



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Curso Académico:



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

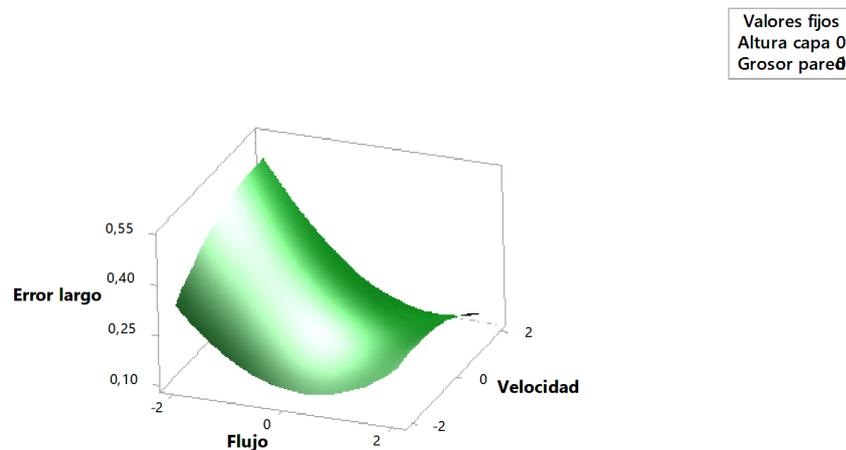


UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TÍTULO:

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA APLICADA A LA IMPRESIÓN 3D USANDO FDM

Gráfica de superficie de Error largo vs. Velocidad; Flujo



AUTOR: FRANCESC XAVIER MOLERO BOLTES

TUTOR: JUAN CARLOS GARCÍA DIAZ

MÁSTER UNIVERSITARIO INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR ENGINYERIA
INDUSTRIAL VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ÍNDICE

1.	AGRADECIMIENTOS.....	14
2.	Nota sobre el contenido y la estructura del documento	16
3.	RESUMEN	18
4.	RESUM.....	18
5.	ABSTRACT.....	18
6.	CONTEXTO DEL DOCUMENTO.....	20
7.	MOTIVACIÓN.....	21
8.	OBJETIVO.....	21
9.	Marco teórico.....	22
9.1.	La impresión 3D.....	22
9.1.1.	SLA o estereolitografía	22
9.1.2.	Selective Laser Melting (SLM)	23
9.1.3.	Modelado por deposición fundida (FDM).....	23
9.1.4.	Fabricación de piezas mediante FDM	25
9.2.	Diseño de experimentos	27
9.3.	Los errores dimensionales.	28
10.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
10.1.	Materiales	29
10.1.1.	El calibre	29
10.1.2.	Péndulo de Charpi	29
10.1.3.	Rugosímetro	29
10.1.4.	Báscula.....	30
10.1.5.	El software.....	30
10.1.6.	La probeta	30
10.1.7.	Impresora Anet A8	30
10.2.	Métodos	31
10.2.1.	Mediciones y recogida de datos.....	31
10.2.2.	Pasos a realizar para obtener la relación factores-respuestas	32
10.2.1.	Diseño de experimentos (Design of experiments-DOE) para etapa de screening 32	
10.2.2.	Análisis de la varianza (ANOVA)	34



10.2.3.	Media e intervalo de la media prevista.....	35
10.2.4.	Contribución relativa de un factor	35
10.2.5.	Metodología superficie de respuesta (MSR).....	35
10.2.6.	Optimización multiobjetivo.....	41
10.2.7.	Estudio preliminar de los errores dimensionales.....	42
11.	RESULTADOS	43
11.1.	Prueba de normalidad de los datos	43
11.1.1.	Error dimensional largo.....	43
11.1.2.	Error dimensional ancho	44
11.1.3.	Error dimensional alto.....	46
11.1.4.	Resiliencia.....	47
11.1.5.	Rugosidad media	49
11.1.6.	Tiempo de impresión	51
11.1.7.	Peso (metros de hilo usado).....	53
11.1.8.	Resumen de la normalidad en los datos	54
11.2.	Diferencias entre errores dimensionales	55
11.3.	Información análisis de cribado sin centros.....	56
11.3.1.	Efectos significativos para error dimensional largo	56
11.3.2.	Efectos significativos para log (error dimensional ancho)	59
11.3.3.	Efectos significativos para error dimensional alto	62
11.3.4.	Efectos significativos para LOG(Resiliencia).....	68
11.3.5.	Efectos significativos log(rugosidad media)	73
11.3.6.	Efectos significativos LOG (tiempo de impresión)	78
11.3.7.	Efectos significativos Peso.....	85
11.4.	Información análisis de cribado con centros	92
11.4.1.	Error dimensional largo.....	92
11.4.2.	Log(Error dimensional ancho)	93
11.4.3.	Error dimensional alto.....	94
11.4.4.	Log(Resiliencia).....	95
11.4.5.	Log (rugosidad media).....	96
11.4.6.	Log(tiempo de impresión)	97
11.4.7.	Peso	98
11.5.	Diseño de experimentos mediante la técnica de superficie de respuesta	99
11.5.1.	Superficie de respuesta para error dimensional largo.....	99
11.5.2.	Superficie de respuesta para log(error dimensional ancho).....	102
11.5.3.	Superficie de respuesta para error dimensional alto.....	105



11.5.4.	Superficie de respuesta para Resiliencia.....	108
11.5.5.	Superficie de respuesta para rugosidad.....	112
11.5.6.	Superficie de respuesta para tiempo de impresión	115
11.5.7.	Superficie de respuesta para peso	118
11.6.	Comparación de modelos predictivos.....	120
11.7.	Función de deseabilidad.....	120
11.7.1.	Optimización de respuesta individual: Error alto.....	121
11.7.2.	Optimización de respuesta individual: Error ancho	122
11.7.3.	Optimización de respuesta individual: Error largo.....	122
11.7.4.	Optimización de respuesta individual: Rugosidad	123
11.7.5.	Optimización de respuesta individual: Resiliencia	124
11.7.1.	Optimización de respuesta individual: peso	125
11.7.1.	Optimización de respuesta individual: tiempo de impresión.	125
11.8.	Comparación de resultados de las probetas ensayadas vs las predicciones en optimización simple.	126
11.8.1.	Caso 1: Optimización simultanea de errores ancho, largo y rugosidad.	126
11.8.2.	Caso 2: Optimización simultanea de resiliencia, tiempo de impresión y peso.	128
12.	CONCLUSIONES	130
13.	Líneas futuras	131
14.	Opinión personal	132
15.	PRESUPUESTO	132
16.	PLANOS.....	134
17.	Referencias.....	135

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	Media prevista	35
Ecuación 2	Intervalo confianza.....	35
Ecuación 3	Contribución relativa	35
Ecuación 4	α ortogonal	37
Ecuación 5	Condición para α rotable y ortogonal.....	37
Ecuación 6	Cálculo n_0	37
Ecuación 7	Ecuación matricial	40
Ecuación 8	Términos ecuación matricial.....	40
Ecuación 9	Ecuación para encontrar punto óptimo.....	40
Ecuación 10	Vector de puntos óptimos	40
Ecuación 11	Ecuación de deseabilidad individual	41
Ecuación 12	Deseabilidad general.....	42



Ecuación 13 Error absoluto	42
Ecuación 14 Error relativo	42

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Estereolitografía	23
Ilustración 2 SLM	23
Ilustración 3 FDM	24
Ilustración 4 Anet A8.....	24
Ilustración 5 Captura del software Cura	25
Ilustración 6 Captura de opciones recomendadas del cura	26
Ilustración 7 Captura de opciones personalizadas del Cura	26
Ilustración 8 Péndulo de Charpi	29
Ilustración 9 Rugosímetro	29
Ilustración 10 Báscula.....	30
Ilustración 11 Mediciones de dimensiones.....	31
Ilustración 12 Mejor tratamiento y óptimo [6].....	36
Ilustración 13 Diseño composición central [6].....	36
Ilustración 14 di en función de s, t	41

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Prob.normal error largo.....	43
Gráfico 2 Prob.normal error ancho	44
Gráfico 3 Prob.normal log(error ancho).....	45
Gráfico 4 Prob.normal error alto	46
Gráfico 5 Prob.normal resiliencia.....	47
Gráfico 6 Prob.normal resiliencia.....	48
Gráfico 7 Prob.normal Ra	49
Gráfico 8 Prob.normal Log(Ra).....	50
Gráfico 9 Prob.normal tiempo de impresión	51
Gráfico 10 Prob.normal log(tiempo impresión).....	52
Gráfico 11 Prob.normal peso	53
Gráfico 12 Intervalos LSD e.largo-e.ancho-e.alto	55
Gráfico 13 Pareto para e.largo	57
Gráfico 14 Intervalos LSD para resiliencia/grosor pared	58
Gráfico 15 Intervalos LSD para resiliencia/velocidad.....	58
Gráfico 16 Pareto para log(e.ancho)	60
Gráfico 17 Intervalos LSD para Log(e.ancho)/ altura capa.....	61
Gráfico 18 Intervalos LSD para Log(e.ancho)/ flujo	61
Gráfico 19 Intervalos LSD para Log(e.ancho)/ velocidad	62
Gráfico 20 Interacciones Log(e.ancho)/ altura capa y grosor pared.....	62



Gráfico 21 Pareto para error alto	64
Gráfico 22 Intervalos LSD para error alto/altura capa	65
Gráfico 23 Intervalos LSD para error alto/ grosor pared	65
Gráfico 24 Intervalos LSD para error alto/flujo	66
Gráfico 25 Intervalos LSD para error alto/ velocidad	66
Gráfico 26 Interacciones e.alto/altura capa/densidad relleno	67
Gráfico 27 Interacciones e.alto/flujo/velocidad	67
Gráfico 28 Pareto log(resiliencia)	70
Gráfico 29 Intervalos LSD log(resiliencia)/grosor pared	71
Gráfico 30 Intervalos LSD log(resiliencia)/velocidad	71
Gráfico 31 interacciones log(resiliencia)/grosor pared/flujo	72
Gráfico 32 interacciones log(resiliencia)/grosor pared/velocidad	72
Gráfico 33 interacciones log(resiliencia)/flujo/velocidad	73
Gráfico 34 Pareto para Ra	75
Gráfico 35 Intervalo LSD para Log(ra)/altura capa	76
Gráfico 36 Intervalo LSD para Log(ra)/Grosor pared	76
Gráfico 37 Intervalo LSD para Log(ra)/velocidad	77
Gráfico 38 Interacciones para log(Ra)/altura capa/flujo	77
Gráfico 39 Pareto para log(t.impresión)	80
Gráfico 40 Intervalo LSD para Log(t.impresión)/altura capa	81
Gráfico 41 Intervalo LSD para Log(t.impresión)/grosor pared	81
Gráfico 42 Intervalo LSD para Log(t.impresión)/densidad relleno	82
Gráfico 43 Intervalo LSD para Log(t.impresión)/velocidad	82
Gráfico 44 interacciones log(t.impresión)/velocidad/altura capa	83
Gráfico 45 interacciones log(t.impresión)/grosor pared/densidad relleno	83
Gráfico 46 interacciones log(t.impresión)/velocidad/grosor pared	84
Gráfico 47 interacciones log(t.impresión)/densidad relleno/velocidad	84
Gráfico 48 Pareto para peso	86
Gráfico 49 Intervalos LSD para peso/altura capa	87
Gráfico 50 Intervalos LSD para peso/grosor pared	87
Gráfico 51 Intervalos LSD para peso/flujo	88
Gráfico 52 Intervalos LSD para peso/densidad relleno	88
Gráfico 53 Interacciones peso/altura capa/grosor pared	89
Gráfico 54 Interacciones peso/densidad relleno/altura capa	89
Gráfico 55 Interacciones peso/altura capa/flujo	90
Gráfico 56 Interacciones peso/densidad relleno/grosor pared	90
Gráfico 57 Interacciones peso/grosor pared/flujo	91
Gráfico 58 Interacciones peso/flujo/densidad relleno	91
Gráfico 59 Efectos principales error largo	92
Gráfico 60 Efectos principales con centros error largo	93
Gráfico 61 Efectos principales log(e.ancho)	93
Gráfico 62 Efectos principales e.alto	94
Gráfico 63 Efectos principales con centros e.alto	94
Gráfico 64 Efectos principales log(resiliencia)	95
Gráfico 65 Efectos principales con centros log(resiliencia)	95
Gráfico 66 Efectos principales log(Ra)	96
Gráfico 67 Efectos principales con centros log(Ra)	96
Gráfico 68 Efectos principales t.impresión	97



