen siendo significativas, pero como se viene apreciando en el diagrama de Pareto, las más significativas son el flujo y la temperatura (en su segundo y primer orden).

❖ Fase 1 y 2

➤ Espesor

Ahora a diferencia del apartado anterior se analizarán todos los datos acumulados, en las Fases 1 y 2, a cerca de la variación del espesor.

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,000
Φ	0,000
h	0,000
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,000
Φ *Φ	0,953
h *h	0,203
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,000
T*h	0,149
Φ *h	0,002

Tabla Anexo V- 7: ANOVA para ΔV (%) generada con la totalidad de los datos de la Fase 1 y 2.

➤ Expansión

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,000
Φ	0,000
h	0,039
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,000
Φ *Φ	0,011
h *h	0,270
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,009
T*h	0,166
Φ *h	0,333

Tabla Anexo V- 8: ANOVA para el análisis de la Exp (%) Fase 1 y 2

Como ha sucedido de manera ya recurrente todos los valores son significativos, pero haciendo uso de diagrama de Pareto se puede ver que los más relevantes con el flujo y la temperatura (tanto en su segundo y primer orden).

- ❖ Fase 3
 - Espesor

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,004
Φ	0,002
h	0,003
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,340
Φ *Φ	0,340
h *h	0,585
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,833
T*h En mm	0,261
Φ *h En mm	0,205

Tabla Anexo V- 9: ANOVA con los datos de la Tabla 3-8 para el análisis de ΔV (%) Fase 3.

Según los datos mostrados la significancia de los todos los valores en su primer orden es relevante. Por otro lado, queda demostrada la hipótesis que se indicó al final de la Fase 2. Ya que el máximo de expansión no se da en esta última zona de estudio, pudiendo concluir que, un aumento de temperatura no implica un aumento en la variación de espesor.

- ❖ Fase 1, 2 y 3
 - Espesor

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,004
Φ	0,000
h	0,000
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,000
Φ *Φ	0,286
h *h	0,669
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,000
T*h	0,438
Φ *h	0,002

Tabla Anexo V- 10: ANOVA para el análisis de ΔV (%) Fase 1, 2 y 3.

Con el análisis final de todas las fases, en lo que a variación del espesor se refiere, se puede afirmar que son la temperatura y el flujo las variables más relevantes (apoyada esta idea con el diagrama de Pareto). Añadir que las mayores variaciones de espesor se dan con los flujos más altos y con temperaturas clave en 235°C, 245°C y 255°C.

➤ Expansión

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,000
Φ	0,000
h	0,073
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,000
Φ *Φ	0,113
h *h	0,867
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,447
T*h	0,024
Φ *h	0,977

Tabla Anexo V- 11: ANOVA para el análisis de la Exp (%) Fase 1, 2 y 3

Al igual que ocurre con la variación del espesor las variables más relevantes son la temperatura y el flujo, seguidos por la interacción de la altura de capa en este caso. Por lo que al igual que con el análisis del espesor se ha llegado al fin con este análisis, ya que se disponen de datos suficientes y se ve más productivo empezar la Fase 4 que se centrara en un análisis de la resistencia de las probetas.

❖ Fase 4

➤ Región 2-1

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,163
Φ	0,394
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,785
Φ *Φ	0,785
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,815

Tabla Anexo V- 12: ANOVA de la Región 2-1.

➤ Región 2-2

Fuente	Valor p
<i>Lineal</i>	
T	0,155
Φ	0,118
<i>Cuadrado</i>	
T*T	0,099
<i>Interacción de 2 factores</i>	
T*Φ	0,569

Tabla Anexo V- 13: ANOVA de la Región 2-2.

➤ Región 2-3

Fuente	Valor p
Lineal	
T	0,525
Φ	0,559
Cuadrado	
T*T	0,327
Interacción de 2 factores	
T* Φ	0,972

Tabla Anexo V- 14: ANOVA de la Región 2-3.

➤ Fase 4 completa

Fuente	Valor p
Lineal	
T (%)	0,003
Φ	0,902
Cuadrado	
T (%)*T (%)	0,032
Φ*Φ	0,041
Interacción de 2 factores	
T (%)* Φ	0,618

Tabla Anexo V- 15: ANOVA de la Fase 4.

Anexo VI: Diagramas de Contorno

- ❖ Fase 1
 - Espesor

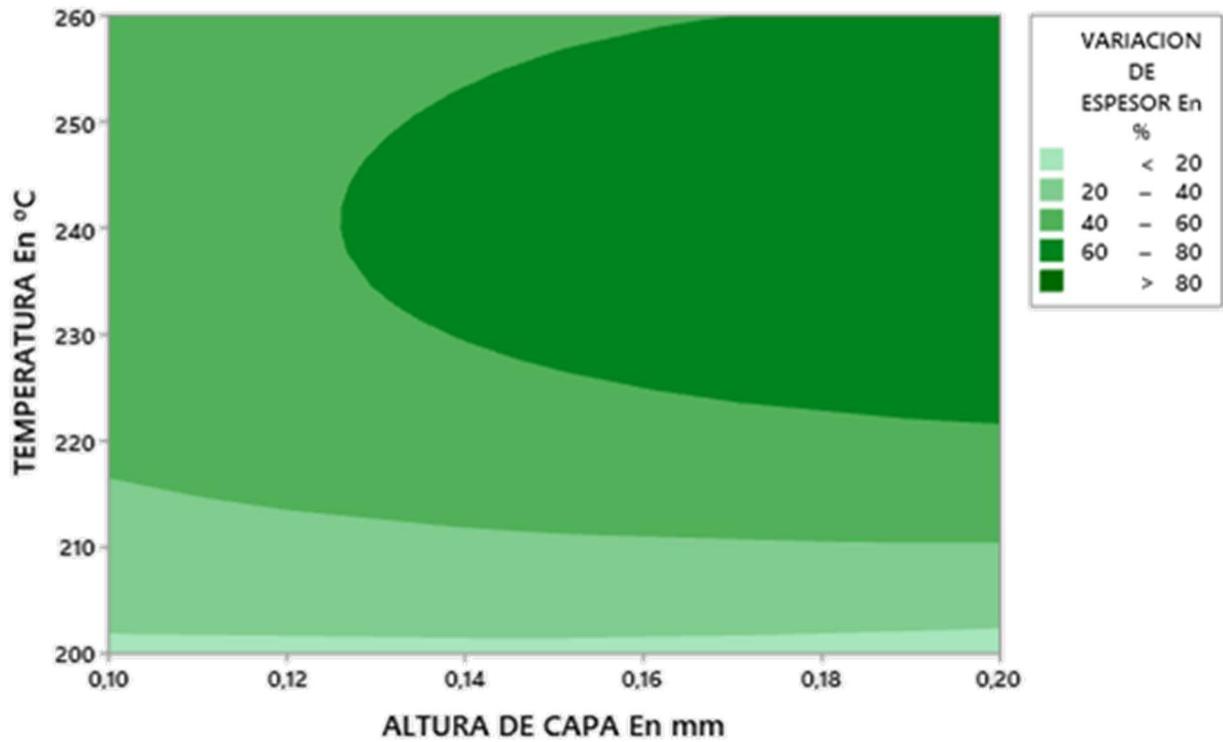


Figura Anexo VI- 1: Diagrama de contorno de h (mm) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 1.

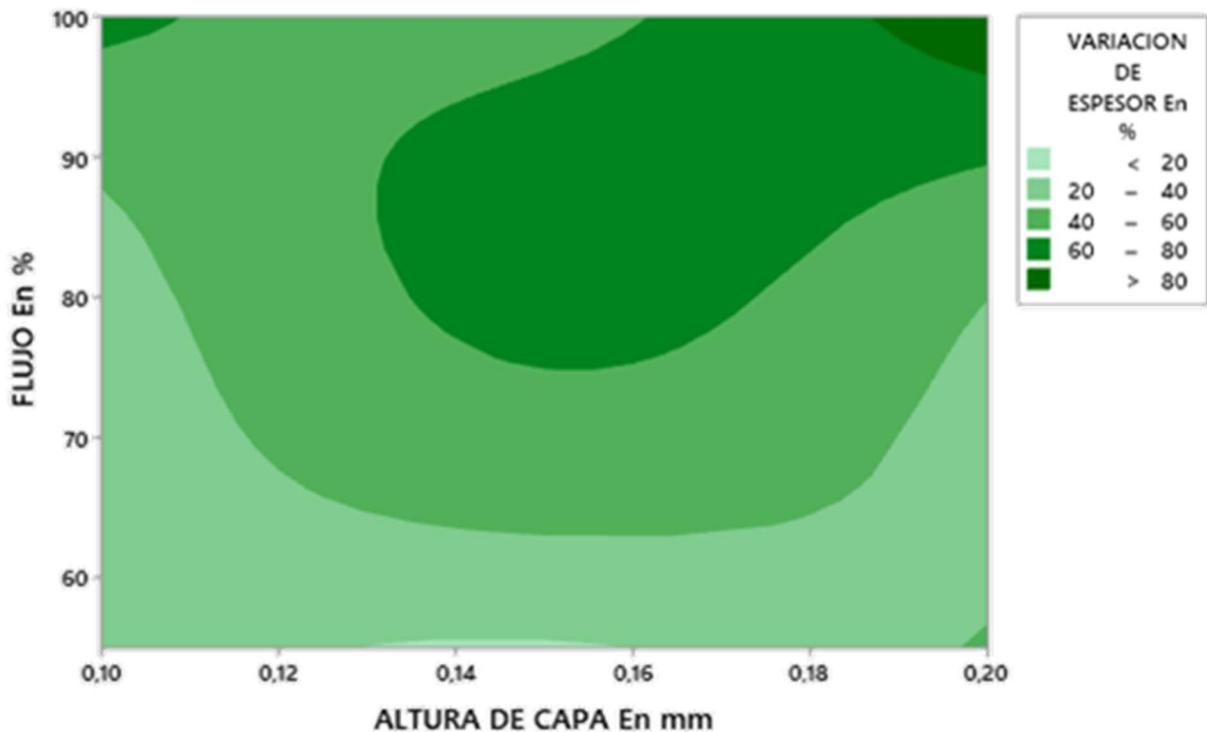


Figura Anexo VI- 2: Diagrama de contorno de h (mm) vs Φ (%) frente a ΔV (%) Fase 1.

➤ Expansión

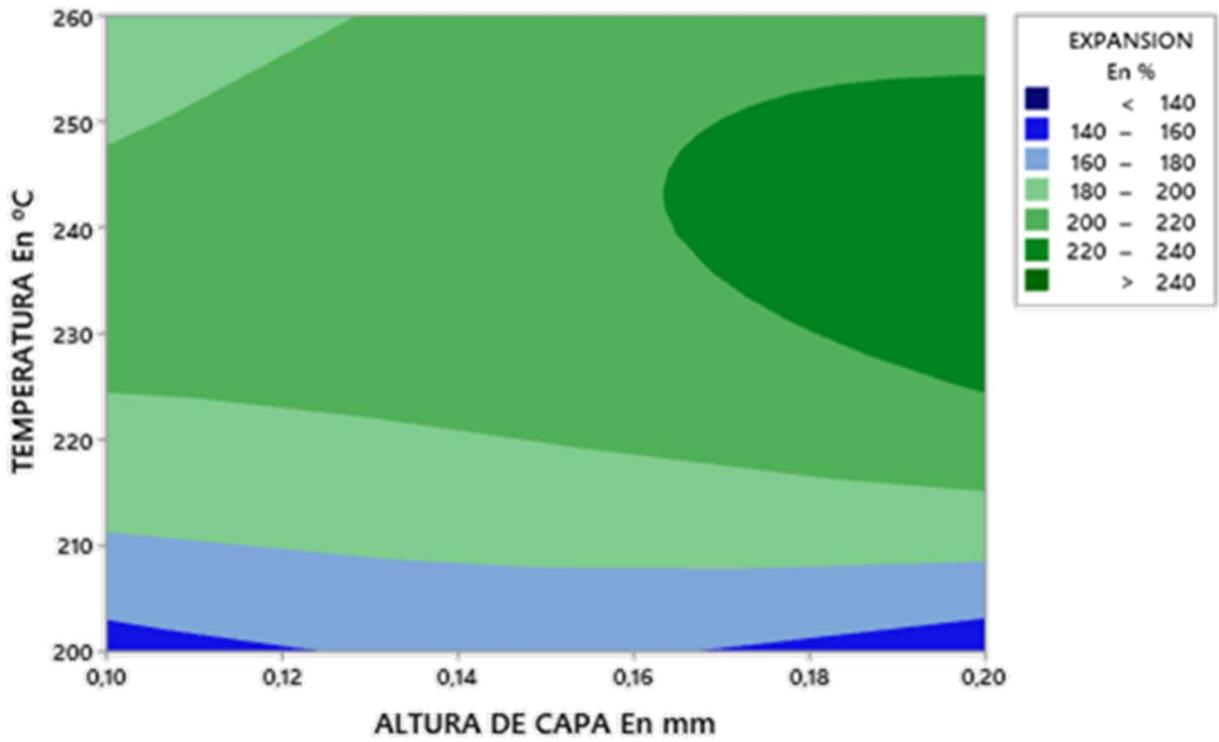


Figura Anexo VI- 3: Diagrama de contorno de h (mm) vs T (°C) frente a Exp (%) Fase 1.

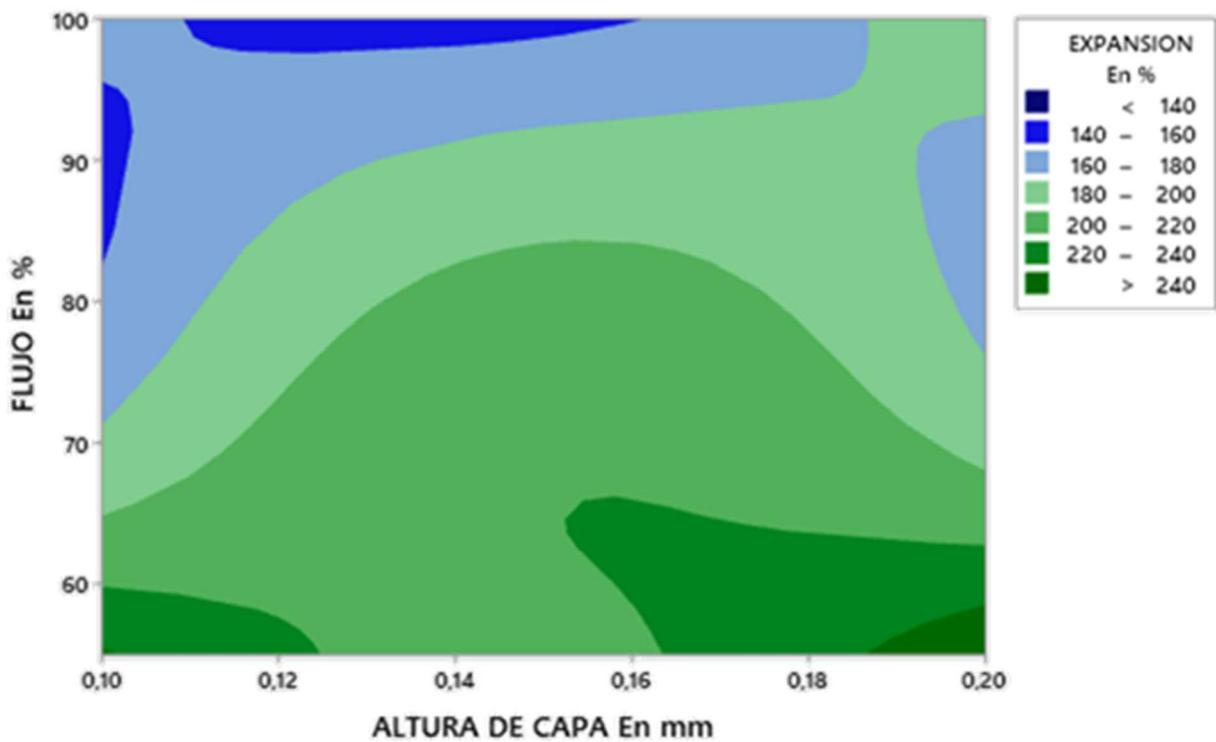


Figura Anexo VI- 4: Diagrama de contorno de h (mm) vs φ (%) frente a Exp (%) Fase 1.