Gráfico 69 Efectos principales con centros t.impresión.....	97
Gráfico 70 Efectos principales sin centros peso.....	98
Gráfico 71Efectos principales con centros peso	98
Gráfico 72 normalidad de los datos para error dimensional largo	99
Gráfico 73Efectos principales error largo.....	100
Gráfico 74 Pareto e.largo	100
Gráfico 75 Superficie respuesta e.largo	102
Gráfico 76 Análisis de la normalidad de los datos de log(error dimensional ancho)	102
Gráfico 77Efectos principales error ancho.....	103
Gráfico 78 Pareto log(e.ancho)	104
Gráfico 79 Superficie respuesta log(e.ancho)	105
Gráfico 80 5.5.3.1. Análisis de la normalidad de los datos de error dimensional alto	105
Gráfico 81Efectos principales error alto	106
Gráfico 82 Pareto e.alto	107
Gráfico 83 Superficie respuesta e.alto	108
Gráfico 84 normalidad de los datos de la variable resiliencia	109
Gráfico 85Efectos principales resiliencia.....	110
Gráfico 86 Superficies de respuesta para Resiliencia.....	111
Gráfico 87 Análisis de la normalidad de los datos de rugosidad	112
Gráfico 88Efectos principales rugosidad.....	113
Gráfico 89Pareto e.alto	113
Gráfico 90Superficie de respuesta para rugosidad	114
Gráfico 91 Análisis de la normalidad de los datos de tiempo de impresión.....	115
Gráfico 92 Análisis de la normalidad de los datos de tiempo de impresión.....	115
Gráfico 93 Pareto ln(t.impresión)	116
Gráfico 94 Superficie de respuesta para tiempo de impresión	117
Gráfico 95 Análisis normalidad peso.....	118
Gráfico 96Efectos significativos peso.....	119
Gráfico 97 Superficie respuesta peso.....	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Niveles para el screening.....	32
Tabla 2 Tabla experimentos para screening	34
Tabla 3 Cálculo grados libertad	34
Tabla 4 Diseño experimentos 3 variables DCC.....	38
Tabla 5 Diseño experimentos 4 variables DCC.....	38
Tabla 6 Niveles seleccionados para el DCC	39
Tabla 7 Resumen Estadístico para error largo	43
Tabla 8 Resumen Estadístico para error ancho.....	44
Tabla 9 Resumen Estadístico para Log(error ancho).....	45
Tabla 10 Resumen Estadístico para Error alto	46
Tabla 11 Resumen Estadístico para resiliencia	47



Tabla 12 Resumen Estadístico para LOG(resiliencia con 0,016)	48
Tabla 13 Resumen Estadístico para Ra	49
Tabla 14 Resumen Estadístico para LOG(Ra)	50
Tabla 15 Resumen Estadístico para Tiempo impresión	51
Tabla 16 Resumen Estadístico para LOG(Tiempo impresión)	52
Tabla 17 Resumen Estadístico para peso	53
Tabla 18 Resumen de la normalidad en los datos.....	54
Tabla 19 Comparación errores.....	55
Tabla 20 de la varianza para error dimensional largo.....	56
Tabla 21 Resumen modelo para error dimensional largo.....	56
Tabla 22 Niveles seleccionados para e.largo.....	57
Tabla 23 Análisis de la varianza para log (error dimensional ancho).....	59
Tabla 24 Resumen modelo para log (error dimensional ancho).....	59
Tabla 25 Niveles seleccionados para e.ancho.....	60
Tabla 26 Análisis de la varianza para error dimensional alto	63
Tabla 27 Resumen modelo para error dimensional alto.....	63
Tabla 28 Niveles seleccionados para e.alto	64
Tabla 29 Análisis de Varianza para LOG(resiliencia)	69
Tabla 30 Resumen LOG(resiliencia).....	69
Tabla 31 Resumen modelo para LOG(resiliencia)	69
Tabla 32 Niveles seleccionados para resiliencia	70
Tabla 33 Análisis de la varianza para Log(Ra)	74
Tabla 34 Resumen coeficientes para Log(Ra)	75
Tabla 35 Resumen modelo para Log(Ra)	75
Tabla 36 Niveles seleccionados para rugosidad media.....	76
Tabla 37 Análisis de la varianza para Tiempo de impresión	79
Tabla 38 Resumen modelo para Tiempo de impresión	79
Tabla 39 Niveles seleccionados para e.largo.....	80
Tabla 40 Análisis de la varianza para Peso.....	85
Tabla 41 Niveles seleccionados para e.largo.....	86
Tabla 42 Resumen del modelo sin centros error dimensional largo	92
Tabla 43 Resumen del modelo con centros error dimensional largo	92
Tabla 44 Resumen del modelo sin centros Log(error dimensional largo)	93
Tabla 45 Resumen del modelo con centros Log(error dimensional largo)	93
Tabla 46 Tabla 37 Resumen del modelo sin centros error dimensional alto.....	94
Tabla 47 Resumen del modelo con centros error dimensional alto	94
Tabla 48 Resumen del modelo sin centros LOG(resiliencia).....	95
Tabla 49 Resumen del modelo con centros LOG(resiliencia)	95
Tabla 50 Resumen del modelo sin centros LOG(Ra)	96
Tabla 51 43 Resumen del modelo con centros LOG(Ra).....	96
Tabla 52 Resumen del modelo sin centros LOG(t. impresión).....	97
Tabla 53 Resumen del modelo con centros LOG(t. impresión)	97
Tabla 54 Análisis de la normalidad de los datos para error dimensional largo.....	99
Tabla 55 Efectos significativos para error dimensional largo	100
Tabla 56 Resumen modelo para error dimensional largo.....	101
Tabla 57 Análisis de la normalidad de los datos de log(error dimensional ancho	103
Tabla 58 Efectos significativos para log(error dimensional ancho).	103
Tabla 59 Resumen para log(error dimensional ancho).....	104



Tabla 60 Análisis de la normalidad de los datos de error dimensional alto	106
Tabla 61 Efectos significativos para error dimensional alto	106
Tabla 62 Resumen modelo para error dimensional alto	107
Tabla 63 Experimentos para superficie resupestada resiliencia	109
Tabla 64 Análisis de la normalidad de los datos de la variable resiliencia.....	110
Tabla 65 Efectos significativos para la resiliencia	110
Tabla 66 Resumen modelo para la resiliencia.....	111
Tabla 67 Análisis de la normalidad de los datos de rugosidad	112
Tabla 68 Efectos significativos para rugosidad	113
Tabla 69 Resumen modelo para rugosidad.....	113
Tabla 70 Análisis de la normalidad de los datos de tiempo de impresión.....	116
Tabla 71 Efectos significativos para tiempo de impresión.....	116
Tabla 72 Resumen modelo para tiempo de impresión.....	116
Tabla 73 Parámetros error alto	121
Tabla 74 Rangos variables error alto.....	121
Tabla 75 configuración para error alto	121
Tabla 76 valor de los factores	121
Tabla 77 Resultado optimización error alto.....	121
Tabla 78 Límites para optimización multiobjetivo	126
Tabla 79 Límites para los parámetros optimización caso 1	126
Tabla 80 Parámetros para la optimización caso 1.....	126
Tabla 81 Deseabilidad compuesta caso 1	126
Tabla 82 factores caso 1.....	127
Tabla 83 Valor de las respuestas en el caso 1	127
Tabla 84 Estadísticas de las probetas impresas	127
Tabla 85 Objetivos caso 2.....	128
Tabla 86 Valor para los factores caso 2.....	128
Tabla 87 Valor para los factores caso 2.....	128
Tabla 88 Predicción de respuesta múltiple caso 2.....	128
Tabla 89 Estadísticas de las probetas impresas	129







1. AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi hermana por estar ahí.

A Juan Carlos Diaz por aguantar mi ristra de preguntas.

A Santiago Carlos Gutiérrez por permitirme usar el laboratorio.

Y a todos los profesores que han hecho que sea yo.





2. Nota sobre el contenido y la estructura del documento

El presente documento pertenece al ámbito académico esa es la razón por la que se han detallado todos los pasos realizados para llegar al resultado final; si se tratase de un documento meramente del ámbito industrial muchas de las secciones estarían mucho más resumidas o directamente no existirían.

En cuanto a la estructura del documento, se ha decidido que tenga una estructura semejante a la de una publicación científica ya que esta es la que mejor puede ayudar al lector a conocer el proceso de elaboración o su repetición sin dejar de lado .



3. RESUMEN

En el presente documento se detalla el proceso desarrollado para la optimización multiobjetivo mediante el uso del método de superficie de respuesta y la función de deseabilidad aplicado a la impresión 3D empleando la técnica de deposición de filamento fundido en la impresora Anet A8.

4. RESUM

En el present document es detalla el procés desenvolupat per a l'optimització multiobjectiu mitjançant l'ús del mètode de superfície de resposta i la funció de desitjabilitat aplicat a la impressió 3D emprant la tècnica de deposició de filament fos a la impressora Anet A8.

5. ABSTRACT

This document details the process developed for multiobjective optimization using the response surface method and the desirability function applied to 3D printing using the fused filament deposition technique on the Anet A8 printer.



6. CONTEXTO DEL DOCUMENTO

Desde hace unos años la Universitat Politècnica de València está dando cada vez más relevancia a la adquisición de competencias transversales. Para tal fin existen tres vías de actuación, en primer lugar los planes de estudio, en segundo lugar los trabajos de fin de grado y máster y finalmente, actividades extracurriculares como concursos de ingeniería. Este tipo de competencias tiene el propósito de ayudar a los alumnos a ser más competitivos en el mundo laboral. En este proyecto se muestra implícitamente la adquisición de las principales competencias transversales:

- **CT-01. Comprensión e integración:** para la realización de este Proyecto ha sido necesario conocer el sistema de impresión 3d mediante fdm.
- **CT-02. Aplicación y pensamiento práctico:** tras conocerse el mecanismo de impresión 3d ha sido necesario saber aplicar las técnicas de análisis de datos y experimentación, así como los ensayos.
- **CT-03. Análisis y resolución de problemas:** Se ha vuelto imprescindible dar solución a los diferentes problemas que han ido surgiendo a lo largo del trabajo, del mismo modo que ha sido necesario conocer las limitaciones de la impresora 3d. Algunos de estos problemas se han resuelto mediante la observación y estudio detallado de los mismos.
- **CT-04. Innovación, creatividad y emprendimiento:** este trabajo nace de la intención de crear algo nuevo que no se haya hecho hasta ahora y que sea de utilidad a aquellos que empleen la impresión 3d mediante fdm.
- **CT-05. Diseño y Proyecto:** este proyecto se ha realizado durante un tiempo determinado, siguiendo unos pasos concretos y dando como resultado un proyecto único.
- **CT-06. Trabajo en equipo y liderazgo:** el proyecto no hubiese sido posible llevarlo a cabo sin la retroalimentación y toma de decisiones que se ha realizado.
- **CT-07. Responsabilidad ética, medioambiental y profesional:** el proyecto en si mismo ya encaja perfectamente en este apartado ya que existen diferentes variables a optimizar que disminuyen el uso de recursos naturales.
- **CT-08. Comunicación efectiva:** el proyecto no hubiese sido posible llevarlo a cabo sin el flujo de información bidireccional alumno-tutor.
- **CT-09. Pensamiento crítico:** Durante todo el proyecto se han ido evaluando diferentes aspectos que han modificado la forma que se tendría a la hora de actuar en un futuro.
- **CT-10. Conocimiento de problemas contemporáneos:** la impresión 3d si bien es cierto que no es reciente, la liberación de las patentes ha hecho que se democratice en gran medida siendo hoy en día un problema que afecta a más sectores que hace unos años.
- **CT-11. Aprendizaje permanente:** para llevar a término el proyecto ha sido vital profundizar en las diferentes técnicas de análisis estadístico.
- **CT-12. Planificación y gestión del tiempo:** durante el desarrollo del proyecto ha sido necesario realizar una gestión del tiempo exquisita ya que la situación de confinamiento evito que se pudiera realizar los ensayos en los laboratorios, por otro lado, el proceso de impresión 3d es lento y las técnicas empleadas requieren de muchas horas estando pendiente del proceso.
- **CT-13. Instrumental específica:** durante la elaboración del proyecto se han ido adquiriendo nuevos conocimientos como por ejemplo, el uso de diferentes softwares estadísticos.



7. MOTIVACIÓN

La motivación para la realización de este proyecto viene de dos lugares distintos, por un lado, tras realizar el segundo curso del máster de industriales en la especialidad de organización, se quedó grabada la idea de mejorar todos los procesos independientemente de cuales fuesen, y en todas las vertientes posibles. La asignatura de ingeniería de la calidad a los ojos del autor muestra una serie de herramientas de naturaleza científica que pueden ayudar a conseguir este objetivo, el problema, es que no se profundizaba lo suficiente y realizar un trabajo de final de máster aplicando esas técnicas permitía profundizar y afianzar dichos conocimientos hasta el punto de poder realizar mejoras significativas en los diferentes procesos con los que un ingeniero industrial puede lidiar a lo largo de su vida.