❖ Optimización de la fase 1

➤ Espesor

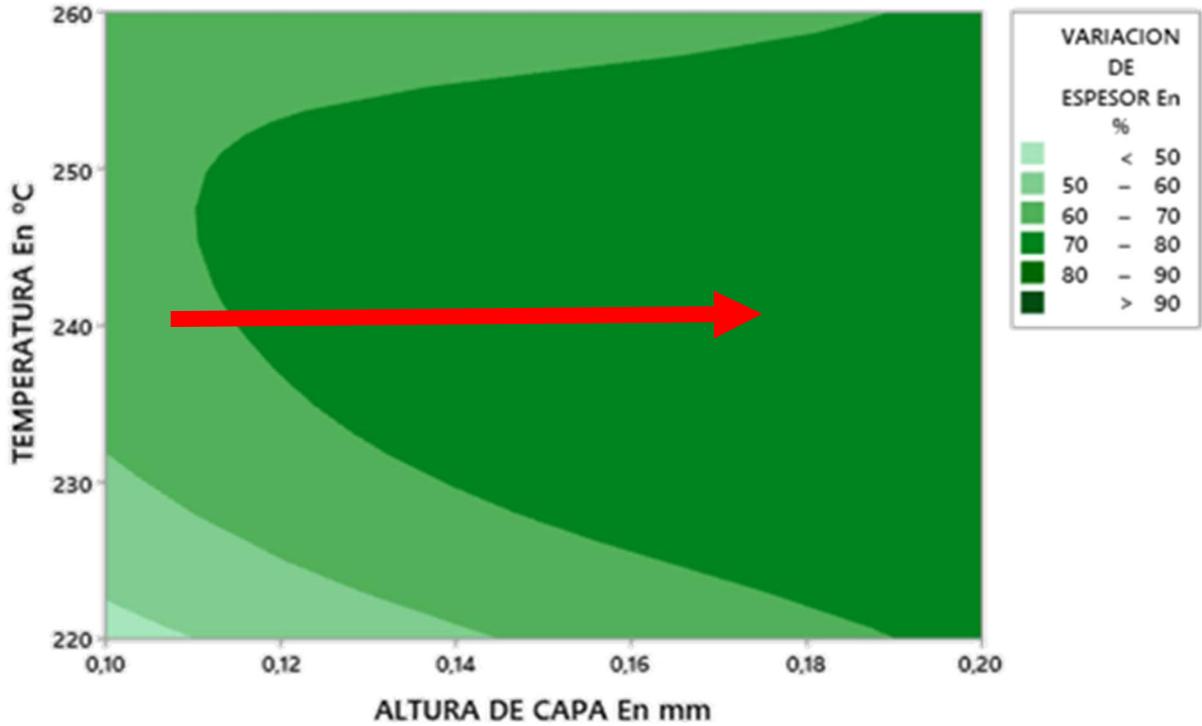


Figura Anexo VI- 5: Diagrama de contorno de h (mm) vs T (°C) frente a ΔV (%) Optimización Fase 1.

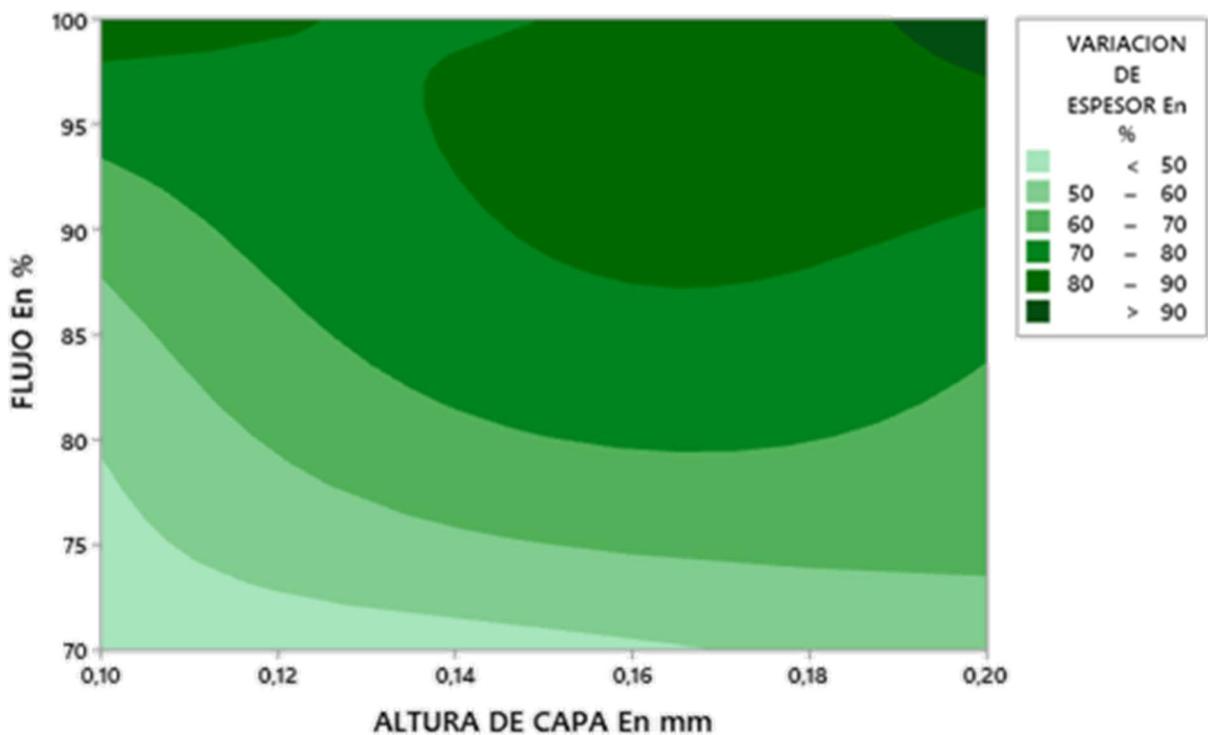


Figura Anexo VI- 6: Diagrama de contorno de h (mm) vs Φ (%) frente a ΔV (%) Optimización Fase 1.

➤ Expansión

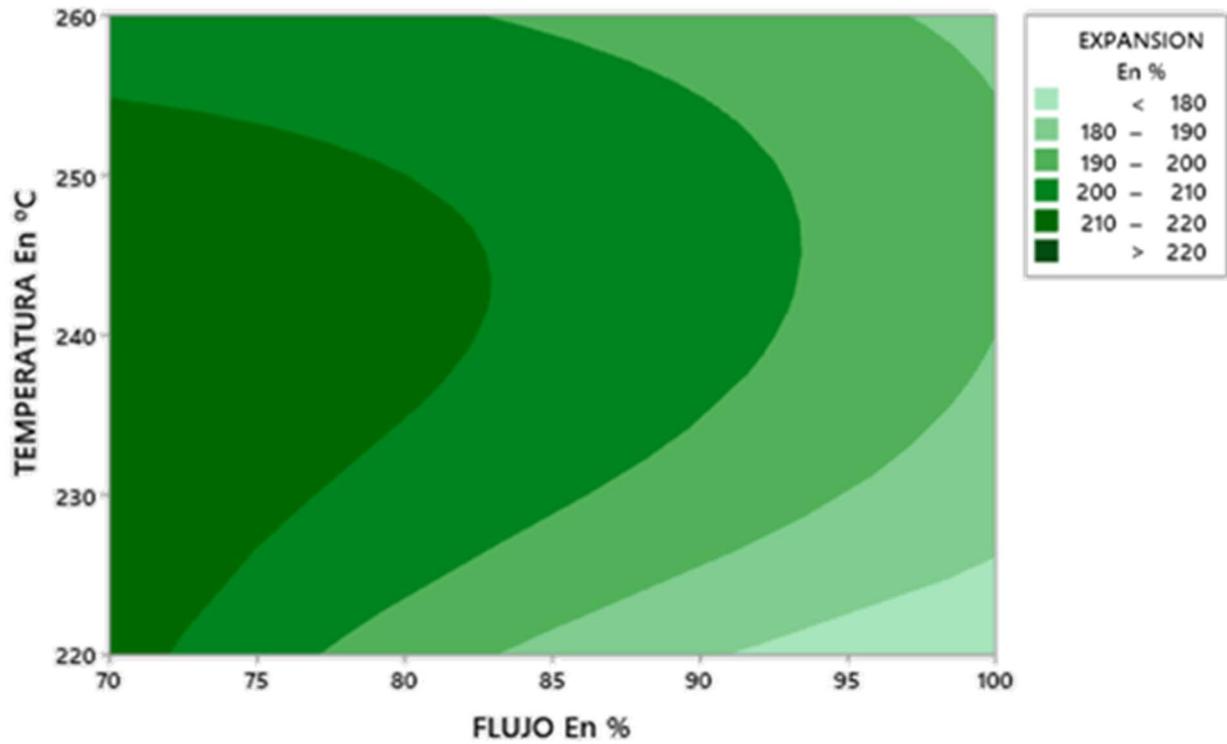


Figura Anexo VI- 7: Diagrama de contorno de Φ (%) vs T (°C) frente a Exp (%) Optimización Fase 1.

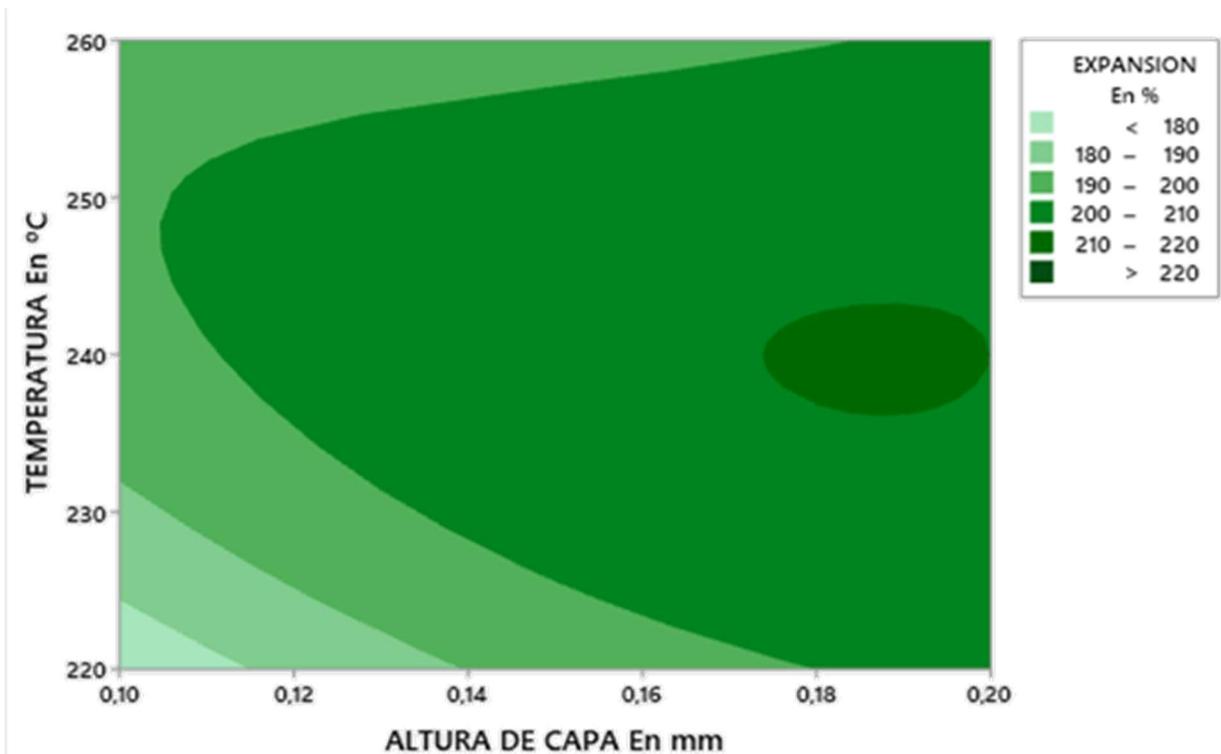


Figura Anexo VI- 8: Diagrama de contorno de h (mm) vs T (°C) frente a Exp (%) Optimización Fase 1.

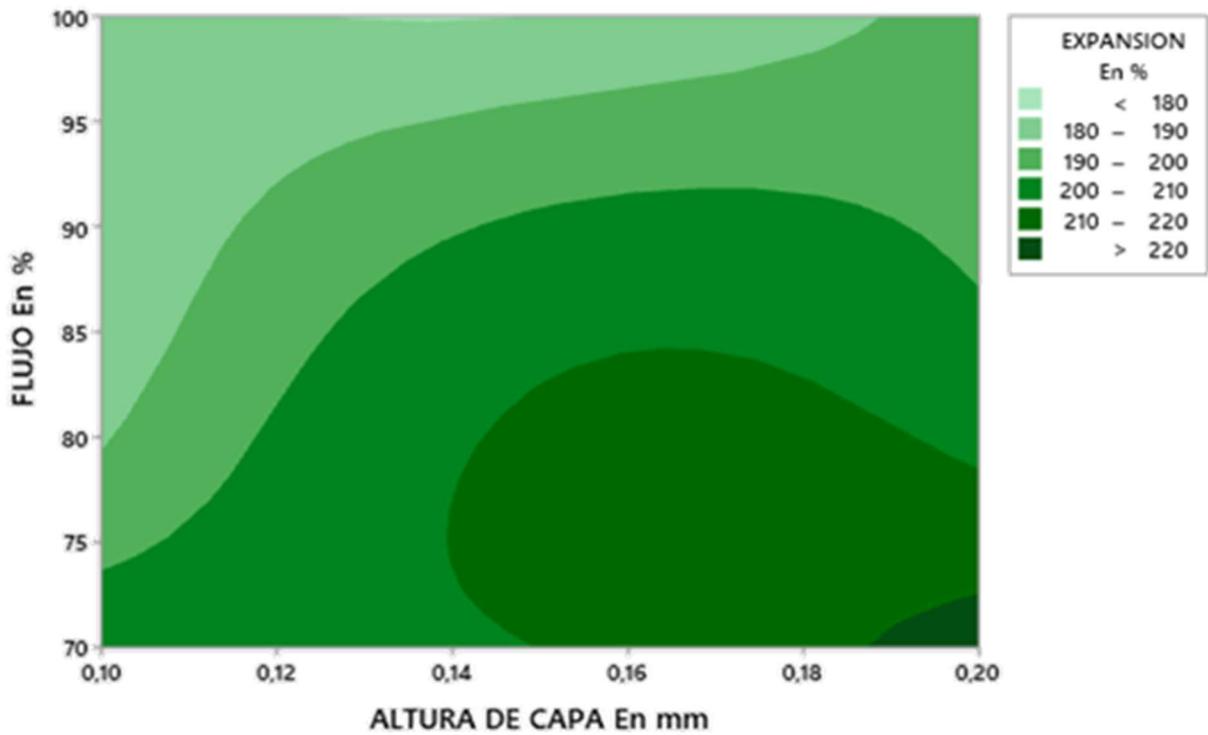


Figura Anexo VI- 9: Diagrama de contorno de h (mm) vs Φ (%) frente a Exp (%) Optimización Fase 1.

- ❖ Total fase 1
 - Espesor

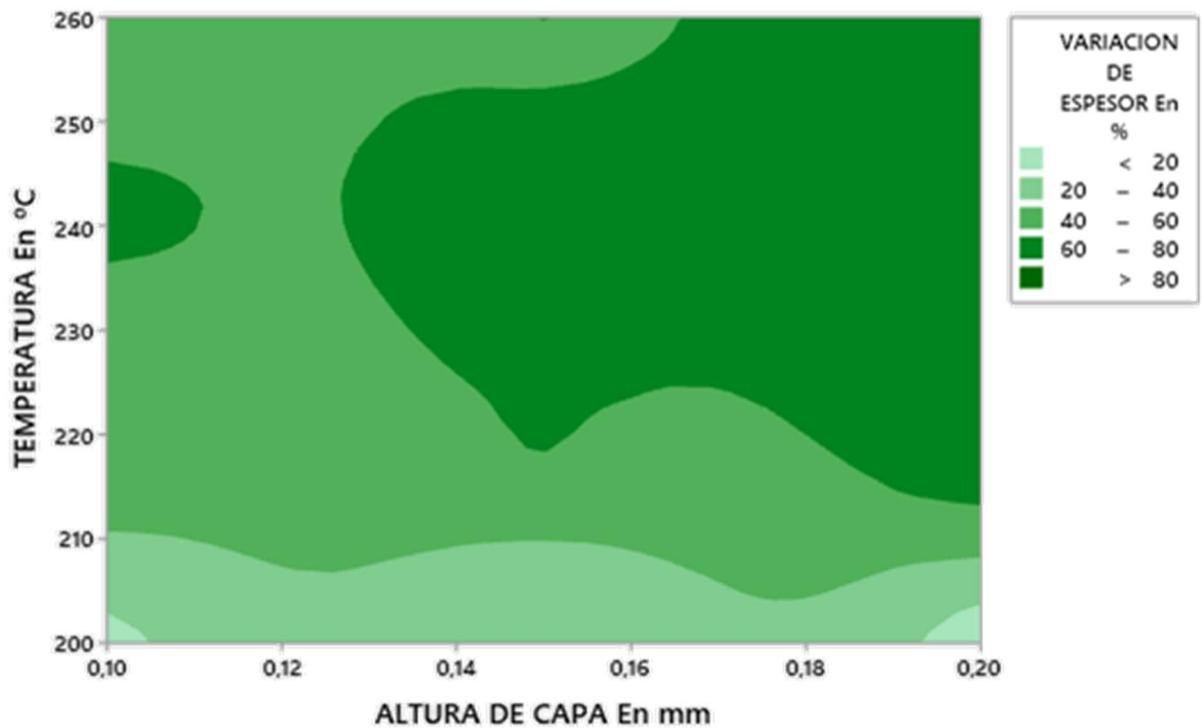


Figura Anexo VI- 10: Gráfica de contorno T (°C) vs h (mm) frente a ΔV (%) de la Fase 1 completa.

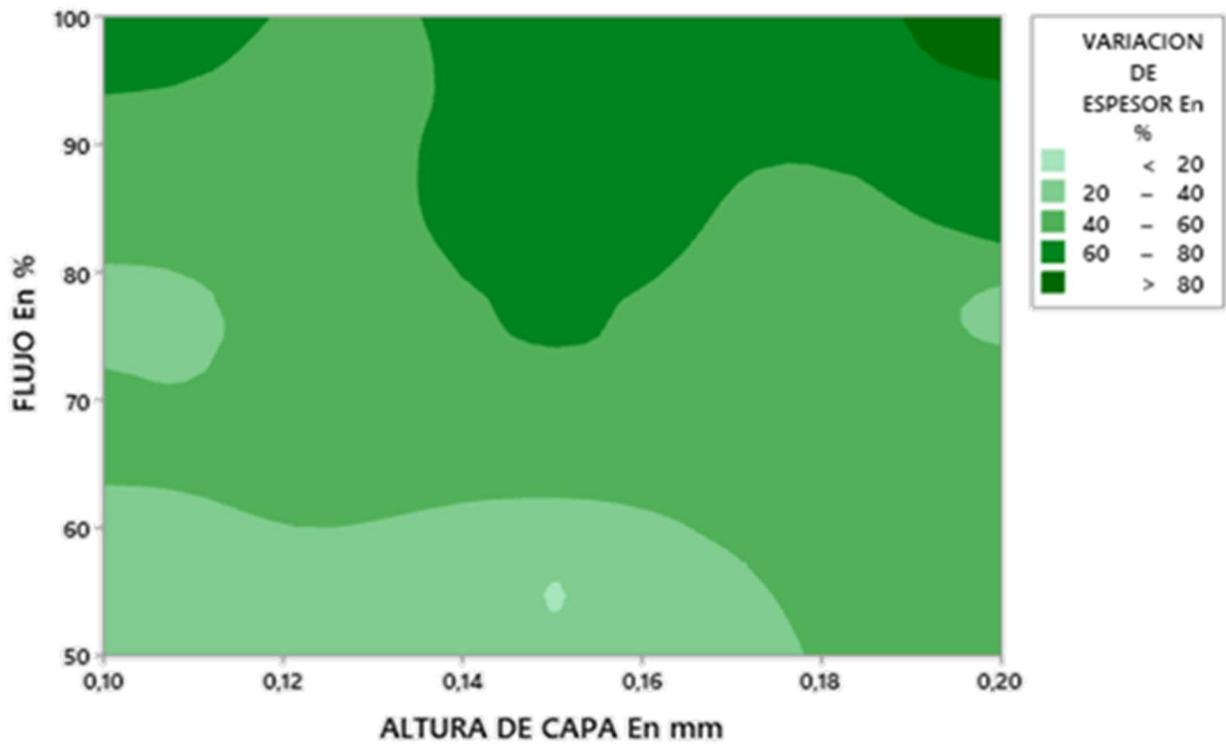


Figura Anexo VI- 11: Gráfica de contorno Φ (%) vs h (mm) frente a ΔV (%) de la Fase 1 completa.

➤ Expansión

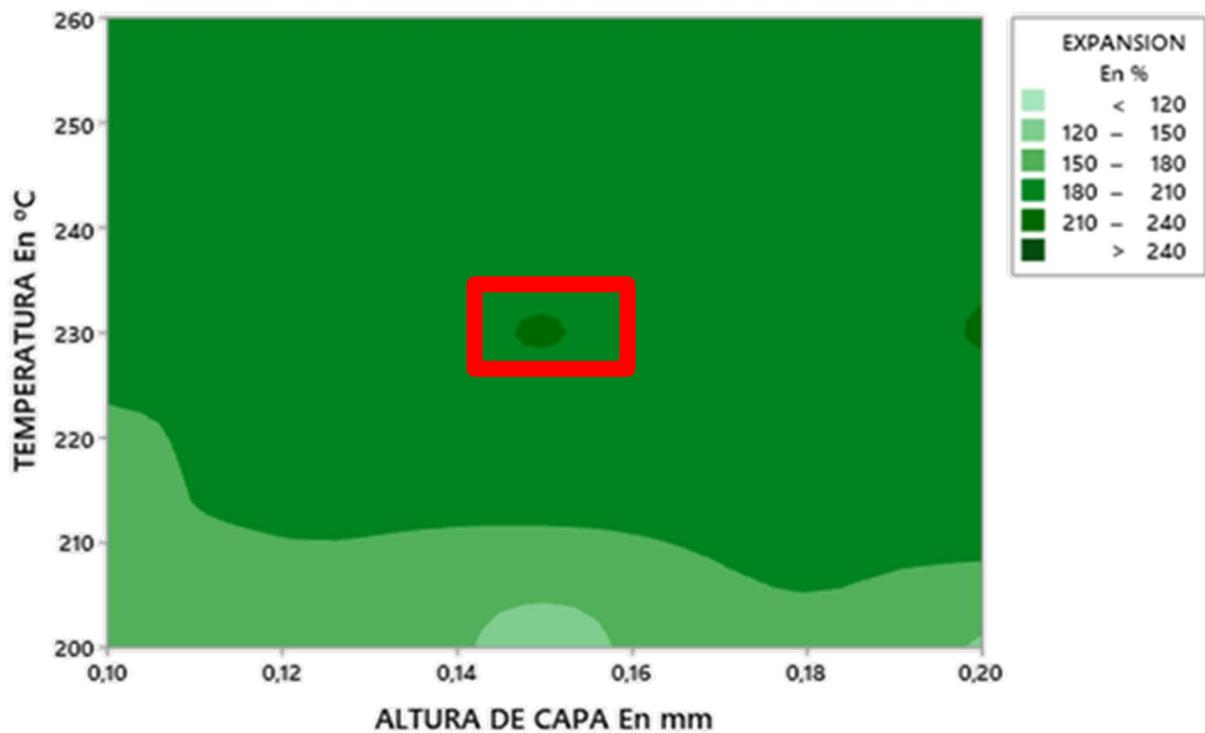


Figura Anexo VI- 12: Gráfica de contorno T (°C) vs h (mm) frente a Exp (%) de la Fase 1 completa.

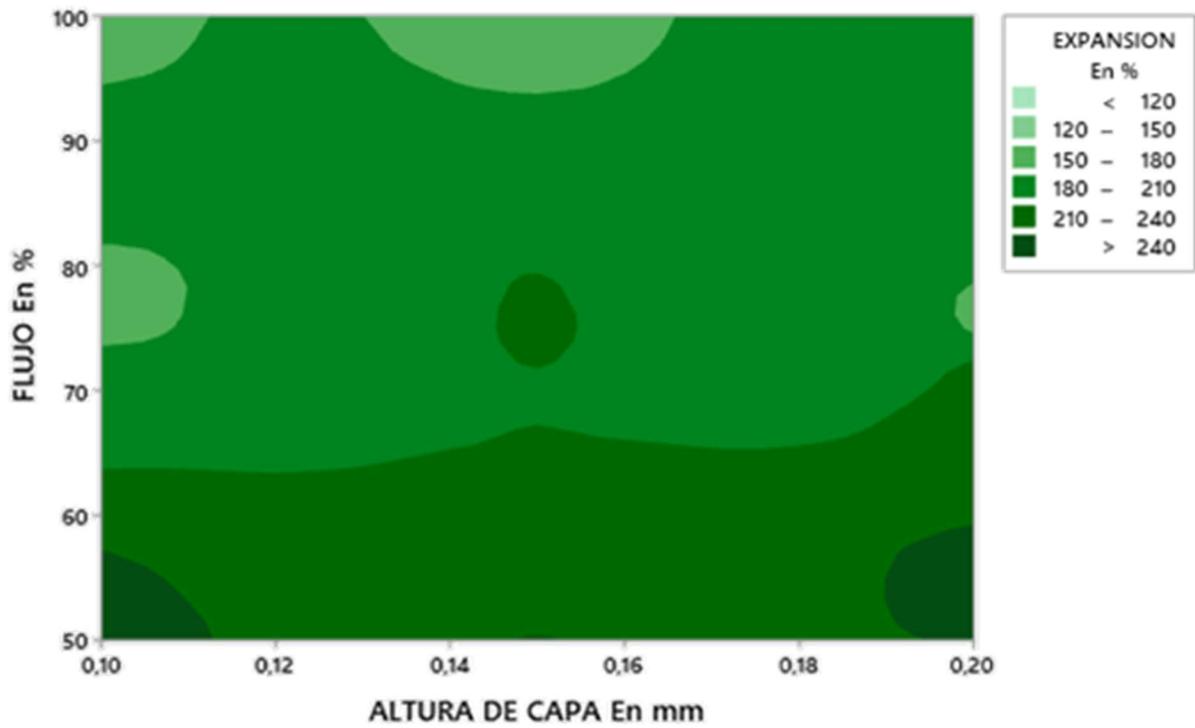


Figura Anexo VI- 13: Gráfica de contorno Φ (%) vs h (mm) frente a Exp (%) de la Fase 1 completa.

- ❖ Fase 1 y 2
 - Espesor

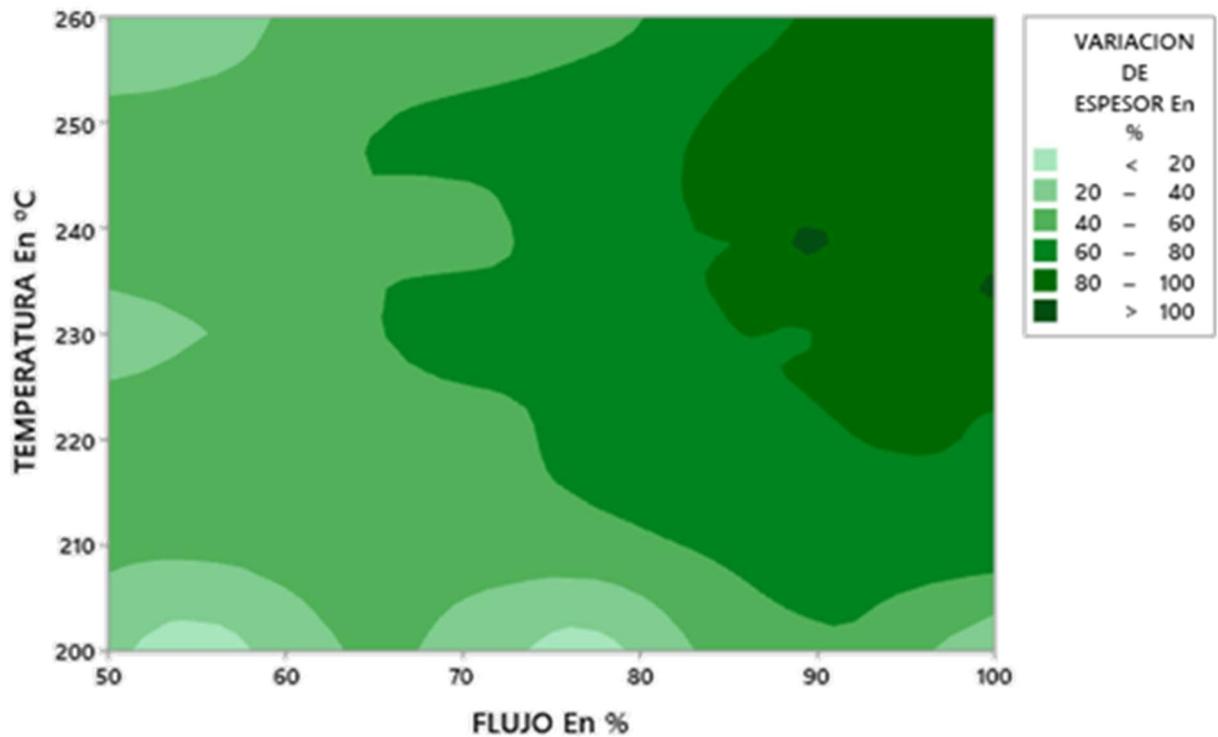


Figura Anexo VI- 14: Gráfica de contorno T (°C) vs Φ (%) frente a ΔV (%) de la Fase 1 y 2 completa.