En segundo lugar, durante 2015 el autor realizó unas prácticas en Varsovia, en una empresa que realizaba diseños de ventiladores; en dicha empresa disponían de una impresora 3d tipo fdm la cual no usaban porque según ellos, iba muy lenta, las piezas no salían como ellos deseaban y una serie de razones que los encargados dieron. Posteriormente, en 2016 durante la participación en el concurso iGEM se debió imprimir una serie de piezas, cada una con características distintas. El no disponer de una relación entre las características deseadas y el valor de los factores causó cierta frustración, hasta tal punto, que cuando apareció la oportunidad de hallar la respuesta a cual era dicha relación, se decidió encontrarla.

8. OBJETIVO

El presente trabajo fin de máster tiene como principal objetivo determinar las relaciones que existen entre 5 factores de tipo cuantitativo: velocidad de impresión, flujo de material, grosor de pared, altura de capa, y densidad de relleno; y como afectan estos a los siguientes medibles:

- Diferencias respecto la medida nominal (error dimensional)
- Resistencia al choque (resiliencia)
- Rugosidad media Ra
- Tiempo de impresión
- Material empleado

Con la intención de poder realizar una optimización multiobjetivo usando la técnica de la función de deseabilidad junto con superficies de respuesta.

9. Marco teórico

A día de hoy están confluyendo una serie de condiciones en el ámbito industrial que abocan a ciertos cambios en la técnica. Por un lado, se tiene un mercado el cual cambia cada vez más rápidamente y pide nuevos y mejores productos, a esto se le une un fuerte movimiento ecologista tanto en el ámbito público como en el ámbito privado; este movimiento demanda una producción con menor uso energético y menores desperdicios [1]. Y finalmente, a este compendio de circunstancias se añade la liberación de ciertas patentes relacionadas con el prototipado rápido y la democratización de estas tecnologías.

Cuando se habla de prototipado rápido, se hace referencia a la forma más rápida de obtener una pieza diseñada mediante software CAD en 3D. Los objetos obtenidos mediante prototipado rápido pueden tener únicamente finalidades estéticas, pero también útiles para el estudio del segmento de mercado al que van dirigidos, o a su vez pueden cumplir con algunos o todos de los requisitos mecánicos que tendría la pieza definitiva o incluso ser la pieza definitiva, ofreciendo la posibilidad de realizar pruebas funcionales antes de que existan los futuros moldes [2] (que puede que ni lleguen a realizarse).

El prototipado rápido comprende una serie de técnicas para la obtención de las piezas, pero en este trabajo solo se tratarán las principales tecnologías de impresión 3D dejando de lado: el laminado por capas, el mecanizado cnc.

Como se puede deducir de lo expuesto anteriormente para la obtención de las propiedades deseadas (estética, resistencia mecánica, consumo de material...) será necesario el uso de una tecnología de prototipado rápido específica y la introducción de unos parámetros concretos.

9.1. La impresión 3D

La impresión 3D es uno de los sistemas de fabricación más modernos que hoy en día se emplean debido a su alta versatilidad en cuanto a diseño.

Existen diferentes tecnologías para la impresión 3d. Lo más común es que cada impresora solo emplee un tipo de tecnología de impresión. Actualmente en el mercado imperan 3 tecnologías principalmente. A continuación, se explicarán sus fundamentos:

9.1.1. SLA o estereolitografía

La estereolitografía consiste en proyectar una luz ultravioleta sobre un tanque que contiene una resina que polimeriza en el fondo cuando el haz de luz con una determinada energía incide sobre esta. La superficie donde se realiza la polimerización se va desplazando de forma que se van creando las capas de resina sólida.

SL/SLA:

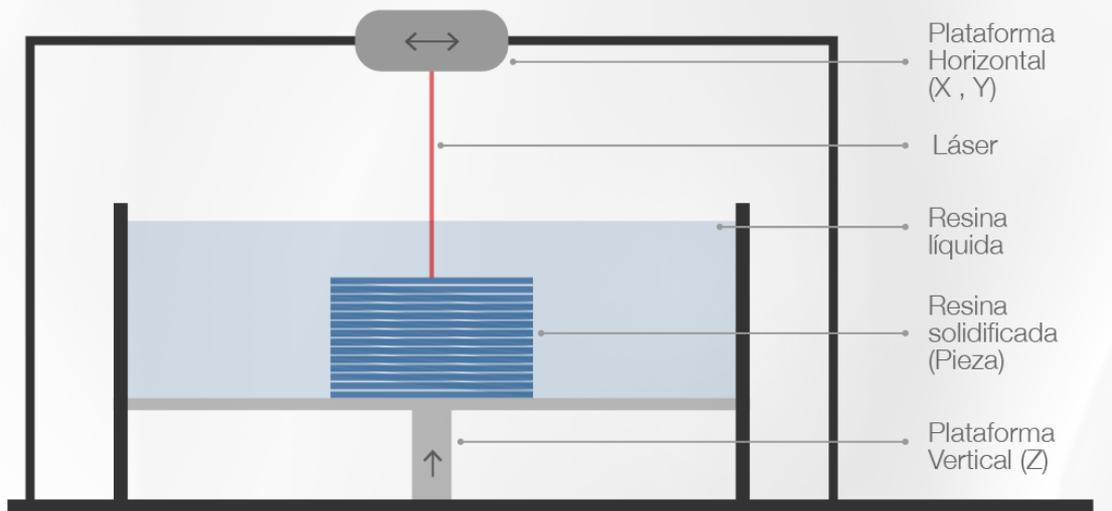


Ilustración 1 Estereolitografía

9.1.2. Selective Laser Melting (SLM)

En el SLM se proyecta una luz sobre una superficie recubierta de un material en polvo que puede fundirse a baja temperatura; en primer lugar se pone una capa de este “polvo fundible”, a continuación se proyecta la luz, quedando una capa impresa (es decir, solidificada), acto seguido se coloca otra capa de “polvo fundible” y se vuelve a proyectar la citada luz, de este modo se van creando capas.

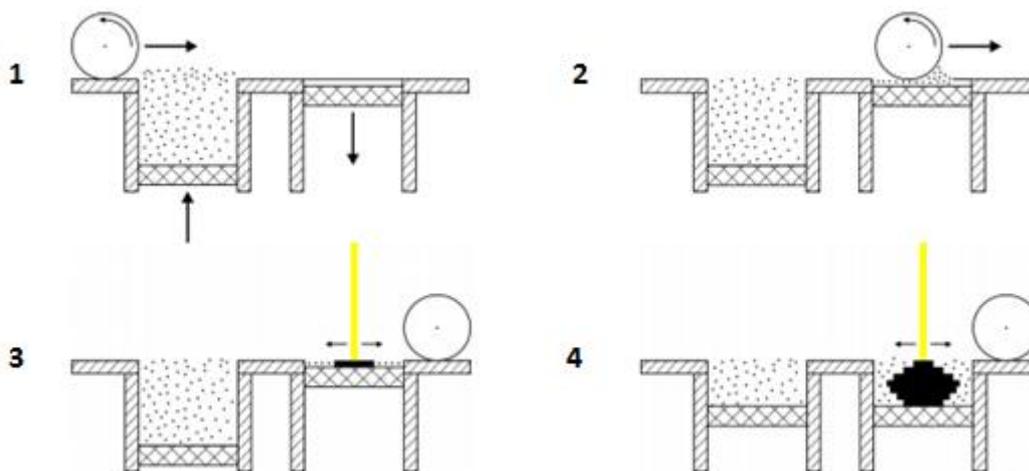


Ilustración 2 SLM

9.1.3. Modelado por deposición fundida (FDM)

En el FDM se extruye un material, de forma que el movimiento relativo del extrusor y la base va dejando las capas del material fundido. A día de hoy esta es una de las tecnologías más usadas de impresión 3d debido a su bajo costo.

FDM/FFF:

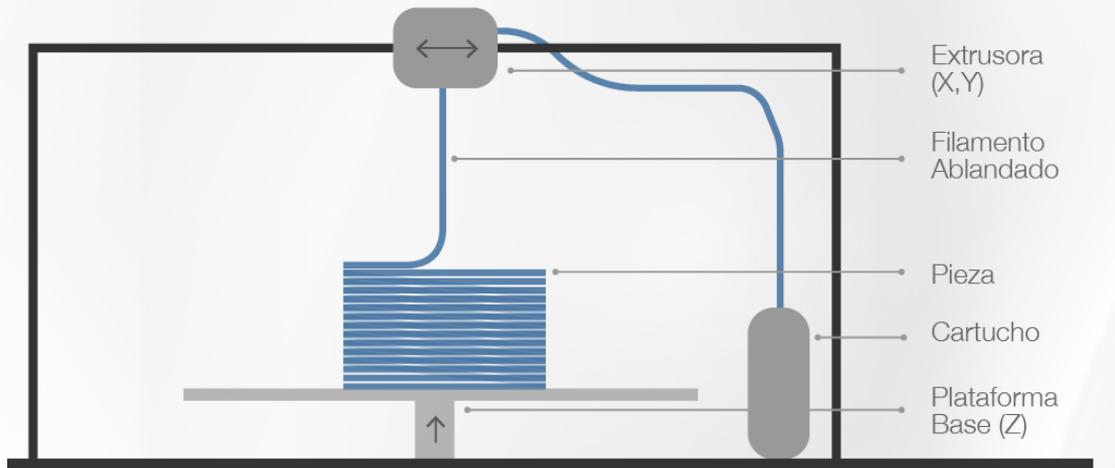


Ilustración 3 FDM

9.1.3.1. Impresora anet a8

En el presente trabajo girará en torno a la impresora Anet-A8 la cual emplea modelado por deposición fundida (FDM). Si bien es cierto que no es la más usada a nivel industrial para la obtención de productos finales, si que es usada para prototipar, a esto se le suma que ha sido de las más vendidas en 2019 debido a su bajo coste (150€ aprox) [3].

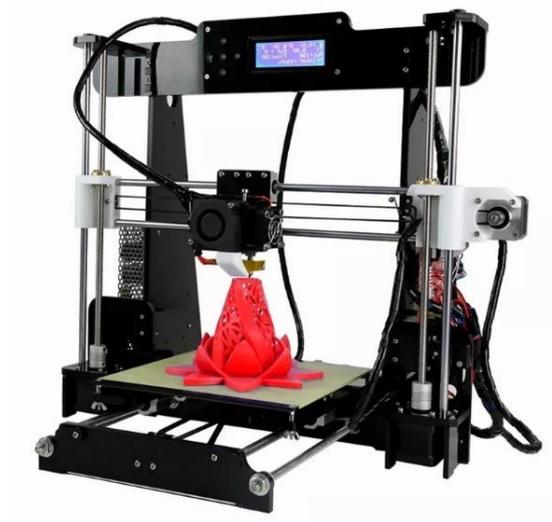


Ilustración 4 Anet A8

La impresora Anet-A8 cuenta con una fuerte comunidad que va generando avances y publicándolos en diferentes webs como pueda ser Thingiverse.com, de forma que es totalmente gratuito conseguir la información para aplicarlos a esta impresora (y otras).

Las principales mejoras que se desarrollan giran en torno al aumento de la vida de la impresora, la mejora de la calibración, reducción de las vibraciones entre otras...

Con el propósito de obtener piezas con mejores acabados y desviaciones dimensionales respecto al nominal, se suele atacar el problema desde diferentes frentes:

Por un lado, nos encontramos con aspectos de tipo mecánico como:

- Apoyando la impresora sobre una lámina de goma eva con la intención de absorber las vibraciones.
- Colocando refuerzos impresos por la propia impresora en el marco para darle una mayor robustez.
- Desagregando el sistema de fundido-extrusión, de forma que el motor (Nema 17) que empuja el filamento quede fuera de la impresora, y en la impresora solo queda la resistencia que funde el cable, y el nozzel (pieza que da forma al material a extruir, suele dar forma circular de diámetro reducido).

Por otro lado, existen aspectos de tipo dinámico como pudiese ser la velocidad de movimiento del sistema que puede influir en el acabado de las piezas.

También existen variables que desde el software usado (Cura) para transformar los diseños cad, en archivos interpretables por la impresora (archivo en código G), pueden ser alteradas, ejemplos son: flujo de material, velocidad de impresión de la primera capa, tipo de soporte y un largo etc.

9.1.4. Fabricación de piezas mediante FDM

Para llevar a cabo la fabricación de un objeto en 3D con impresoras de tipo fdm, en primer lugar se necesita hacer un diseño 3d con algún software como pueda ser Inventor, o Solidworks entre otros. En segundo lugar, el al archivo que generan estos softwares debe ser convertido a un archivo tipo.STL, el cual pasa de un sólido rígido a una malla formada por triángulos. Este archivo es el que se abre con el Cura.

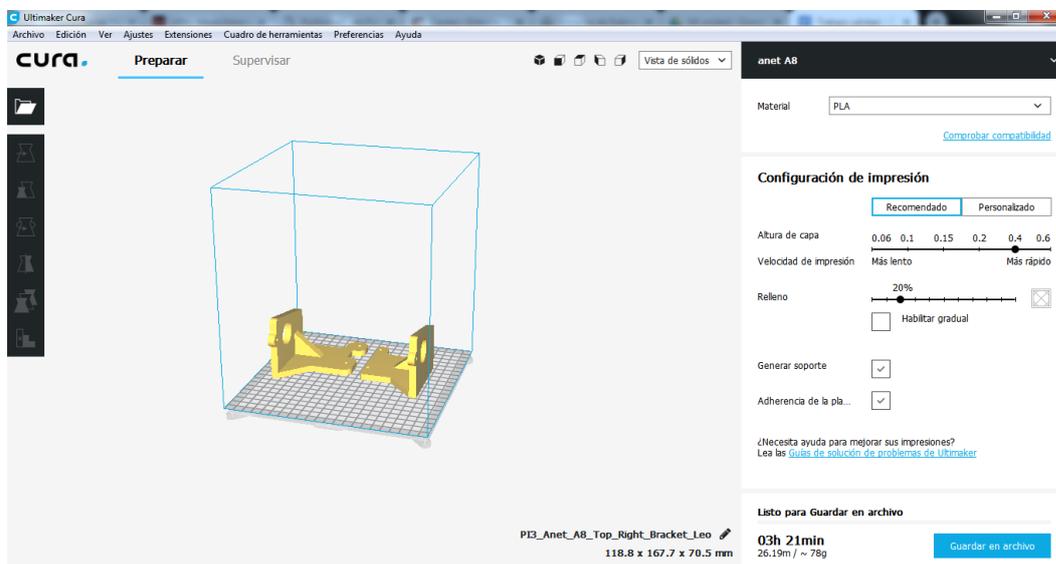


Ilustración 5 Captura del software Cura

Desde este software podemos definir los diferentes parámetros de impresión de la pieza. Dentro del Cura, encontramos 2 modos: el modo recomendado, y el modo personalizado.

El modo recomendado, tiene muy pocas variables que se pueden modificar (altura de capa, % relleno y pocas más relevantes)

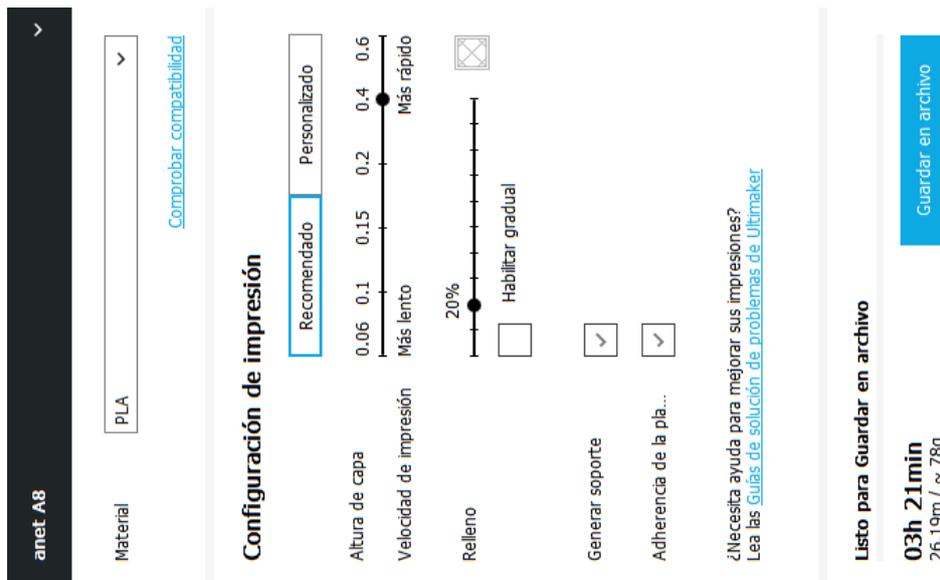


Ilustración 6 Captura de opciones recomendadas del cura

En cuanto a la opción “personalizado” se encuentran unas secciones con diferentes niveles y subniveles de opciones.

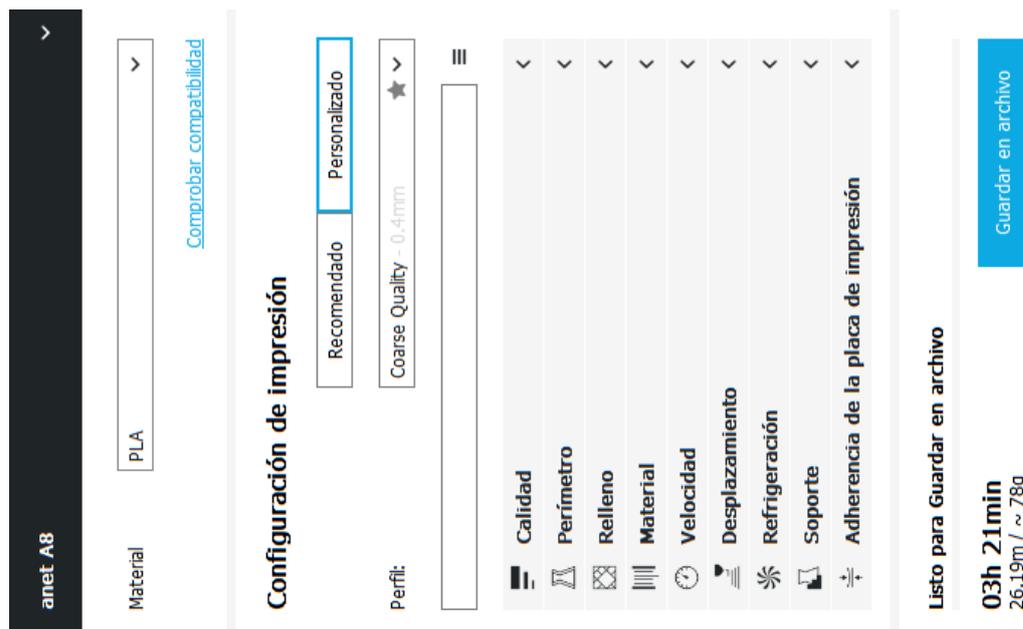


Ilustración 7 Captura de opciones personalizadas del Cura

Una vez elegida la configuración de la impresión, el Cura genera un archivo “.gcode” el cual contiene todos los parámetros y movimientos que necesita la impresora para realizar su función.

Este archivo se guarda en una tarjeta microSD que posteriormente se inserta en la propia Anet-a8 desde la que mediante una pantalla LCD y botones se puede seleccionar el archivo a imprimir.

Es interesante recalcar que a día de hoy, la mayoría de las páginas que se pueden consultar sobre impresión 3d con PLA mediante FDM, dan valores diferentes a los que fijar los parámetros, y en

todas ellas invitan a ir probando (sin especificar metodología alguna, siendo prueba y error) hasta que se encuentre una combinación satisfactoria [4] [5].

Tras haberle dado a imprimir, la impresora tarda unos minutos en comenzar ya que debe calentar tanto la superficie donde se imprimirá (60 °C aproximadamente) como el cabezal (entre 190 y 220 °C, aunque depende del material).

Existen otros softwares para la creación de los archivos .gcode como por ejemplo XYZ propio de la impresora Da Vinci. Por lo general estos softwares pertenecen a un tipo de impresora determinada, o son menos personalizables lo que ha impedido su democratización al contrario que el Cura.

9.2. Diseño de experimentos

En la industria es común experimentar con la intención de resolver un problema, comprobar una idea (conjetura, hipótesis) o buscar una mejora; por ejemplo, realizar una serie de cambios en los materiales, métodos o condiciones de operación de un proceso. Sin embargo, no es extraño que estos experimentos se hagan mediante la “técnica” de ensayo y error, apelando a la experiencia y a la intuición, en lugar de seguir una metodología que aporte información al problema planteado. Del mismo modo sucede con el análisis de los datos experimentales, donde más que hacer un análisis robusto de la información obtenida y tomar en cuenta la variación, se lleva a cabo un análisis más basado en la intuición que en la propia información de los datos. El *diseño estadístico de experimentos* o también conocido como design of experiments (DOE) es una forma muy eficaz de hacer las experimentaciones y extraer la información. El diseño de experimentos consiste en determinar cuáles son las pruebas que se deben realizar, y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder a los objetivos planteados. [6]

- Breve apunte histórico

El diseño de experimentos comenzó a investigarse por parte de Fisher sobre los años 1920-30, posteriormente se desarrolló la técnica de superficie de respuesta por parte de Box y Wilson. Hasta 1980 el diseño de experimentos no dio el salto del campo de la investigación a las plantas industriales, pero esto cambió con la llegada de la búsqueda de la calidad por parte de Deming e Ishikawa. Hay que reconocer también el trabajo de Taguchi en el campo del diseño de experimentos ya que fue este el que investigó sobre el diseño de experimentos robusto [6].

- Definiciones básicas
 - Variable respuesta: Es el medible del experimento (rugosidad, dimensión, piezas defectuosas...)
 - Factores: son aquellas variables que intervienen en el proceso, pueden ser factores regulables por el experimentador (ej: temperatura del horno, y tiempo dentro del horno) o no regulables (ej: algunas condiciones ambientales como la temperatura exterior). Los factores estudiados son aquellos de los que se pretende obtener la relación que existe con la variable o variables respuesta.
 - Bloqueo: es la eliminación del efecto de un factor (ej: realizar el experimento con el mismo operario si se piensa que el factor “habilidad del operario” es relevante)
 - Niveles: Son el valor que toman los factores, suelen codificarse como alto (1), bajo (-1) o medio (0).
 - Tratamiento: Es la combinación de factores a unos niveles determinados.

- Experimento: Es el ensayo/muestra/probeta testado.
- Replica: Puede hacer referencia a cuantas veces se realiza un tratamiento o a una de los experimentos en concreto que tiene un tratamiento determinado.
- Etapas
 1. Definir el problema y el alcance del estudio.
 2. Definir las variables respuesta y los factores que pueden intervenir.
 3. Seleccionar los niveles de cada factor.
 4. Aleatorizar el orden de los tratamientos según Yates.
 5. Realizar lo que se conoce como screening con la intención de descartar del estudio los factores que no intervengan.
 6. Realizar experimentos secuencialmente para formar la superficie de respuesta.
 7. Ponderar la función de deseabilidad
 8. Encontrar el óptimo para los criterios aplicados
- Estadísticos: El Análisis de Varianza (ANOVA)

Esta técnica pretende separar los efectos del error y los efectos debidos a los factores así una media (y) vendrá dada por el efecto de los factores y por un error: $y = \mu + \epsilon$ siendo μ el efecto debido a los factores y ϵ el error residual. A la hora de realizar el estudio estadístico se usa el ANOVA en vez de pruebas tipo t dos a dos ya que estas son más laboriosas e inducen a un mayor error de primera especie (considerar diferencias cuando realmente no las hay). La aplicación de esta técnica requiere que los datos se distribuyan según una distribución de tipo normal y en caso de no ser así, los datos pueden ser transformados para “normalizarlos”. Se suelen usar transformaciones de tipo logarítmico para conseguir que unos datos no normales pasen a serlo.

9.3. Los errores dimensionales.

En la industria es común que la validez de las piezas dependa de su correcta fabricación dentro de unas tolerancias y en el momento que una de las piezas en una de sus dimensiones se sale fuera de esas tolerancias la pieza deja de ser válida. A la hora de fabricar piezas en 3 D se sigue el mismo criterio, esta es la razón por la que se van a estudiar por separado los 3 medibles de la impresión 3D que serán llamados: alto, ancho y largo.

10. MATERIALES Y MÉTODOS

10.1. Materiales

En este apartado se tratarán los diferentes materiales y herramientas que han sido empleados para llevar a cabo este trabajo.

10.1.1. El calibre

Para realizar las mediciones se usa un calibre con una resolución de centésimas de milímetro.

10.1.2. Péndulo de Charpi

La medición de la resiliencia se ha llevado a cabo mediante el ensayo del péndulo de charpi. El péndulo empleado es un Ceast de **4 kJ**. El funcionamiento es el siguiente: se posiciona el péndulo en su parte más alta, se coloca la probeta en el lugar para tal fin, se cierra la puerta de metacrilato y se pulsa simultáneamente los botones de acción los cuales liberan el péndulo, este golpea la probeta partiéndola (y frenando un poco el péndulo) la diferencia de alturas entre la inicial y la final corresponde a la energía absorbida para fracturar la probeta. Antes de realizar este proceso se debe realizar uno idéntico solo que sin introducir una probeta con la intención de cuantificar las pérdidas por rozamiento, este proceso en vacío toma el nombre de “blanco”.



Ilustración 8 Péndulo de Charpi

10.1.3. Rugosímetro

Para la medición de la rugosidad se ha empleado un rugosímetro de la marca Mitutoyo. Se han colocado las probetas pegadas con cinta aislante a la superficie de apoyo y posteriormente se ha colocado el palpador del rugosímetro encima para que realizase las mediciones. Es importante remarcar que el rugosímetro realiza pasadas de varios milímetros y luego promedia, y que en el caso de encontrar un tramo de rugosidad fuera de escala da error con lo que se debe realizar la medición en un lugar de las proximidades. Cuando se ha dado el citado error la medición se ha hecho en las inmediaciones siguiendo una trayectoria paralela a la primera.