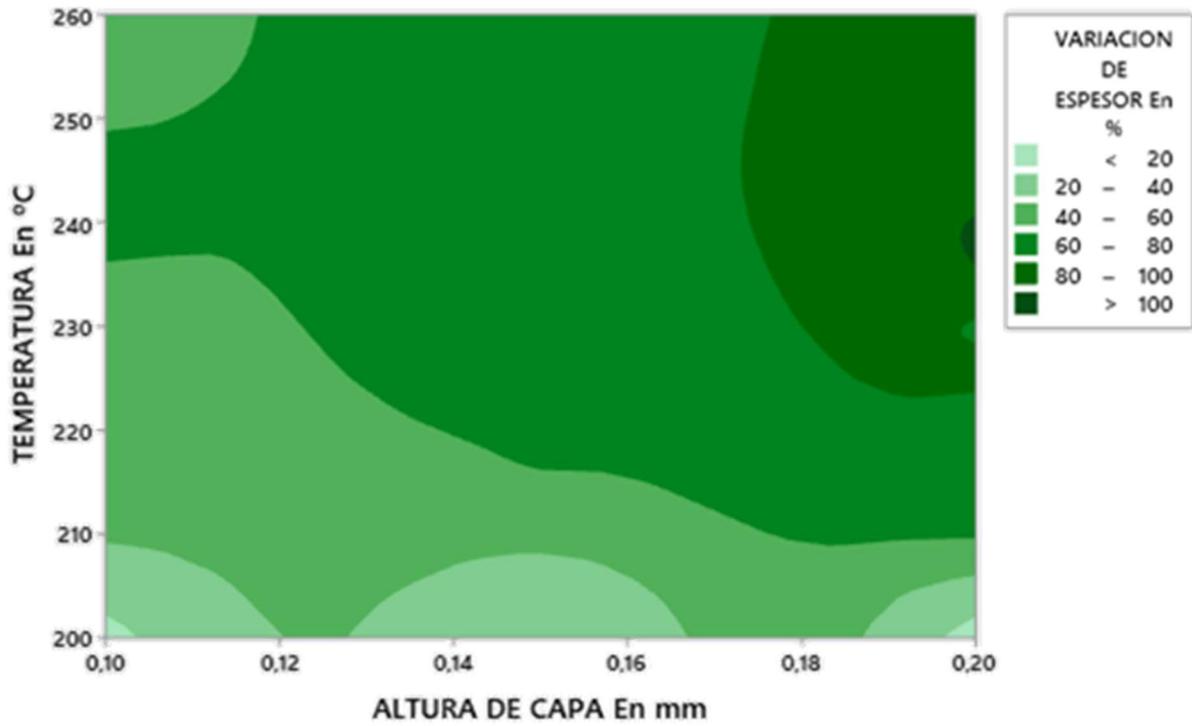


Figura Anexo VI- 15: Gráfica de contorno T (°C) vs h (mm) frente a ΔV (%) de la Fase 1 y 2 completa.

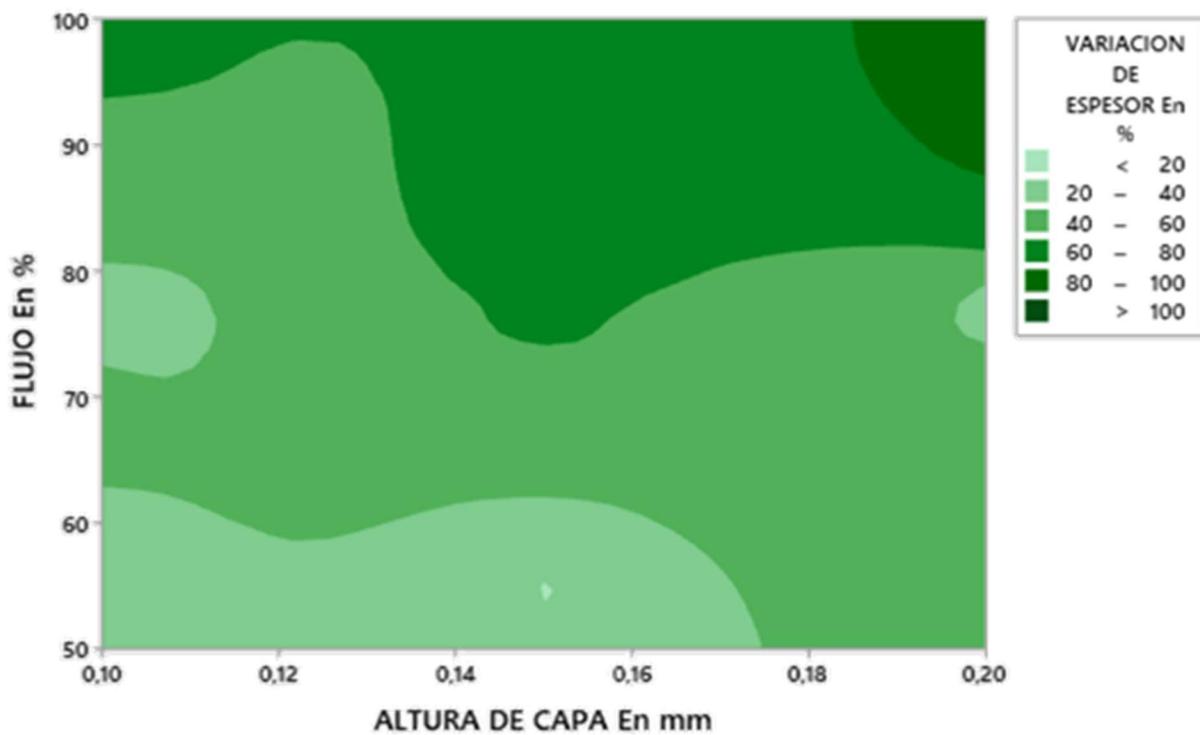


Figura Anexo VI- 16: Gráfica de contorno Φ (%) vs h (mm) frente a ΔV (%).

➤ Expansión

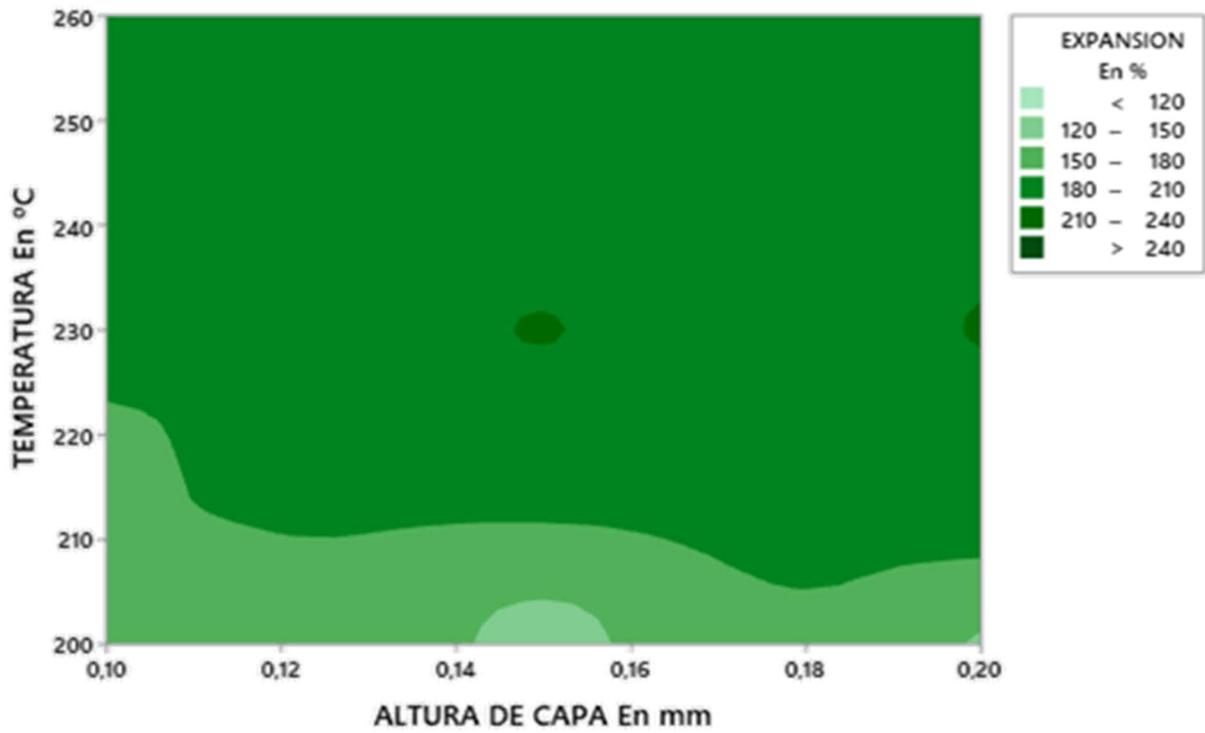


Figura Anexo VI- 17: Gráfica de contorno T (°C) vs h (mm) frente a Exp (%) de la Fase 1 y 2 completa.

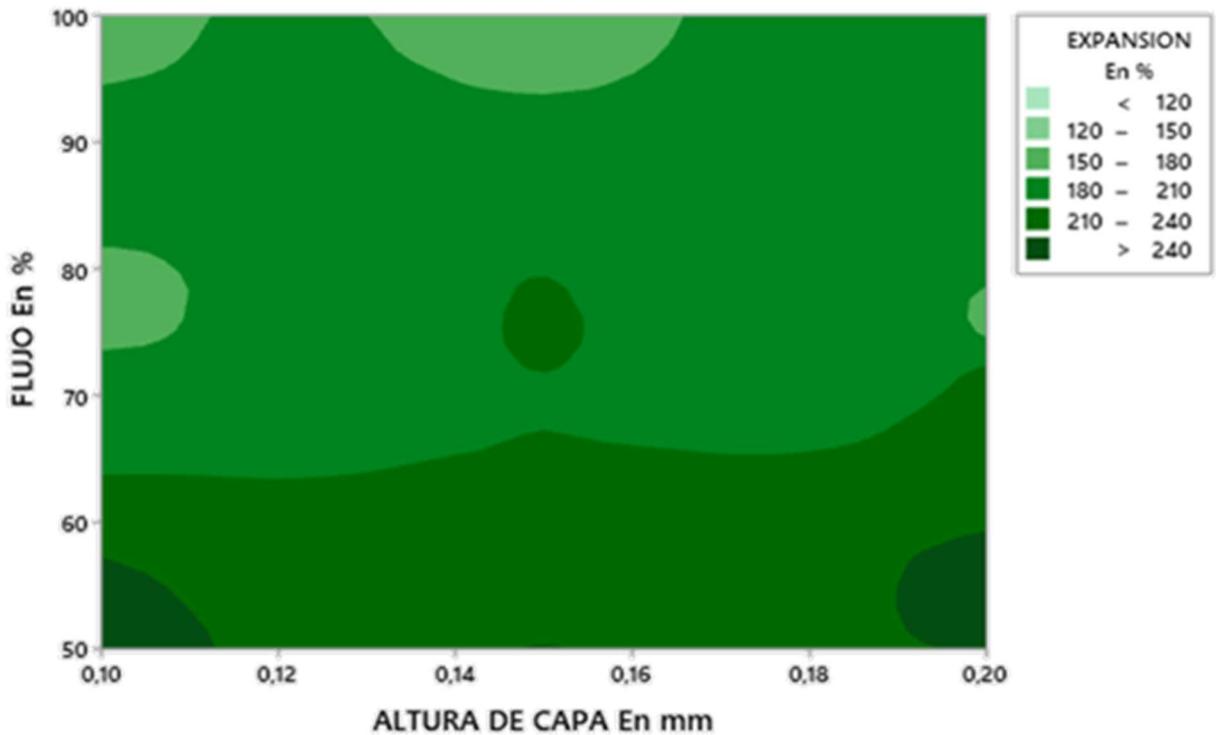


Figura Anexo VI- 18: Gráfica de contorno Φ (%) vs h (mm) frente a Exp (%) de la Fase 1 y 2 completa.

- ❖ Fase 3
 - Espesor

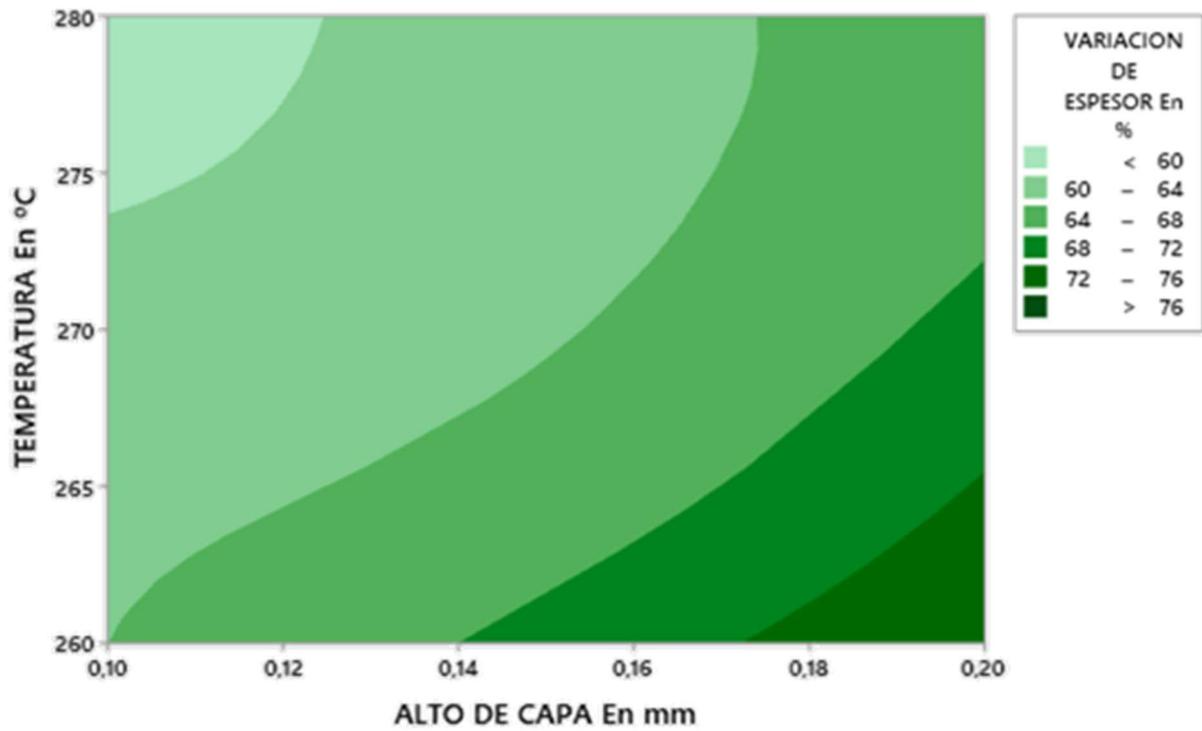


Figura Anexo VI- 19: Diagrama de contorno de h (mm) vs T (°C) frente a ΔV (%) Fase 3.