Ilustración 9 Rugosímetro

10.1.4. Báscula

Para realizar las mediciones de peso se ha empleado una báscula con un rango de 500 gr y una resolución de 0,01 g.



Ilustración 10 Báscula

10.1.5. El software

A continuación se detallaran los diferentes programas informáticos que se han empleado para el desarrollo del proyecto (sin contar el editor de texto).

10.1.5.1. Análisis de datos

Para el desarrollo de este trabajo se han usado los softwares Statgraphics y Minitab para el análisis de los datos.

10.1.5.2. Diseño 3d

Para el diseño de la probeta y obtención de archivos con extensión .STL se ha empleado Inventor2016 .

10.1.5.3. Transformación STL-gcode

Para la obtención, variación de los parámetros de impresión y conversión a código “.gcode” se ha usado el CURA.

10.1.6. La probeta

La probeta tiene las dimensiones que aparecen en los planos (ver sección planos).

Para la impresión de las piezas se usa como material PLA de la marca León.

Todas las probetas tienen escrita en la parte inferior, el orden del experimento y su tratamiento.

10.1.7. Impresora Anet A8

Como se indica en el apartado 3.1.3.1 en este trabajo se ha empleado la impresora Anet A8 para la fabricación de las probetas, las razones son su bajo costo, y amplia difusión tanto a nivel industrial como particular.

10.2. Métodos

10.2.1. Mediciones y recogida de datos

Las mediciones realizadas a las probetas se pueden dividir en varios tipos.

Debe recalcar que todas las variables han sido medidas en todas las probetas a pesar de que algunas de los factores no influyese en ese experimento para así poder relacionar todas las variables y factores de forma más sencilla en el software empleado.

10.2.1.1. Mediciones de peso

Al ser un trabajo académico se ha querido comprobar la bondad de las predicciones del software usado ya que este predice tanto peso como metros de filamento usado. Los metros de filamento usado es una variable la cual es difícil medir, pero guarda una relación proporcional con el peso del objeto impreso. El software tiene una resolución de gramos (dando las probetas entre 2 y 3 gramos en los experimentos de cribado; y una resolución de centímetros para la variable filamento, esta es la razón por la que se han tomado los metros de hilo usado como variable para hacer referencia al peso.

Para realizar la medición de peso se ha colocado cada probeta en el centro de la báscula previamente tarada.

Solo en los experimentos de “estrella” se ha realizado la medición del peso de las probetas.

La realización del experimento de este modo implica que solo se pueden tomar como buenas las predicciones del software que giren en torno a impresiones de bajo peso ya que no se ha comprobado que las predicciones del software sean correctas en piezas de gran tamaño (y podría existir una deriva en función del tamaño).

10.2.1.2. Mediciones de longitud

Las probetas han sido medidas respecto a su altura, su anchura y su espesor como muestran las siguientes imágenes:

Forma de realizar las mediciones

Medida anchura



Cota nominal=10mm

Medida longitud



Cota nominal=55mm

Medida grosor



Cota nominal=5mm

Ilustración 11 Mediciones de dimensiones

Como se puede observar tanto la pieza como el instrumento de medida se encuentran siempre apoyados sobre la misma superficie (a excepción de la medida del grosor, pero la probeta tiene unas marcas para medir siempre en el mismo sitio) con lo que se consigue realizar las mediciones siempre a la misma altura.

10.2.2. Pasos a realizar para obtener la relación factores-respuestas

En primer lugar, se deberá realizar un diseño de experimentos de tipo factorial completo con el cual se conocerán la significación (o no) de los diferentes factores. Cuando se habla de significación se está diciendo si ese factor afecta al resultado final.

Dado que se trata de un proceso muy estudiado con óptimos cercanos al punto de operación se prescindirá de la técnica de “ruta máximo ascenso” y se pasará directamente a caracterizar la superficie de respuesta si el modelo lineal arrojado por el factorial completo (incluyendo centros) no se ajusta lo suficiente a los datos.

Una vez se tenga la superficie de respuesta caracterizada se pasará a elaborar la función de deseabilidad la cual se tratara de maximizar dependiendo de las preferencias del usuario.

10.2.1. Diseño de experimentos (Design of experiments-DOE) para etapa de screening

Con el propósito de extraer datos altamente informativos y de forma eficiente respecto al problema que nos ocupa se plantea el diseño de un experimento 2^k (factorial completo), siendo k el número de factores. Se ha escogido un diseño 2^k frente a un 2^{k-p} (fracción factorial) ya que a priori se creía que existía una alta posibilidad de interacciones incluso quintuple y para no confundirlas con otras interacciones se volvía necesario este tipo de procedimiento. Para el presente caso los factores serán todos ellos cuantitativos.

Cuantitativos: velocidad del extrusor, altura de capa, grosor capa, densidad de relleno y flujo de material. A continuación se presentan los niveles codificados y su valor real:

Niveles	Altura capa	Grosor pared	Densidad relleno	Flujo	Velocidad
Alto 1	0,2	1	15	85	40
Bajo -1	0,4	2	35	110	100

Tabla 1 Niveles para el screening

Todos los factores son ensayados a dos niveles, alto, representado por 1, y bajo, representado por -1. A continuación se puede observar el conjunto de experimentos a realizar ya con su orden aleatorizado (se realiza con orden aleatorio para reducir los efectos de los factores no contemplados):



BLOQUE	Run	Tratamiento	Altura capa	Grosor pared	Densidad relleno	Flujo	Velocidad
1	1	6	1	-1	1	-1	-1
1	2	9	-1	-1	-1	1	-1
1	3	13	-1	-1	1	1	-1
1	4	3	-1	1	-1	-1	-1
1	5	17	-1	-1	-1	-1	1
1	6	19	-1	1	-1	-1	1
1	7	32	1	1	1	1	1
1	8	25	-1	-1	-1	1	1
1	9	11	-1	1	-1	1	-1
1	10	10	1	-1	-1	1	-1
1	11	4	1	1	-1	-1	-1
1	12	23	-1	1	1	-1	1
1	13	12	1	1	-1	1	-1
1	14	16	1	1	1	1	-1
1	15	21	-1	-1	1	-1	1
1	16	5	-1	-1	1	-1	-1
1	17	27	-1	1	-1	1	1
1	18	22	1	-1	1	-1	1
1	19	8	1	1	1	-1	-1
1	20	31	-1	1	1	1	1
1	21	26	1	-1	-1	1	1
1	22	1	-1	-1	-1	-1	-1
1	23	15	-1	1	1	1	-1
1	24	7	-1	1	1	-1	-1
1	25	28	1	1	-1	1	1
1	26	24	1	1	1	-1	1
1	27	18	1	-1	-1	-1	1
1	28	14	1	-1	1	1	-1
1	29	29	-1	-1	1	1	1
1	30	30	1	-1	1	1	1
1	31	2	1	-1	-1	-1	-1
1	32	20	1	1	-1	-1	1
2	1	20	1	1	-1	-1	1
2	2	6	1	-1	1	-1	-1
2	3	22	1	-1	1	-1	1
2	4	21	-1	-1	1	-1	1
2	5	27	-1	1	-1	1	1
2	6	24	1	1	1	-1	1
2	7	9	-1	-1	-1	1	-1
2	8	25	-1	-1	-1	1	1
2	9	8	1	1	1	-1	-1
2	10	11	-1	1	-1	1	-1
2	11	17	-1	-1	-1	-1	1
2	12	18	1	-1	-1	-1	1
2	13	32	1	1	1	1	1
2	14	16	1	1	1	1	-1
2	15	10	1	-1	-1	1	-1
2	16	29	-1	-1	1	1	1
2	17	7	-1	1	1	-1	-1
2	18	30	1	-1	1	1	1
2	19	28	1	1	-1	1	1
2	20	19	-1	1	-1	-1	1

2	21	2	1	-1	-1	-1	-1
2	22	5	-1	-1	1	-1	-1
2	23	3	-1	1	-1	-1	-1
2	24	4	1	1	-1	-1	-1
2	25	1	-1	-1	-1	-1	-1
2	26	13	-1	-1	1	1	-1
2	27	23	-1	1	1	-1	1
2	28	26	1	-1	-1	1	1
2	29	14	1	-1	1	1	-1
2	30	15	-1	1	1	1	-1
2	31	12	1	1	-1	1	-1
2	32	31	-1	1	1	1	1

Tabla 2 Tabla experimentos para screening

10.2.2. Análisis de la varianza (ANOVA)

Este tipo de análisis requiere que las variables sean de tipo normal, en caso de no serlo se deberá recurrir a algún tipo de transformación como pueda ser la transformación logarítmica.

Se plantea un análisis de la varianza para poder extraer toda la información contenida en los datos que el DOE ha aportado. A tal fin se analizará la varianza de las experiencias introduciendo los factores con la intención de conocer si el cambio de un nivel a otro en cada factor genera muestras de medias diferentes.

Para poder realizar correctamente el ANOVA es necesario que los grados de libertad residuales sean mayores a 4 (por esta razón se hacen réplicas, en caso de no poder hacerse réplicas se debería llevar a cabo un diseño de tipo fracción factorial o uno de Taguchi, aunque con este se daría el fenómeno de la confusión), así se tiene:

Grados de libertad totales	N-1	$2^*(2^5)-1=63$
Grados de libertad del factor	niveles-1	5 factores*(2 niveles-1)=5
Grados de libertad interacciones 2º y 3º orden	gl FA x gl FB	ab,ac,ad,ae,bc,bd,be,cd,ce,d e,abc,abd,abe,acd,ace,ade,b cd,bce,bde,cde (20 en total)
Grados de libertad interacciones 4º orden	gl FA x gl FB	Abcd,abce,bcde,acde,abde (5 en total)
Grados de libertad interacciones 5º orden		Abcde (1)
Grados de libertad residuales	GR=GT-GF-GI	63-5-20-5-1=32

Tabla 3 Cálculo grados libertad

La hipótesis nula que se establece para los anovas es que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los experimentos con un nivel de significación (alfa) de 0,95, o en otras palabras, que 1 de cada 20 veces que se haga esta afirmación se estará cometiendo un error.

$$H_0: \mu_i = \mu_j$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

10.2.3. Media e intervalo de la media prevista

Para el cálculo de la media prevista y del intervalo de confianza se aplicaran las siguientes fórmulas:

$$\text{media prevista} = \bar{y} + 0.5 * \sum \text{fectos} * \text{nivel del efecto}$$

Ecuación 1 Media prevista

$$\text{Media prevista} \pm t_{gl.res}^{0.5\alpha} \sqrt{\frac{CM_{residual}}{N} * (1 + gl_{predicción})}$$

Ecuación 2 Intervalo confianza

Siendo \bar{y} , la media de todos los tratamientos, gl , los grados de libertad, N el número de tratamientos.

10.2.4. Contribución relativa de un factor

Para descartar posibles efectos significativos pero con una relevancia ínfima se analizará el efecto relativo con respecto a la variable respuesta. Siendo K el coeficiente que acompaña al efecto en la ecuación de regresión.

$$\text{contribución relativa}_i = \frac{|K_i|}{\sum K_i}$$

Ecuación 3 Contribución relativa

10.2.5. Metodología superficie de respuesta (MSR)

En esta técnica se pretende encontrar la combinación de los diferentes factores que proporciona la mejor respuesta (el punto óptimo) en la zona delimitada por los rangos de los valores empleados en los experimentos o en una región relativamente cercana (región experimental); no debe confundirse con el mejor tratamiento, que es el proporcionado por la mejor combinación en la técnica de factorial completo. La región experimental se intenta ubicar en la región de operabilidad (aquella que permite que se dé la variable respuesta dada una combinación de factores). Existe cierta dificultad para establecer la región de experimentación ya que ciertas combinaciones de factores pueden no ser operables y esto, a priori, se desconoce.

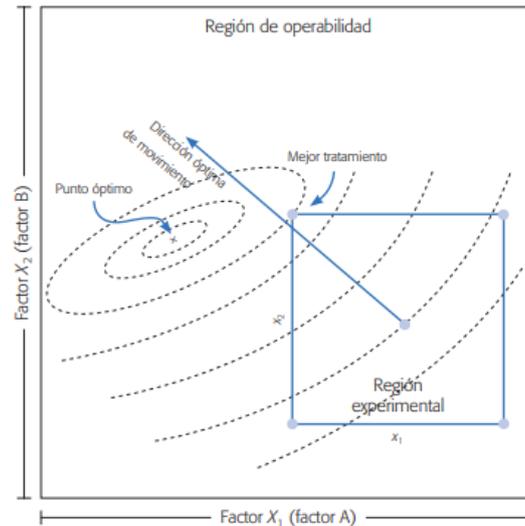


Ilustración 12 Mejor tratamiento y óptimo [6]

10.2.5.1. Elementos del método de superficie de respuesta (MSR)

Una vez se ha empleado el factorial completo se descartan los factores no significativos y si se observa una falta de ajuste del modelo de primer orden:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon$$

se pasa a un modelo de segundo orden:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1, j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

obtenido gracias a realizar experimentos siguiendo lo que se conoce como diseño de composición central (DCC) aunque puede encontrarse con el nombre de cuadrado y estrella o cubo central y estrella (caso de dos y tres factores significativos respectivamente) con la finalidad de captar la curvatura de la superficie y así conseguir un mejor ajuste. cuadrado y estrella. Los puntos de la estrella vienen determinados por un α el cual puede tener una serie de propiedades:

- Ortogonal: Los coeficientes estimados del modelo no dependen unos de otros, es decir, no existe correlación entre ellos.
- Rotable: La varianza de la respuesta solo depende de la distancia del punto tomado (x) al centro del diseño y no de la dirección tomada.

Si se desea que sea ortogonal:

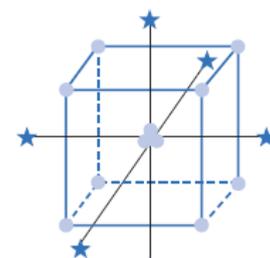
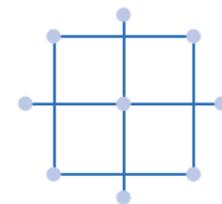


Ilustración 13 Diseño composición central [6]

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{F \times N} - F}{2}}$$

Ecuación 4 α ortogonal

Si se desea que sea rotable y ortogonal debe cumplirse:

$$\alpha = (F)^{0,25}$$

Ecuación 5 Condición para α rotable y ortogonal

$$n_0 = 4\sqrt{F} + 4 - F$$

Ecuación 6 Cálculo n_0

Siendo F número de puntos de la parte factorial y n_0 el número de corridas del experimento en el cento.

A continuación, se muestran la tabla de experimentos a realizar para 3 y 4 variables:

OrdenEs t	OrdenCorri da	TipoP t	Bloque s	A	B	C	Respuestas
1	1	1	1	-1	-1	-1	
2	2	1	1	1	-1	-1	
3	3	1	1	-1	1	-1	
4	4	1	1	1	1	-1	
5	5	1	1	-1	-1	1	
6	6	1	1	1	-1	1	
7	7	1	1	-1	1	1	
8	8	1	1	1	1	1	
9	9	-1	1	- 1,681792 8	0	0	
10	10	-1	1	1,681792 8	0	0	
11	11	-1	1	0	- 1,681792 8	0	
12	12	-1	1	0	1,681792 8	0	
13	13	-1	1	0	0	- 1,681 7928	
14	14	-1	1	0	0	1,681 7928	
15	15	0	1	0	0	0	
16	16	0	1	0	0	0	
17	17	0	1	0	0	0	
18	18	0	1	0	0	0	

19	19	0	1	0	0	0	
20	20	0	1	0	0	0	

Tabla 4 Diseño experimentos 3 variables DCC

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	A	B	C	D	Respuestas
1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	
2	2	1	1	1	-1	-1	-1	
3	3	1	1	-1	1	-1	-1	
4	4	1	1	1	1	-1	-1	
5	5	1	1	-1	-1	1	-1	
6	6	1	1	1	-1	1	-1	
7	7	1	1	-1	1	1	-1	
8	8	1	1	1	1	1	-1	
9	9	1	1	-1	-1	-1	1	
10	10	1	1	1	-1	-1	1	
11	11	1	1	-1	1	-1	1	
12	12	1	1	1	1	-1	1	
13	13	1	1	-1	-1	1	1	
14	14	1	1	1	-1	1	1	
15	15	1	1	-1	1	1	1	
16	16	1	1	1	1	1	1	
17	17	-1	1	-2	0	0	0	
18	18	-1	1	2	0	0	0	
19	19	-1	1	0	-2	0	0	
20	20	-1	1	0	2	0	0	
21	21	-1	1	0	0	-2	0	
22	22	-1	1	0	0	2	0	
23	23	-1	1	0	0	0	-2	
24	24	-1	1	0	0	0	2	
25	25	0	1	0	0	0	0	
26	26	0	1	0	0	0	0	
27	27	0	1	0	0	0	0	
28	28	0	1	0	0	0	0	
29	29	0	1	0	0	0	0	
30	30	0	1	0	0	0	0	
31	31	0	1	0	0	0	0	

Tabla 5 Diseño experimentos 4 variables DCC

Siendo A, B, C, D los factores y respuestas los valores de las variables de salida.

En este proyecto los niveles usados para los diferentes experimentos han sido:

Resiliencia				
Altura capa	Grosor pared	Densidad relleno	de Flujo	Velocidad
0.3	0.65	15	76	24
	1		85	40
	1,5		97.5	62.5
	2		110	85
	2.34		118	100

Rugosidad, error dimensional				
Altura capa	Grosor pared	Densidad relleno	de Flujo	Velocidad
0.1	1	15	70	30
0.2	1.5		80	45
0.3	2		90	60
0.4	2.5		100	75
0.5	3		110	90

Tiempo de impresión				
Altura capa	Grosor pared	Densidad relleno	de Flujo	Velocidad
0.1	1	7.5	100	24
0.2	1.5	15	100	40
0.3	2	22.5	100	62.5
0.4	2.5	30	100	85
0.5	3	37.5	100	100

Peso				
Altura capa	Grosor pared	Densidad relleno	de Flujo	Velocidad
0.1	1		70	90
0.2	1.5	80	80	90
0.3	2		90	90
0.4	2.5	100	100	90
0.5	3		110	90

Tabla 6 Niveles seleccionados para el DCC

Además del diseño composición central se pueden encontrar otros diseños como:

- Diseño de composición centra con centros en las caras, este diseño ubica los puntos axiales en las caras $\alpha=1$, con esto se evita tener que ampliar la región de experimentación y no caer en zonas no viables.
- Diseño central compuesto pequeño:

A la hora de buscar el óptimo dentro de una superficie de respuesta puede ser conveniente no descartar factores simples que componen los términos de mayor orden, teniéndose así lo que se conoce como modelo jerárquico.

Cuando se desea encontrar el punto estacionario o candidato a óptimo se recurre a las derivadas para encontrar el punto donde la tangente de la curva es igual a 0, para ello se procede del siguiente modo:

Sea la función matricial:

$$\hat{y} = \widehat{\beta}_0 + x'b + x'Bx$$

Ecuación 7 Ecuación matricial

$$b = \begin{pmatrix} \widehat{\beta}_1 \\ \widehat{\beta}_2 \\ \widehat{\beta}_3 \\ \vdots \\ \widehat{\beta}_k \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \widehat{\beta}_{11} & \dots & \frac{1}{2}\widehat{\beta}_{1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{2}\widehat{\beta}_{1k} & \dots & \widehat{\beta}_{kk} \end{pmatrix}$$

Ecuación 8 Términos ecuación matricial

Que al ser sustituido e igualado se obtiene:

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial X} = b + 2Bx = 0$$

Ecuación 9 Ecuación para encontrar punto óptimo

Al resolver esta ecuación se llega hasta el punto estacionario (candidato a óptimo)

$$x_0 = \frac{-B^{-1}b}{2}$$

Ecuación 10 Vector de puntos óptimos

B^{-1} es la inversa de B

La resolución del anterior sistema de ecuaciones y la inmensa mayoría de los cálculos aquí expuestos se realizan mediante el software de cálculo estadístico (Minitab o Statgraphics)

10.2.6. Optimización multiobjetivo

En diferentes procesos, en multitud de ocasiones se deben cumplir diferentes requisitos. El problema de la optimización multiobjetivo radica en que la combinación de factores que optimiza un requisito es diferente de la que optimiza otro. Por esta razón se debe buscar una solución de compromiso que dé en la medida de lo posible resultados satisfactorios para todas las variables de salida.

La combinación de factores que consigue esta solución de compromiso recibe el nombre de punto óptimo simultaneo. Para la obtención del punto óptimo simultaneo se puede recurrir a dos técnicas recopiladas en [7], por un lado se tiene el método gráfico, y por otro lado puede hacerse uso de la función de deseabilidad. En este trabajo al haber muchas variables de salida y el número de factores significativos dificulte la visualización de las superficies de respuesta (solo se pueden graficar superficies que dependan de dos factores) se ha optado por el uso del método basado en la función de deseabilidad.

10.2.6.1. Método de la función de deseabilidad

Este método se basa en definir una función que estime la bondad global del producto en cada punto. Esta función recibe el nombre de deseabilidad global (DG); mediante esta función se pasa de un problema de optimización multivariado en uno univariado donde el objetivo es maximizar DG. Para definir DG es necesario que todas las variables de salida a optimizar estén comprendidas entre 0 y 1, es decir, se requiere una transformación de cada variable respuesta ($Y_i(x)$), las funciones transformadas ($d_i(x)$) miden la deseabilidad tomando el punto de operación seleccionado (x) y las especificaciones; límite superior ($ES_i(x)$), límite inferior ($EL_i(x)$) y cota nominal ($T_i(x)$). Así pues, la función ($d_i(x)$) queda definida como:

$$d_i(x) = \begin{cases} \left[\frac{\hat{Y}_i(x) - EL_i}{T_i - EL_i} \right]^s & \text{Si } EL_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq T_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i(x) - ES_i}{T_i - ES_i} \right]^t & \text{Si } T_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq ES_i \\ 0 & \text{Si } \hat{Y}_i(x) < EL_i \text{ o } \hat{Y}_i(x) > ES_i \end{cases}$$

Ecuación 11 Ecuación de deseabilidad individual

S y t son exponentes que modifican la transformación para reflejar de este modo los deseos del experimentador sobre cada Y. Si s o t son pequeños (0,1 aproximadamente) al experimentador le sirve cualquier valor que entre dentro de los límites de aceptabilidad; si s o t es 1, la deseabilidad crece linealmente conforme el resultado esperado se acerca más al valor nominal, y finalmente, si s o t es mayor que 1 ,(10) la deseabilidad solamente toma valores elevados cuando el valor esperado de la respuesta se encuentra cerca del valor nominal.

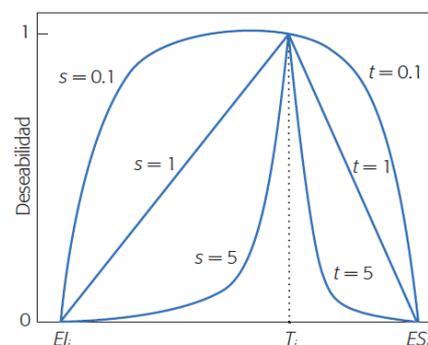


Ilustración 14 di en función de s, t

Una vez se tienen calculadas las diferentes deseabilidades individuales, se pasa a calcular la deseabilidad global dada por:

$$DG(x) = \left(\prod d_i^{w_i} \right)^{1/\sum w_i}$$

Ecuación 12 Deseabilidad general

Donde w_i son las constantes que permiten al experimentador asignar la importancia a las variables respuesta. Hay que tener en cuenta la diferencia entre s , t , y w ; mientras que s y t hacen referencia a la importancia de la proximidad al valor nominal (por encima, o por debajo de especificaciones).

Es interesante destacar que cuando una variable alcanza un valor objetivo y que no puede mejorar, $d=1$ y para los casos donde el valor es inaceptable $d=0$.

10.2.7. Estudio preliminar de los errores dimensionales

Tras la comprobación de la normalidad de los datos se realizará un estudio simple para conocer cuál es el mayor de los errores dimensionales en las tres direcciones estudiadas. Se realizará dicho estudio tanto para el error absoluto como para el error relativo.

Siendo

ϵ_{abs} : Error absoluto

ϵ_r : Error relativo

x_i : Medición

n : La cota nominal

$$\epsilon_{abs} = |x_i - n|$$

Ecuación 13 Error absoluto

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{abs}}{n}$$

Ecuación 14 Error relativo

11. RESULTADOS

11.1. Prueba de normalidad de los datos

A la hora de aplicar la técnica de estudio de datos conocida como Anova, es condición necesaria que los datos sean de tipo normal. Para comprobar que los datos son de tipo normal se realizan gráficas de probabilidad normal así como la evaluación del sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada. En caso de tratarse de datos no normales se aplicaría la transformación logarítmica para así convertirlos en normales.