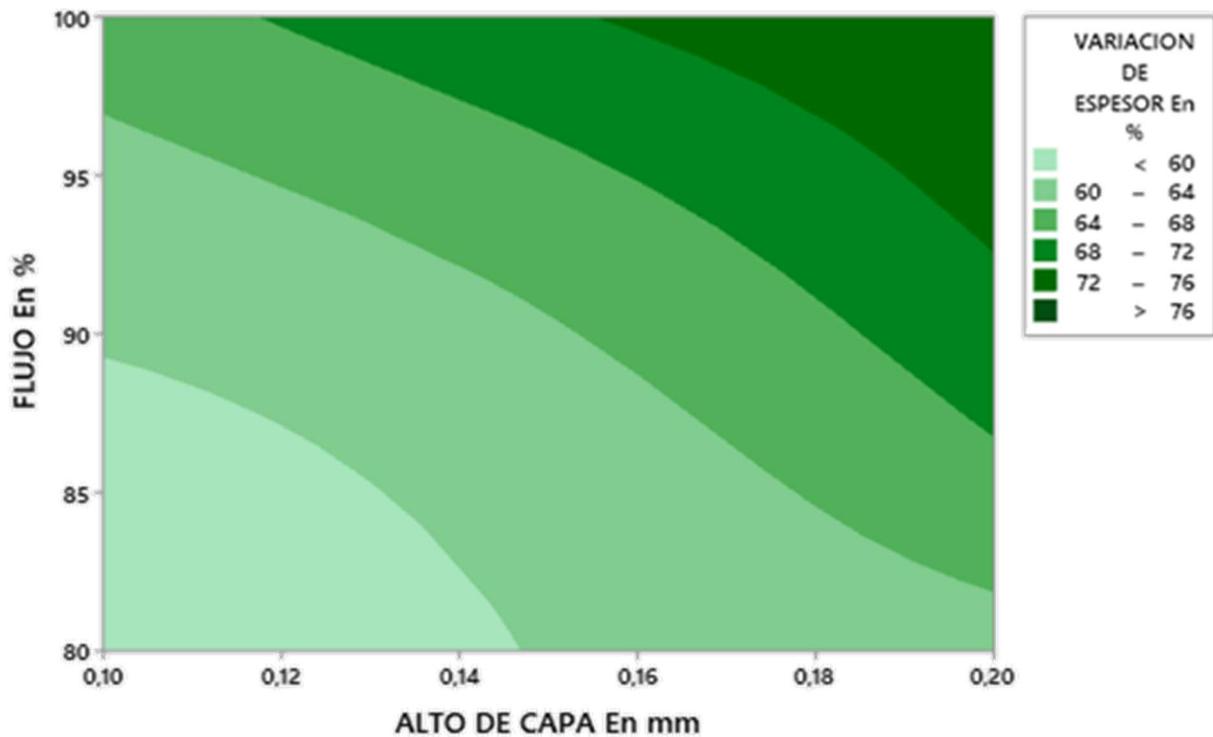


Figura Anexo VI- 20: Diagrama de contorno de h (mm) vs Φ (%) frente a ΔV (%) Fase 3.

➤ Expansión

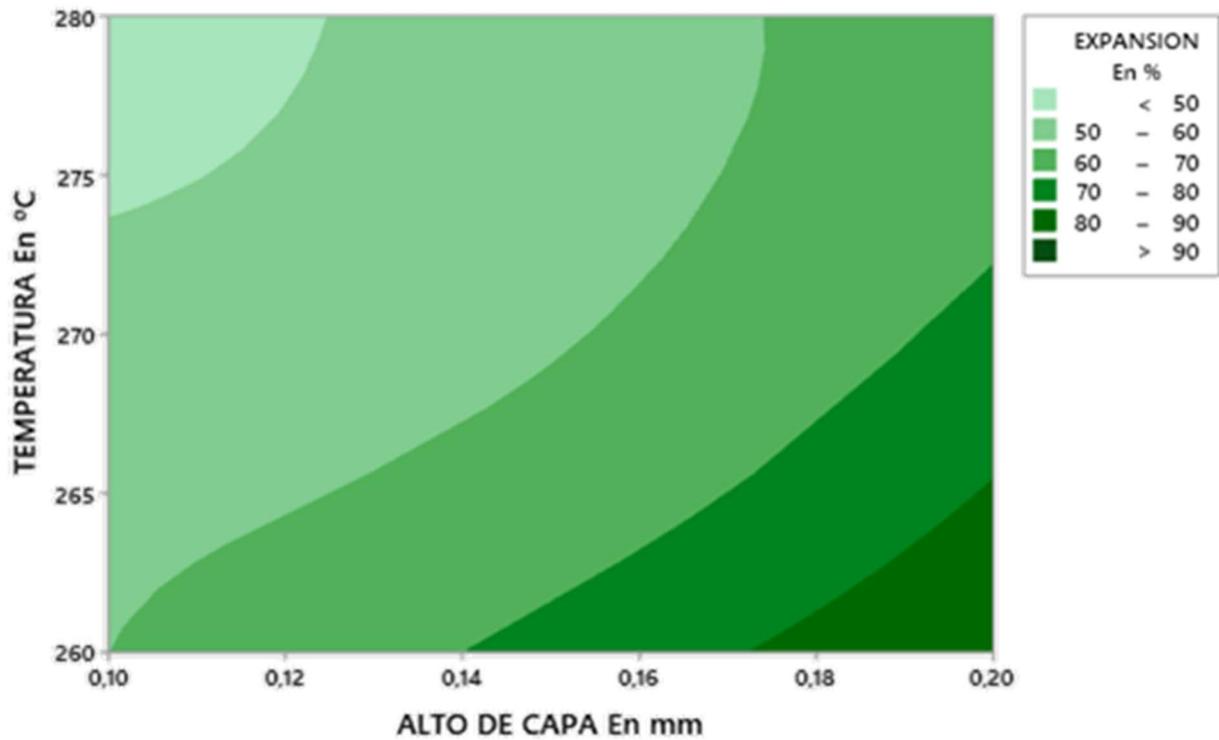


Figura Anexo VI- 21: Diagrama de contorno de h (mm) vs T (°C) frente a Exp (%) Fase 3.

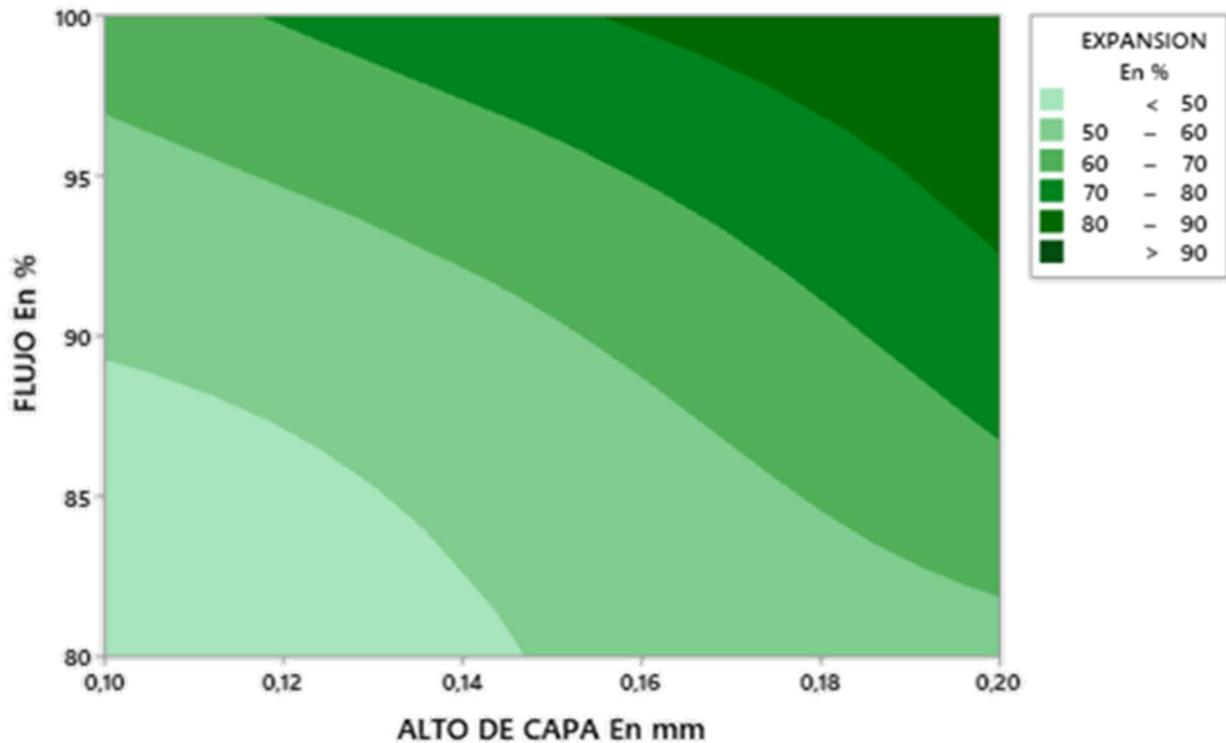


Figura Anexo VI- 22: Diagrama de contorno de h (mm) vs Φ (%) frente a Exp (%) Fase 3.

- ❖ Fase 1, 2 y 3
- Espesor

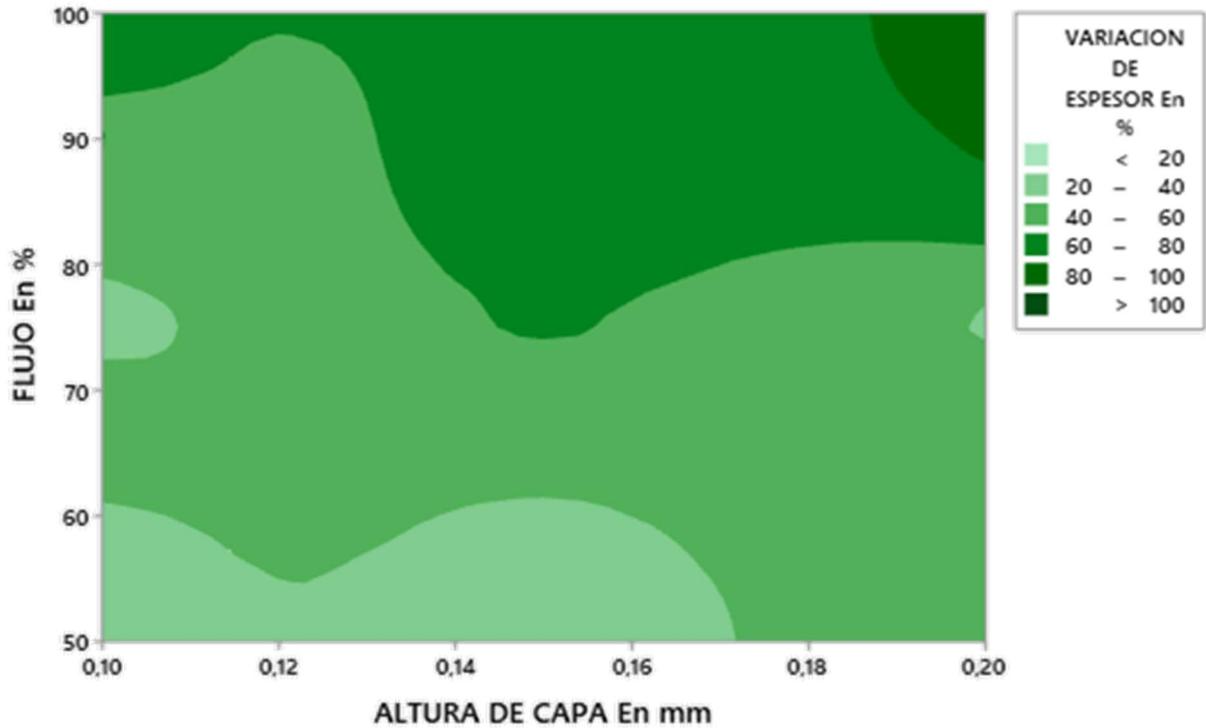


Figura Anexo VI- 23: Diagrama de contorno de h (mm) vs Φ (%) frente a ΔV (%) Fase 1,2 y 3.

- Expansión

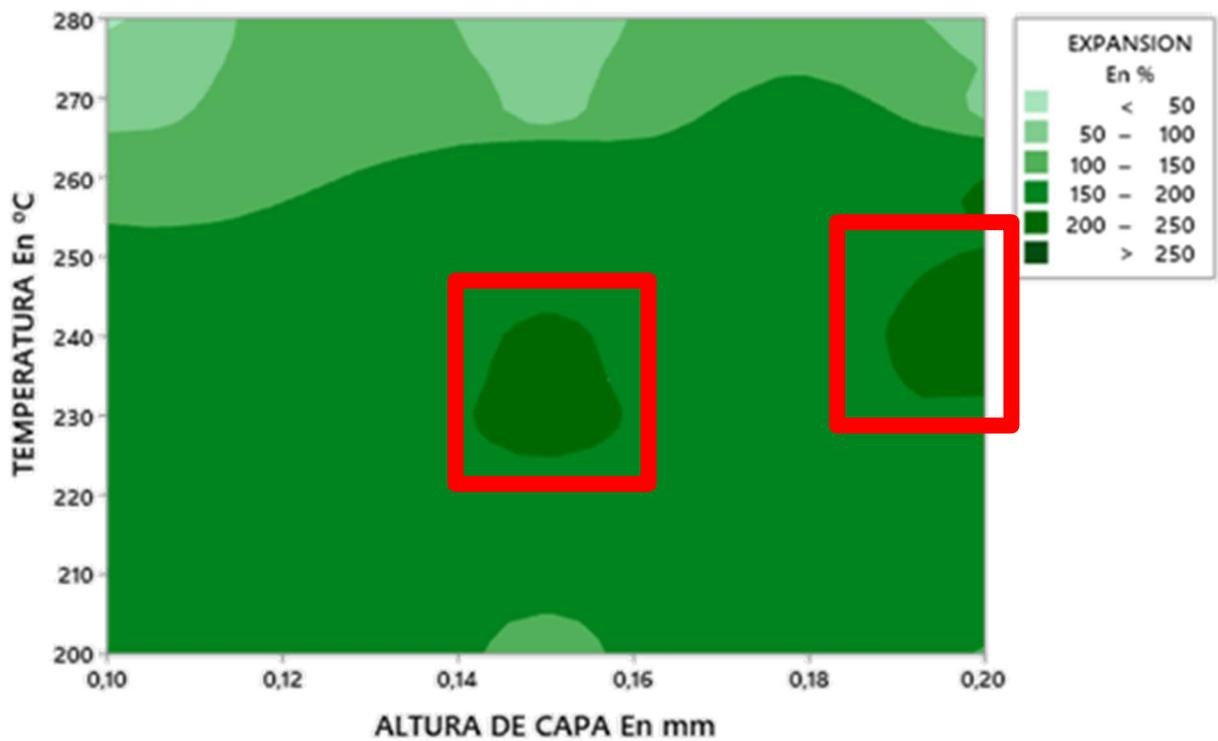


Figura Anexo VI- 24: Diagrama de contorno de h (mm) vs T (°C) frente a Exp (%) Fase 1,2 y 3.