11.1.1. Error dimensional largo

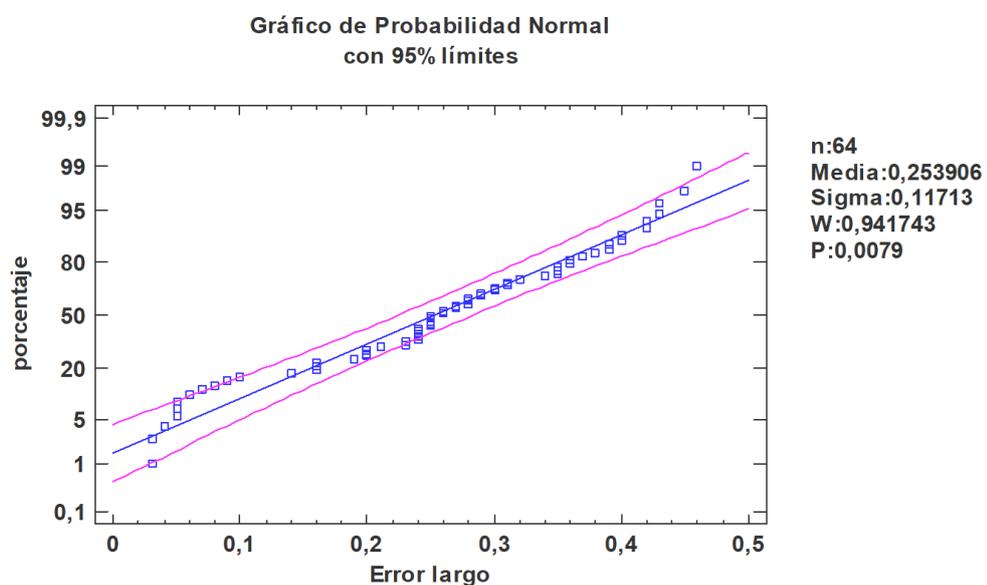


Gráfico 1 Prob.normal error largo

Resumen Estadístico para Error largo

Recuento	64
Promedio	0,253906
Mediana	0,255
Desviación Estándar	0,11713
Coefficiente de Variación	46,1312%
Mínimo	0,03
Máximo	0,46
Rango	0,43
Sesgo Estandarizado	-1,04571
Curtosis Estandarizada	-1,06856

Tabla 7 Resumen Estadístico para error largo

Tanto la inspección visual como el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada indican que el error de largo sigue una distribución normal.

11.1.2. Error dimensional ancho

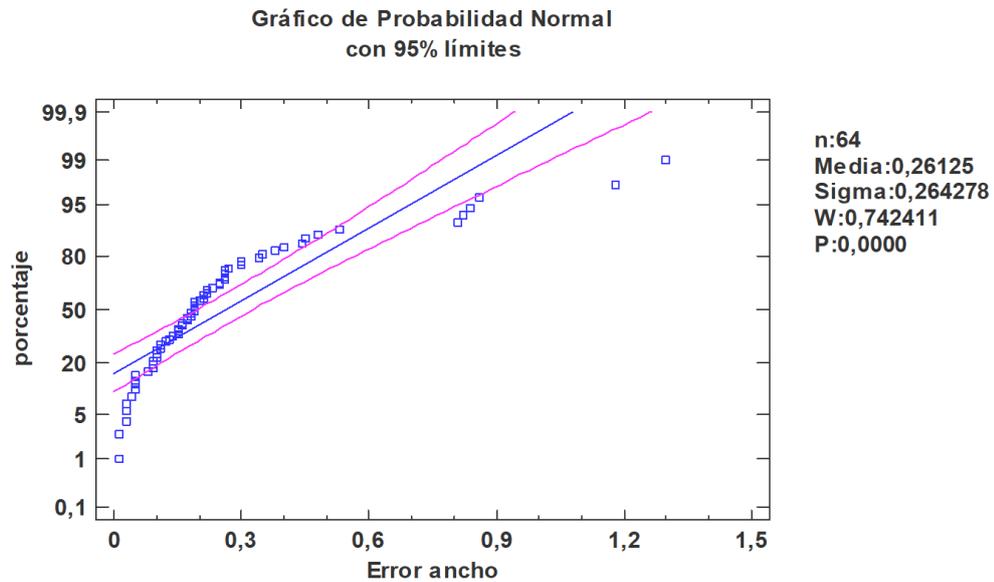


Gráfico 2 Prob.normal error ancho

Recuento	64
Promedio	0,26125
Mediana	0,19
Desviación Estándar	0,264278
Coefficiente de Variación	101,159%
Mínimo	0,01
Máximo	1,3
Rango	1,29
Sesgo Estandarizado	7,2968
Curtosis Estandarizada	8,60393

Tabla 8 Resumen Estadístico para error ancho

Como se observa ni el sesgo estandarizado ni la curtosis estandarizada están en los rangos propios de una distribución normal por lo tanto se procede a la transformación de los datos con la función logarítmica dando los siguientes resultados:

**Gráfico de Probabilidad Normal
con 95% límites**

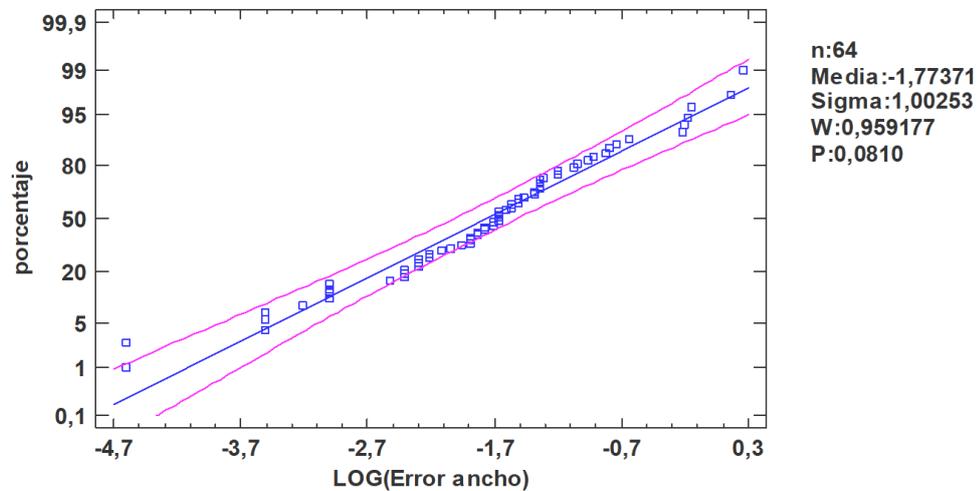


Gráfico 3 Prob.normal log(error ancho)

Resumen Estadístico para LOG(Error ancho)

Recuento	64
Promedio	-1,77371
Mediana	-1,66073
Desviación Estándar	1,00253
Coefficiente de Variación	-56,5219%
Mínimo	-4,60517
Máximo	0,262364
Rango	4,86753
Sesgo Estandarizado	-1,81215
Curtosis Estandarizada	1,44785

Tabla 9 Resumen Estadístico para Log(error ancho)

Como puede observarse a simple vista y Mediante el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada se llega a la conclusión que la transformación logarítmica del error del ancho da como resultado una distribución normal.

11.1.3. Error dimensional alto

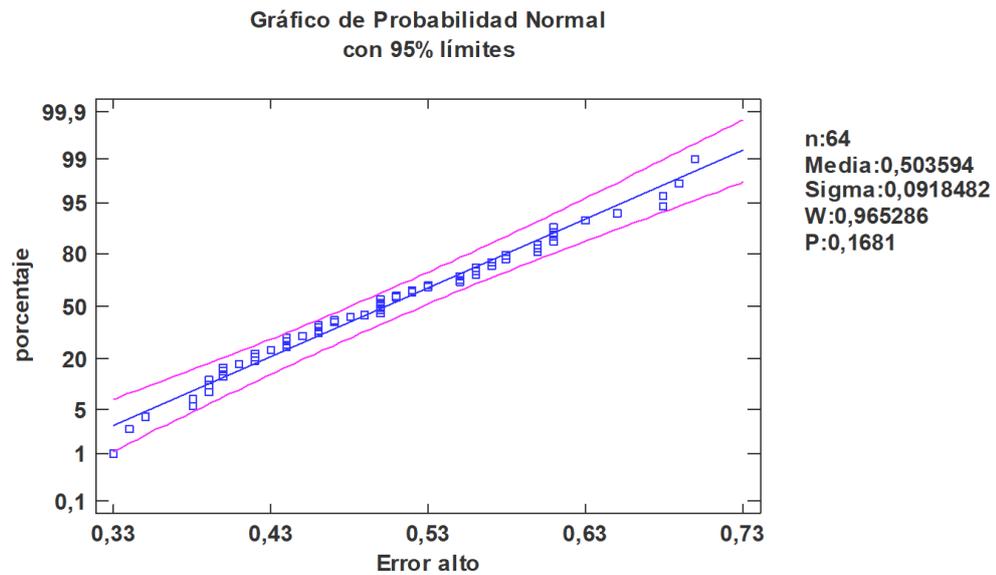


Gráfico 4 Prob.normal error alto

Resumen Estadístico para Error alto

Recuento	64
Promedio	0,503594
Mediana	0,5
Desviación Estándar	0,0918482
Coefficiente de Variación	18,2385%
Mínimo	0,33
Máximo	0,7
Rango	0,37
Sesgo Estandarizado	0,741889
Curtosis Estandarizada	-1,09192

Tabla 10 Resumen Estadístico para Error alto

Al contrario que el error de anchura el error de alto no requiere transformación alguna ya que como se ve en la gráfica y en el sesgo estandarizado más aparte la curtosis estandarizada analizadas comprendidas entre -2 y 2 la distribución del error de alto es de tipo normal.

11.1.4. Resiliencia

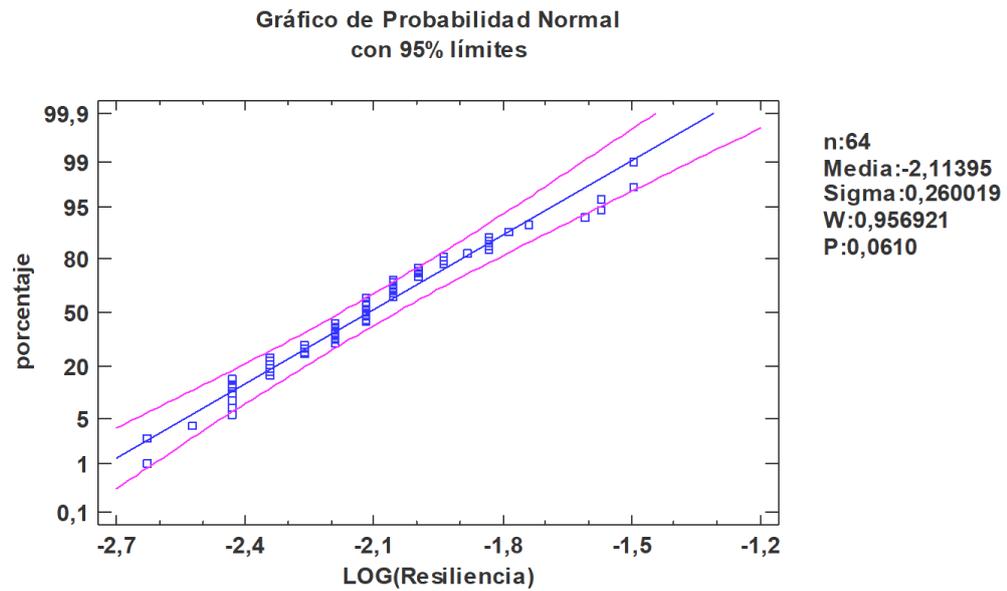


Gráfico 5 Prob.normal resiliencia

Resumen Estadístico para resiliencia

Recuento	64
Promedio	0,125
Mediana	0,12
Desviación Estándar	0,0348129
Coefficiente de Variación	27,8503%
Mínimo	0,072
Máximo	0,224
Rango	0,152
Sesgo Estandarizado	3,79217
Curtosis Estandarizada	2,12061

Tabla 11 Resumen Estadístico para resiliencia

Siguiendo con la forma de proceder anterior se observa que la resiliencia no es normal y se pasa a aplicar una transformación logarítmica.

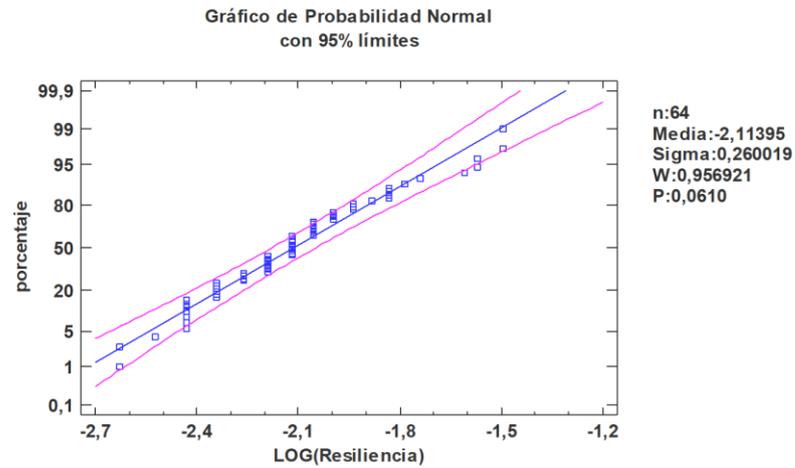


Gráfico 6 Prob.normal resiliencia

Resumen Estadístico para LOG(resiliencia con 0,016)

Recuento	64
Promedio	-2,11395
Mediana	-2,12026
Desviación Estándar	0,260019
Coefficiente de Variación	-12,3001%
Mínimo	-2,63109
Máximo	-1,49611
Rango	1,13498
Sesgo Estandarizado	1,45901
Curtosis Estandarizada	0,195268

Tabla 12 Resumen Estadístico para LOG(resiliencia con 0,016)

Y ahora los datos de resiliencia ya pueden ser tratados con el ANOVA ya que se trata de una variable normal.