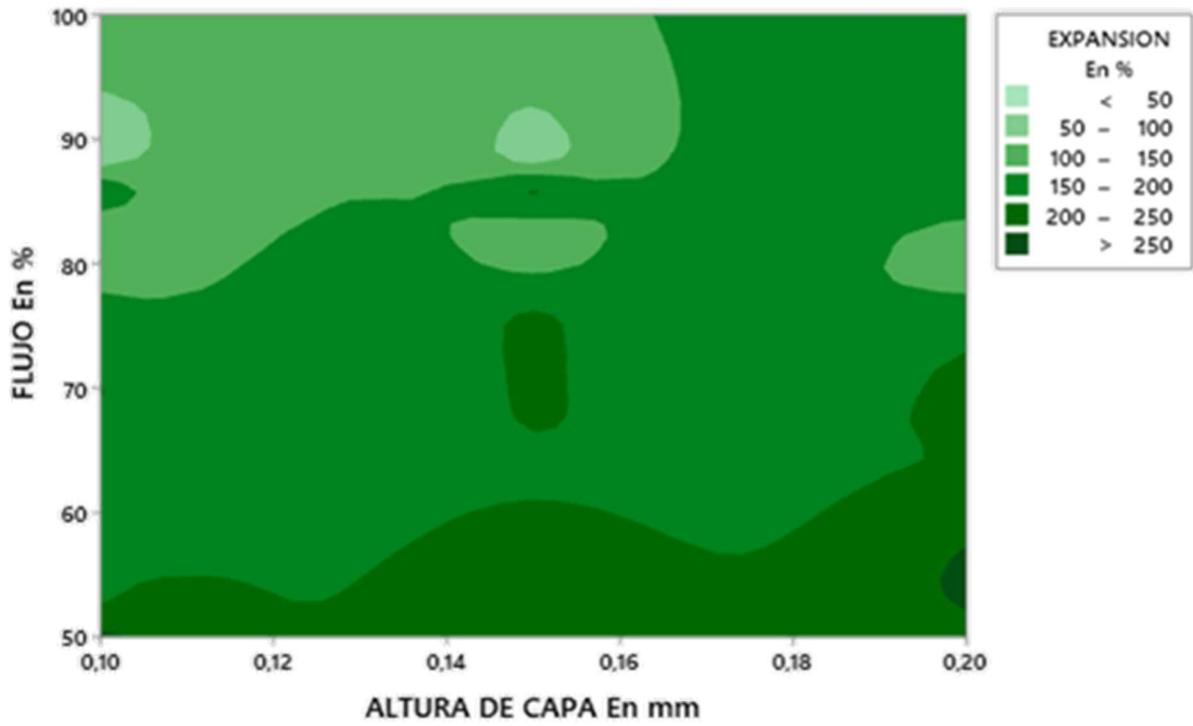


Figura Anexo VI- 25: Diagrama de contorno de h (mm) vs Φ (%) frente a Exp (%) Fase 1,2 y 3.

Anexo VII: Diagramas De Pareto

- ❖ Fase 1
 - Espesor

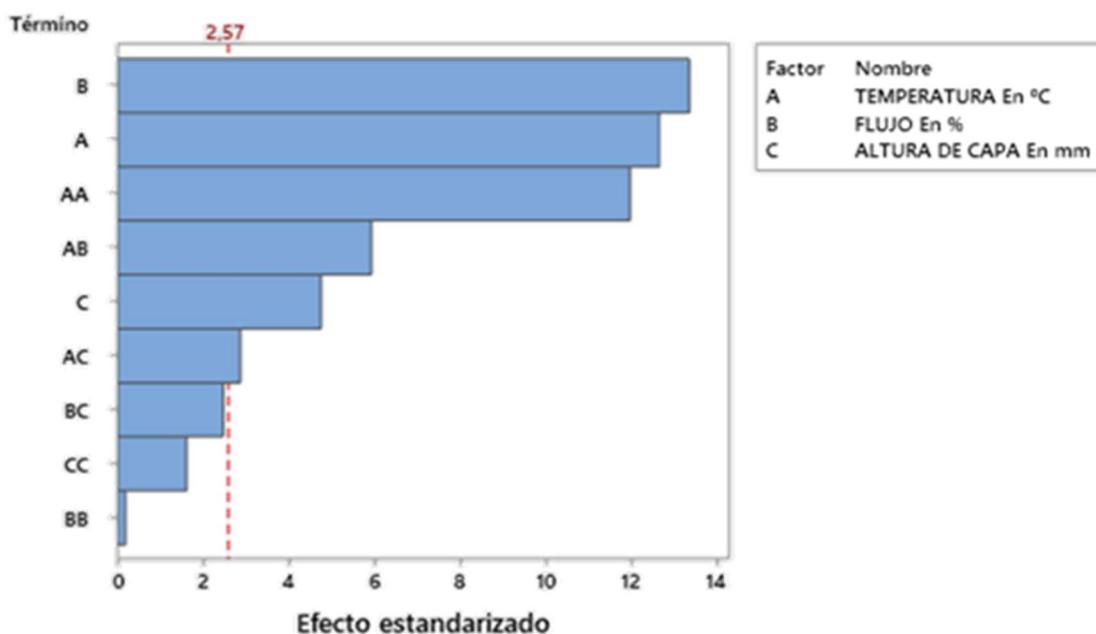


Figura Anexo VII- 1: Diagrama de Pareto de la Tabla Anexo V- 1.

- Expansión

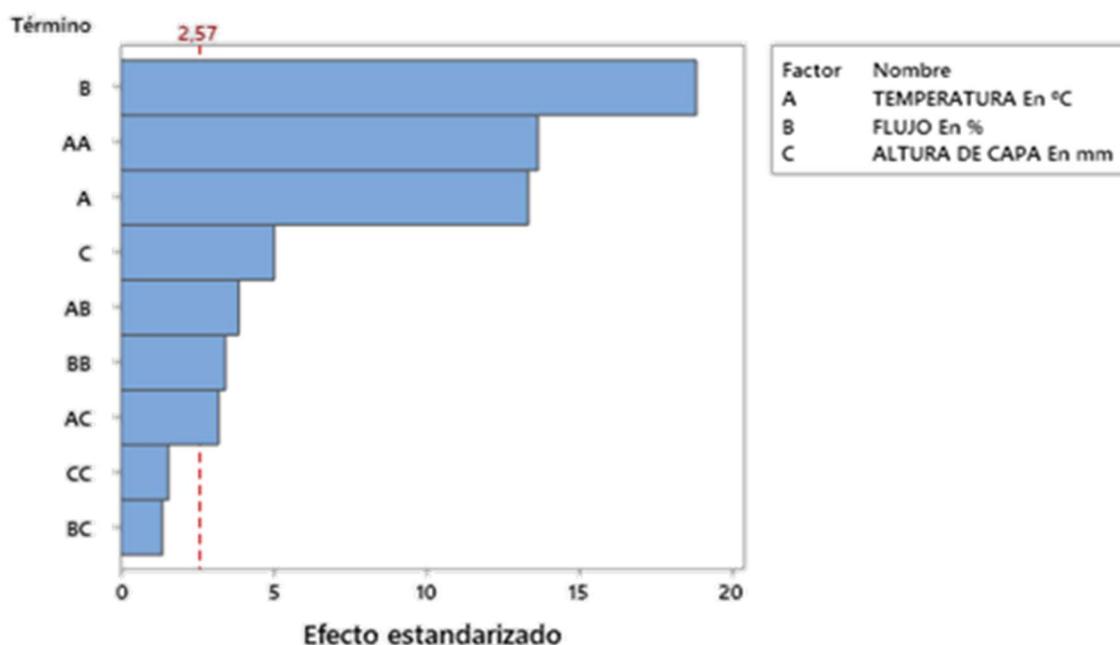


Figura Anexo VII- 2: Diagrama de Pareto de la Tabla Anexo V- 2.

❖ Optimización de la fase 1

➤ Espesor

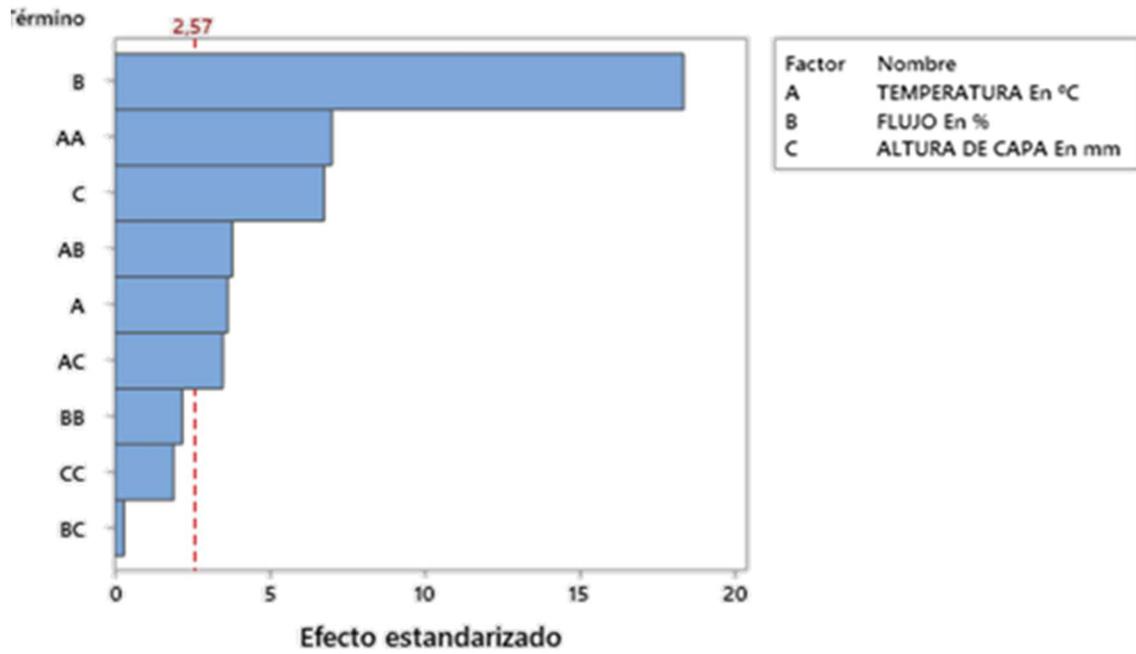


Figura Anexo VII- 3: Diagrama de Pareto de la Tabla Anexo V- 3.

➤ Expansión

15

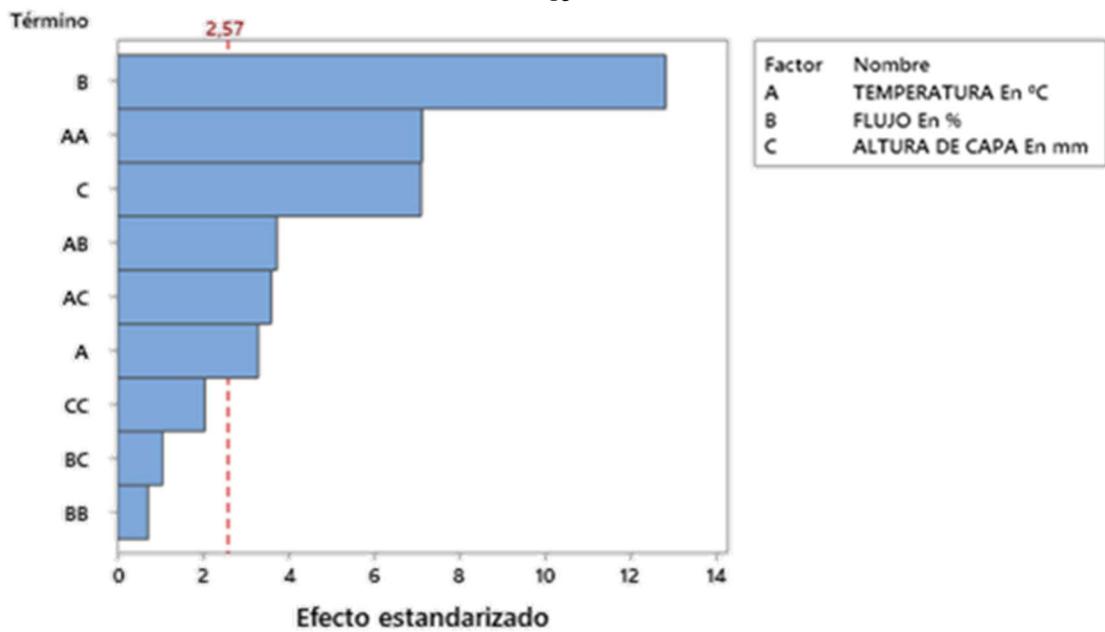


Figura Anexo VII- 4: Diagrama de Pareto de la Tabla 3 4.

- ❖ Total fase 1
 - Espesor

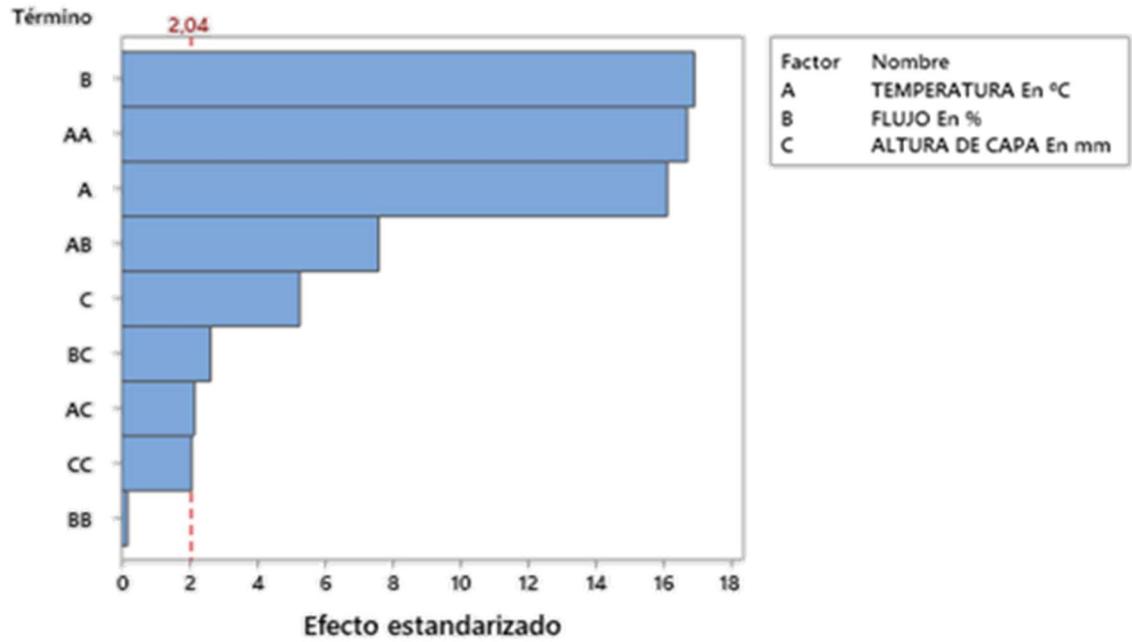


Figura Anexo VII- 5: Diagrama de Pareto para la ΔV total de la Fase 1.

- Expansión

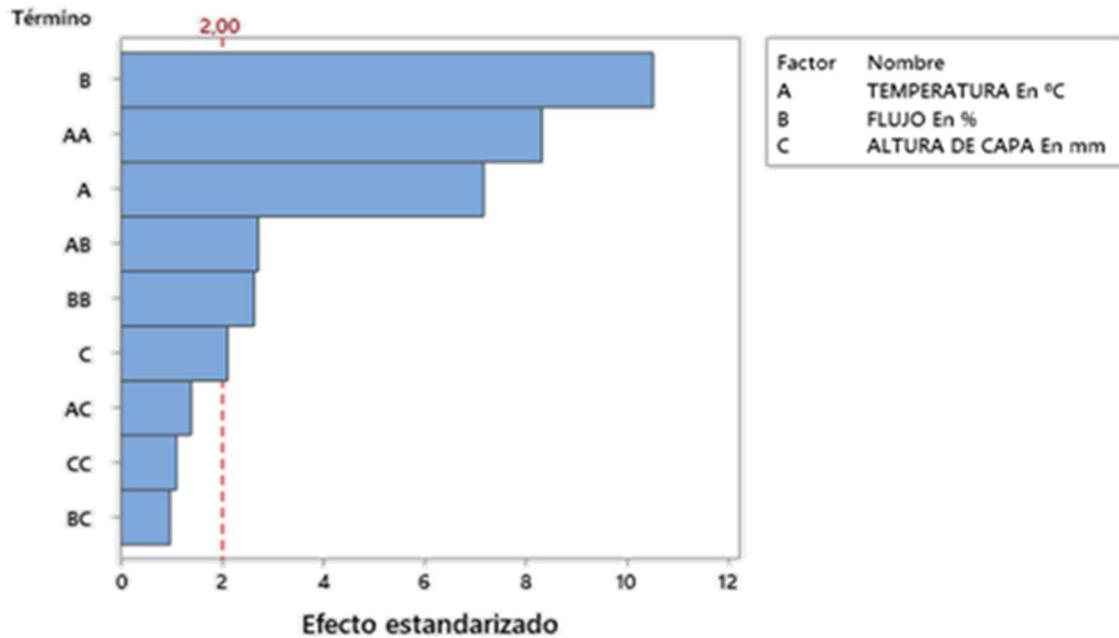


Figura Anexo VII- 6: Diagrama de Pareto para la Exp(%) del total de la Fase 1.

❖ Fase 1 y 2

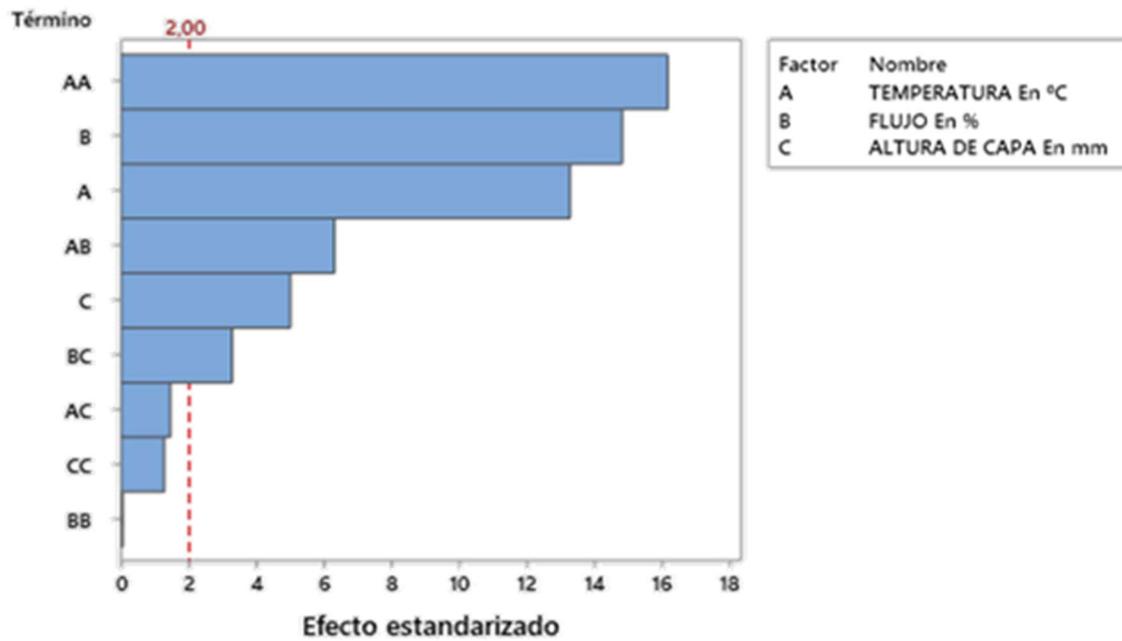


Figura Anexo VII- 7: Diagrama de Pareto de la Tabla Anexo V- 7.

➤ Expansión

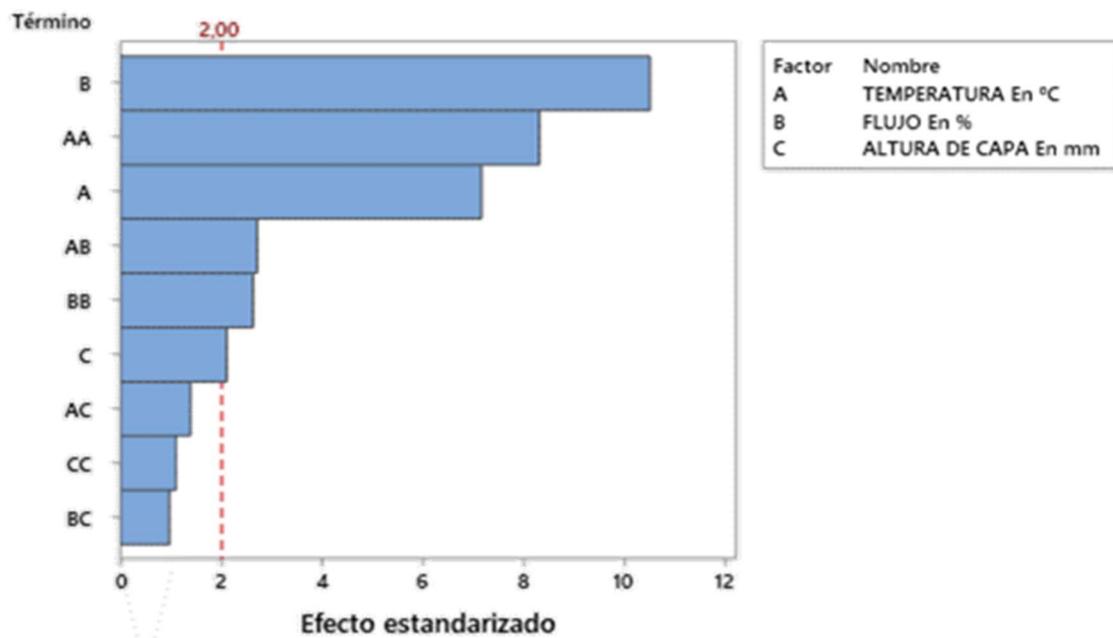


Figura Anexo VII- 8: Diagrama de Pareto de la Tabla Anexo V- 8.

- ❖ Fase 3
 - Espesor

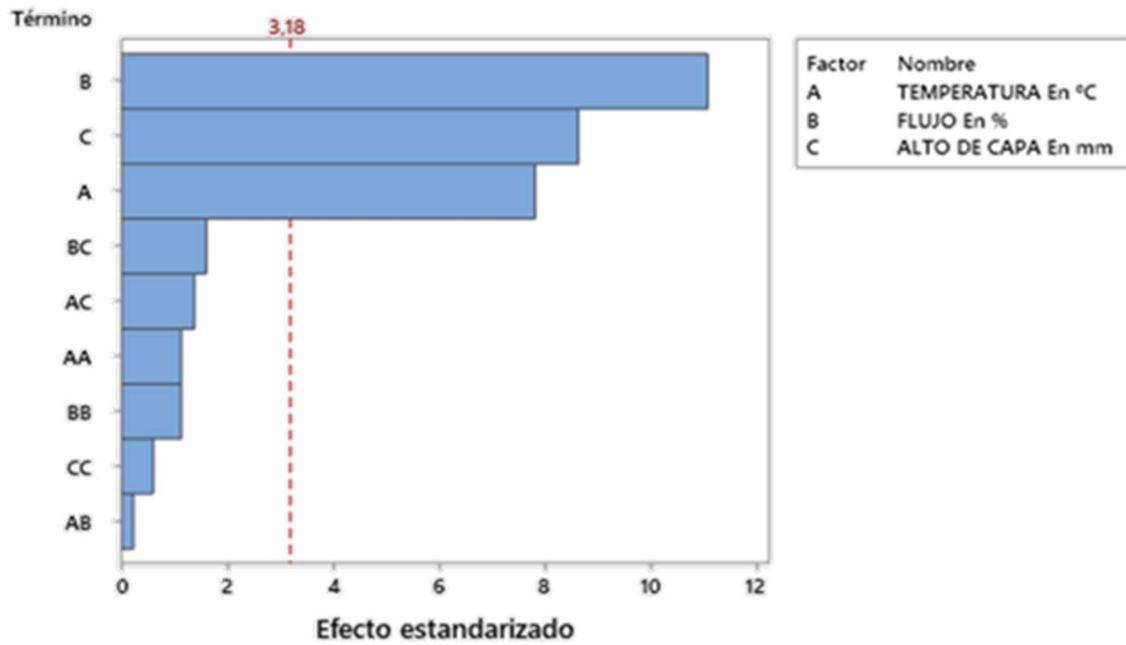


Figura Anexo VII- 9: Diagrama de Pareto de la Tabla Anexo V- 9.

- ❖ Fase 4
 - Región 2-1

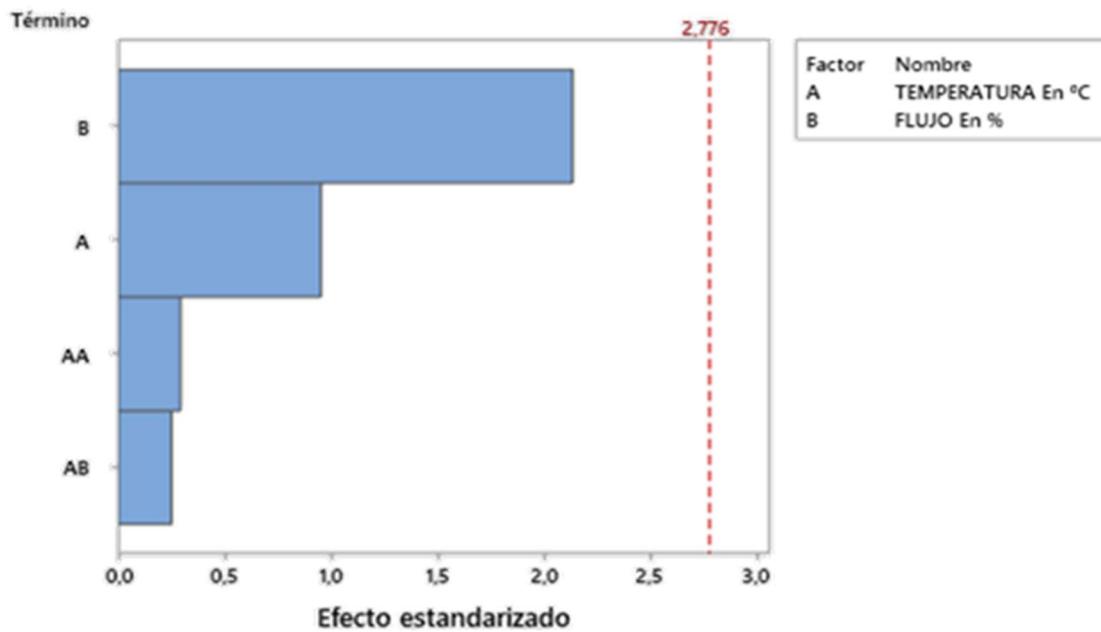


Figura Anexo VII- 10: Diagrama de Pareto para la Región 2-1.

➤ Región 2-2

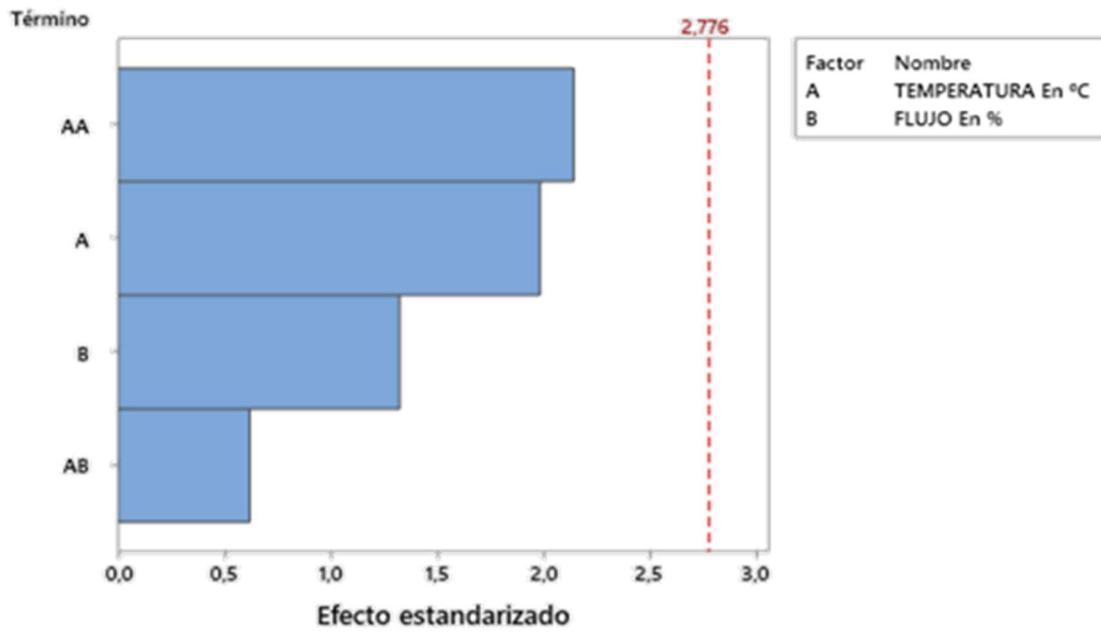


Figura Anexo VII- 11: Diagrama de Pareto para la Región 2-2.

➤ Región 2-3

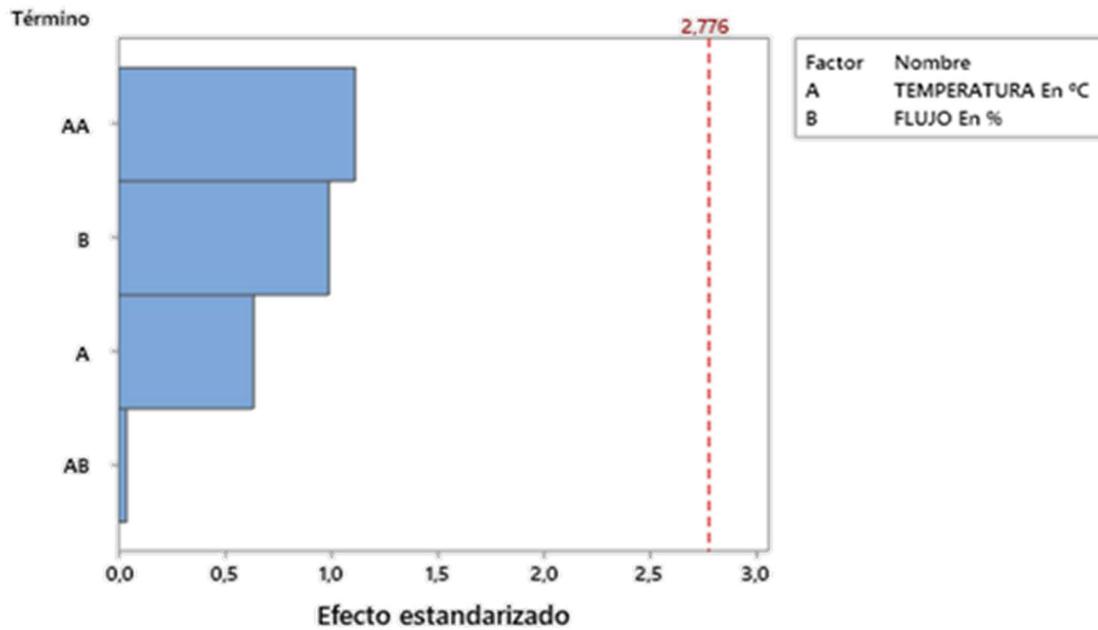


Figura Anexo VII- 12: Diagrama de Pareto para la Región 2-3.

➤ Total de la Fase 4

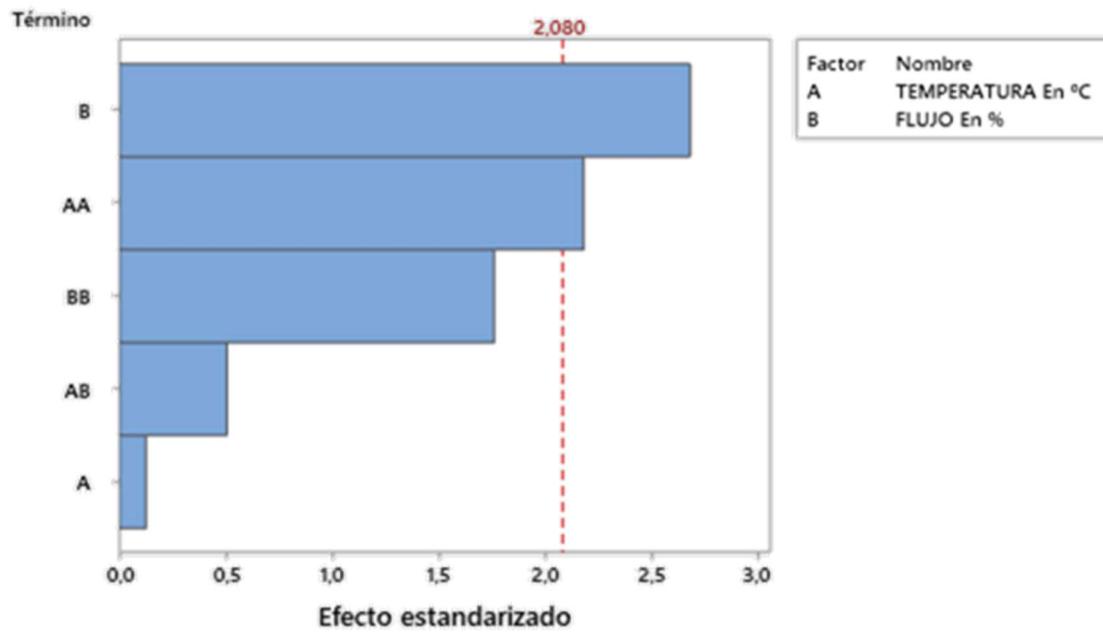


Figura Anexo VII- 13: Diagrama de Pareto para la Fase 4.

Anexo VIII: Ensayo De Tracción

Comenzando por el material, se dispone de una máquina de tracción marca Gunt modelo WP 300 cuyas características son [37]:

- Fuerza de comprobación: máx. 20kN.
- Carrera: máx. 44mm.
- Espacio libre para montaje de probetas: 165x65mm.

Y los rangos de medición:

- Em términos de fuerza su intervalo de trabajo es de 0 - 20kN con una precisión de 0,5kN.
- En longitudes pueden medirse de 0 a 20mm con una precisión de 0,01mm.

Esta máquina puede emplearse para realizar otros ensayos como de flexión, compresión, embutición y cizallamiento entre otros.

Para el montaje final ha hecho falta añadir un circuito que se compone de:

- Una resistencia de 10 k Ω .
- Cableado
- Una Raspberry pi
- Un FSR - LEANSTAR MD30-6

El código con el que se ha programado la transformación de los valores del voltaje obtenidos del divisor de tensión de la Figura 3-15 es el que sigue en la Figura Anexo VIII- 1.

[main.py] * ×

```
1 from machine import ADC, Pin
2 from utime import sleep
3
4 port = ADC(26)
5 vcc = 3.3
6 r = 30050
7 conversion_factor = vcc/65535
8
9 while True:
10     raw = port.read_u16()
11     vo = raw*conversion_factor
12     fsr = int(r*(vcc/vo - 1))
13     print('{}','.format(raw), '{:.2f}','.format(vo), '{}'.format(fsr))
14     sleep(1)
```

Figura Anexo VIII- 1: Código de la Raspberry pi

El programa empleado para ejecutar y permitir la lectura de los valores obtenidos es el Thonny, un entorno de desarrollo integrado para Python. [38]

Pasando a definir el elemento más importante de este ensayo de tracción. El FDR en este caso es el modelo LEANSTAR MD30-6. Se trata de una resistencia variable en función de la presión que se ejerce sobre ella.

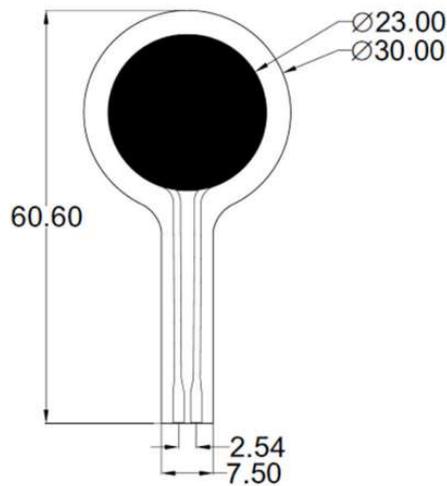


Figura Anexo VIII- 2: Dimensiones del sensor FDR. [30]

En un principio el fabricante asegura que la conversión se puede realizar con un divisor de tensión como el usado en el desarrollo y que con la gráfica normalizada para divisores de tensión de 30 K Ω [30] resulta la Ecuación Anexo VIII 1.

$$y = 1690,9FSR_n^{-1,21}$$

Ecuación Anexo VIII 1: Caracterización de la curva de conversión de K Ω a N.

Siendo:

FSR_n : el valor de la resistencia variable para cada instante en K Ω .

y : el valor de la fuerza ejercida en N.



Figura Anexo VIII- 3: Montaje final con el sensor de presión.

Esta Ecuación Anexo VIII 1 no fue válida por lo que hubo que realizar la calibración explicada en el desarrollo de la memoria. Quedando según la Figura Anexo VIII- 3.

Anexo IX: Ecuaciones Obtenidas

En este Anexo se adjuntarán aquellas ecuaciones que definen las diferentes variables de respuesta, ya sea EXPANSION, VARIACION DE ESPESOR o DUREZA, en las distintas Fases de laboratorio.

Como a lo largo de la memoria se van a realizar las siguientes simplificaciones:

$$VARIACION DE ESPESOR \text{ En } \% = \Delta V$$

$$TEMPERATURA \text{ En } ^\circ C = T$$

$$ALTURA DE CAPA \text{ En } mm = A. C.$$

$$FLUJO \text{ En } \% = \Phi$$

❖ Fase 1

➤ Espesor

$$\begin{aligned} \Delta V = & -1219 + 12,01 * T - 4,20 * \Phi - 719 * A. C. - 0,02917 * T * T \\ & + 0,00082 * \Phi * \Phi - 1417 * A. C. * A. C. + 0,01852 * T * \Phi + 4,03 \\ & * T * A. C. + 4,63 * \Phi * A. C. \end{aligned}$$

Ecuación Anexo IX 1: Regresión de ΔV (%) para la Fase 1.

➤ Expansión

$$\begin{aligned} EXPANSION = & -1388 + 16,64 T - 7,78 \Phi - 781 A. C. - 0,03856 T * T + 0,01727 \Phi * \Phi \\ & - 1594 A. C. * A. C. + 0,01397 T * \Phi + 5,23 T * A. C. + 2,96 \Phi * A. C. \end{aligned}$$

Ecuación Anexo IX 2: Regresión de la variación de la Exp (%) para la Fase 1.

❖ Optimización de la fase 1

➤ Espesor

$$\begin{aligned} \Delta V = & -1477 + 11,42 T - 0,53 \Phi + 1653 A. C. - 0,02500 T * T - 0,01389 \Phi * \Phi \\ & - 1083 A. C. * A. C. + 0,01736 T * \Phi - 4,79 T * A. C. - 0,56 \Phi * A. C. \end{aligned}$$

Ecuación Anexo IX 3: Regresión de ΔV (%) para la Optimización Fase 1

➤ Expansión

EXPANSION En %

$$\begin{aligned} = & -1354 + 13,31 * T - 4,39 * \Phi + 2100 * A. C. - 0,02903 * T * T - 0,00521 \\ & * \Phi * \Phi - 1335 * A. C. * A. C. + 0,01944 * T * \Phi - 5,64 * T * A. C. - 2,22 * \Phi \\ & * A. C. \end{aligned}$$

Ecuación Anexo IX 4: Regresión de la Exp (%) para la Optimización Fase 1.

❖ Total fase 1

➤ Espesor

$$\Delta V = -1312 + 12,349 T - 3,699 \Phi - 266 A.C. - 0,02915 T * T - 0,00052 \Phi * \Phi - 1233 ALTURA DE CAPA En mm * A.C. + 0,01804 T * \Phi + 2,085 T * A.C. + 3,57 \Phi * A.C.$$

Ecuación Anexo IX 5: Regresión de la ΔV (%) para el Total de la Fase 1.

➤ Expansión

EXPANSION En %

$$= -1404 + 16,66 TEMPERATURA En °C - 8,425 \Phi - 276 A.C. - 0,03797 T * T + 0,01960 \Phi * \Phi - 1733 A.C.* A.C. + 0,01499 T * \Phi + 2,94 T * A.C. + 3,30 \Phi * A.C.$$

Ecuación Anexo IX 6: Regresión de la Exp (%) para el Total de la Fase 1.

❖ Fase 2

➤ Región 1-1

VARIACION DE ESPESOR

$$= -11879 + 126 T - 92,7 \Phi - 0,299 T * T + 0,110 \Phi * \Phi + 0,287 T * \Phi$$

Ecuación Anexo IX 7: Regresión de la Región 1-1.

➤ Región 1-2

$$\Delta V = 1834 + 4,2 T - 4997 \Phi - 0,0324 T * T + 1333 \Phi * \Phi + 11,62 T * \Phi$$

Ecuación Anexo IX 8: Regresión de la Región 1-2.

➤ Región 1-3

$$\Delta V = -11383 + 104,2 T - 21,6 \Phi - 0,2311 T * T + 0,035 \Phi * \Phi + 0,0666 T * \Phi$$

Ecuación Anexo IX 9: Regresión de la Región 1-3.

❖ Fase 1 y 2

➤ Espesor

$$\Delta V = -1434 + 13,464 T - 3,793 \Phi - 327 A.C. - 0,03127 T * T + 0,00020 \Phi * \Phi - 899 A.C.* A.C. + 0,01726 T * \Phi + 1,54 T * A.C. + 4,91 \Phi * A.C.$$

Ecuación Anexo IX 10: Regresión de la Fase 1 y 2 completa.

➤ Expansión

EXPANSION En %

$$= -1314 + 16,18 T - 9,16 \Phi - 379 A.C. - 0,03747 T * T + 0,02079 \Phi * \Phi - 1812 A.C.* A.C. + 0,01731 T * \Phi + 3,44 T * A.C. + 3,39 \Phi * A.C.$$

Ecuación Anexo IX 11: Regresión para la EXP (%) para las Fase 1 y 2

❖ Fase 3

➤ Espesor

$$\Delta V = 900 - 5,80 T - 1,28 \Phi + 348 A.C. + 0,01083 T * T + 0,01083 \Phi * \Phi + 233 A.C.* A.C. - 0,00167 T * \Phi - 2,00 T * A.C. + 2,33 \Phi * A.C.$$

Ecuación Anexo IX 12: Regresión de ΔV (%) para la Fase 3.

❖ Fase 1, 2 y 3

➤ Espesor

$$\Delta V = -1289 + 11,440 T - 2,283 \Phi - 33 A.C. - 0,02534 T * T - 0,00431 \Phi * \Phi \\ - 332 A.C.* A.C. + 0,01325 T * \Phi - 0,80 T * A.C. + 5,80 \Phi * A.C.$$

Ecuación Anexo IX 13: Regresión de ΔV (%) para la Fases 1, 2 y 3.

➤ Expansión

EXPANSION En %

$$= -2348 + 27,04 T - 8,92 \Phi - 2287 A.C. - 0,06410 T * T + 0,0308 \Phi * \Phi \\ - 624 A.C.* A.C. + 0,0114 T * \Phi + 11,31 T * A.C. + 0,25 \Phi * A.C.$$

Ecuación Anexo IX 14: Regresión de la Exp (%) para las Fases 1, 2 y 3.