11.1.5. Rugosidad media

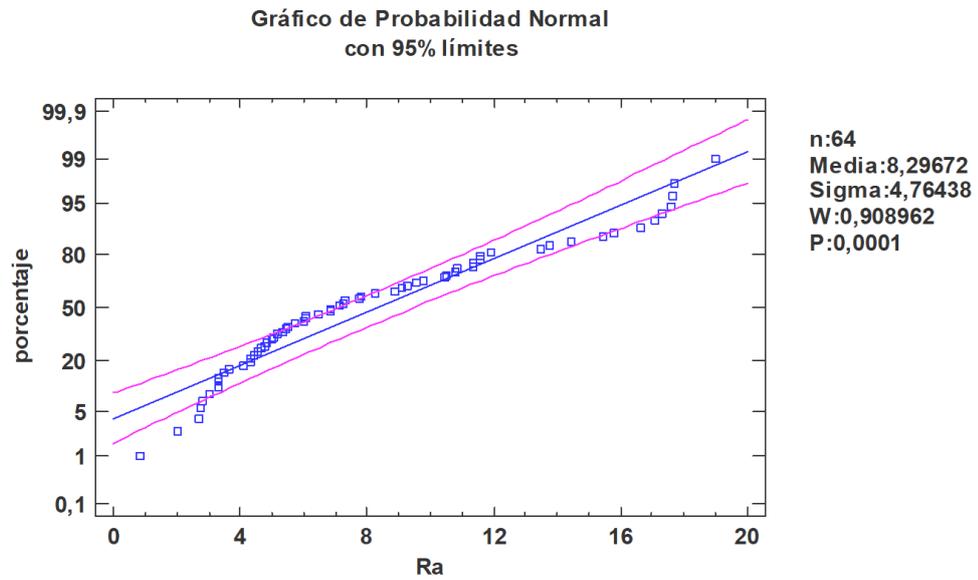


Gráfico 7 Prob.normal Ra

Resumen Estadístico para Ra

Recuento	64
Promedio	8,29672
Mediana	7,0
Desviación Estándar	4,76438
Coefficiente de Variación	57,4249%
Mínimo	0,84
Máximo	19,02
Rango	18,18
Sesgo Estandarizado	2,29908
Curtosis Estandarizada	-0,895713

Tabla 13Resumen Estadístico para Ra

Siguiendo con la forma de proceder anterior se observa que la rugosidad media no es normal y se pasa a aplicar una transformación logarítmica.

Gráfico de Probabilidad Normal
con 95% límites

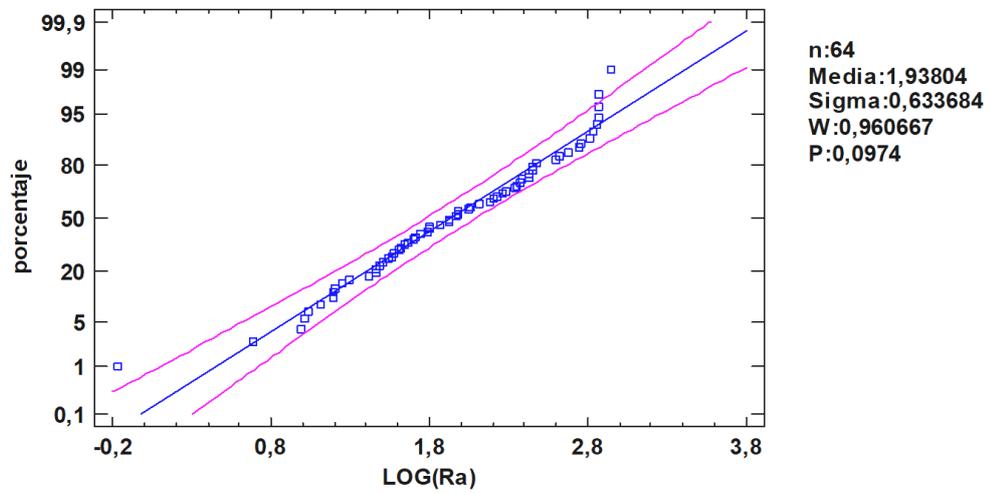


Gráfico 8 Prob.normal Log(Ra)

Resumen Estadístico para LOG(Ra)

Recuento	64
Promedio	1,93804
Mediana	1,94574
Desviación Estándar	0,633684
Coefficiente de Variación	32,6971%
Mínimo	-0,174353
Máximo	2,94549
Rango	3,11984
Sesgo Estandarizado	-1,73032
Curtosis Estandarizada	0,87978

Tabla 14 Resumen Estadístico para LOG(Ra)

11.1.6. Tiempo de impresión

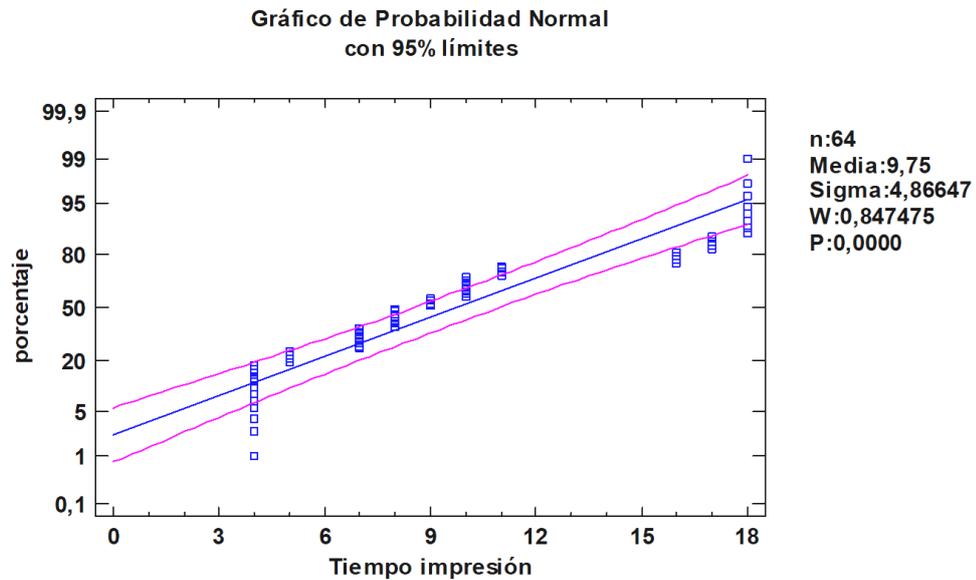


Gráfico 9 Prob.normal tiempo de impresión

Resumen Estadístico para Tiempo impresión

Recuento	64
Promedio	9,75506
Mediana	8,5045
Desviación Estándar	4,86623
Coefficiente de Variación	49,8842%
Mínimo	4,0
Máximo	18,01
Rango	14,01
Sesgo Estandarizado	1,89538
Curtosis Estandarizada	-1,58694

Tabla 15 Resumen Estadístico para Tiempo impresión

La inspección visual da pie a pensar que se trata de una variable no normal por eso se realiza una transformación.

Gráfico de Probabilidad Normal
con 95% límites

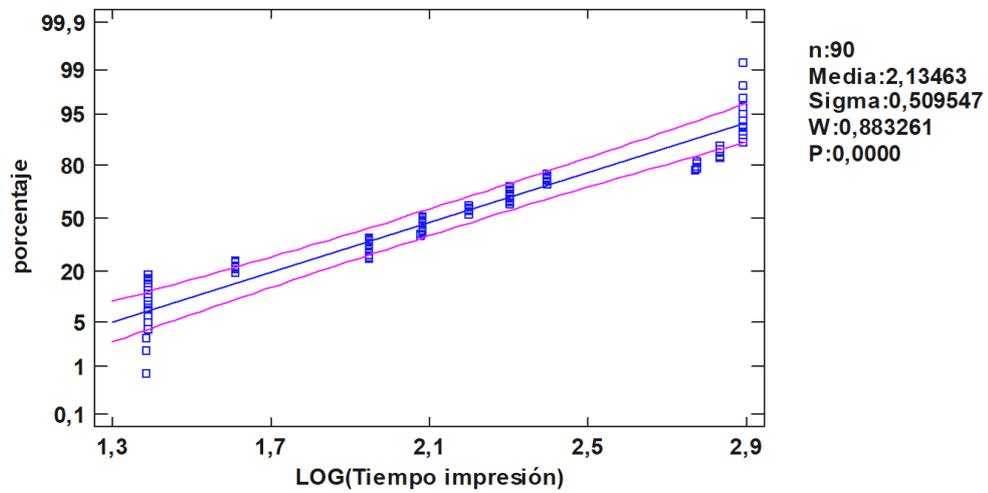


Gráfico 10 Prob.normal log(tiempo impresión)

Resumen Estadístico para LOG(Tiempo impresión)

Recuento	64
Promedio	2,15107
Mediana	2,1389
Desviación Estándar	0,51575
Coefficiente de Variación	23,9765%
Mínimo	1,38629
Máximo	2,89093
Rango	1,50463
Sesgo Estandarizado	-0,187544
Curtosis Estandarizada	-1,79358

Tabla 16 Resumen Estadístico para LOG(Tiempo impresión)

Y ahora si que se trata de una variable normal.

11.1.7. Peso (metros de hilo usado)

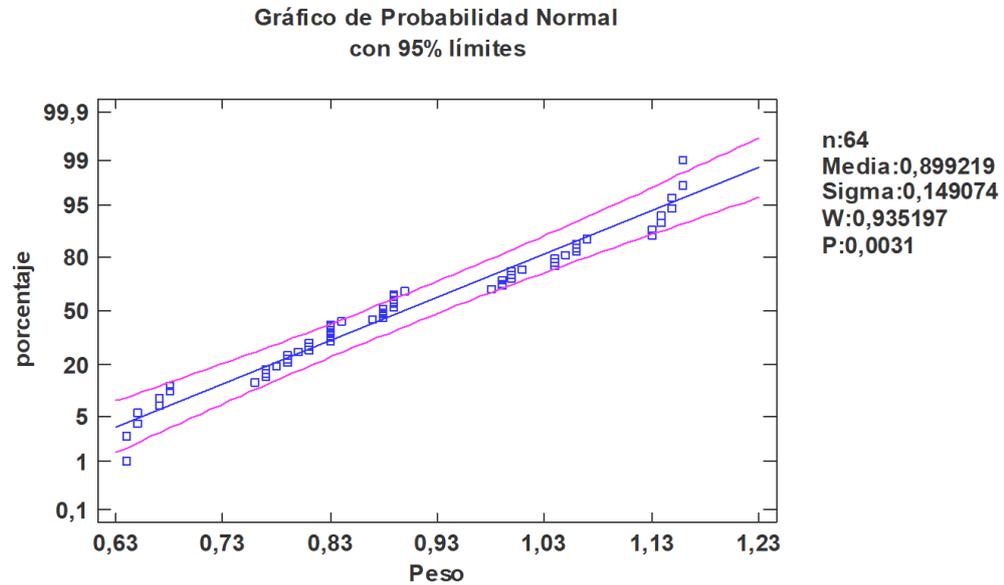


Gráfico 11 Prob.normal peso

Peso

Recuento	64
Promedio	0,899219
Mediana	0,88
Desviación Estándar	0,149074
Coefficiente de Variación	16,5782%
Mínimo	0,64
Máximo	1,16
Rango	0,52
Sesgo Estandarizado	0,396498
Curtosis Estandarizada	-1,44642

Tabla 17Resumen Estadístico para peso

A la vista de los resultados podemos concluir que la variable derivada peso (viene de los metros de hilo) se distribuye según una distribución normal.

11.1.8. Resumen de la normalidad en los datos

En el presente apartado se muestra una tabla en la que aparecen reflejados los factores, su distribución y si ha sido necesaria su transformación y cual.

Factor	Normalidad	Transformación	Normalidad tras la transformación
Error dimensional largo	Si	-	-
Error dimensional ancho	No	Logarítmica	si
Error dimensional alto	si	-	-
Resiliencia	No	Logarítmica	si
Rugosidad media	No	Logarítmica	si
Tiempo impresión	si	-	-
Peso	Si	-	-

Tabla 18 Resumen de la normalidad en los datos

11.2. Diferencias entre errores dimensionales

El Anova de los errores absolutos habiéndose realizado una transformación logarítmica a todos ellos para poder ser comparados:

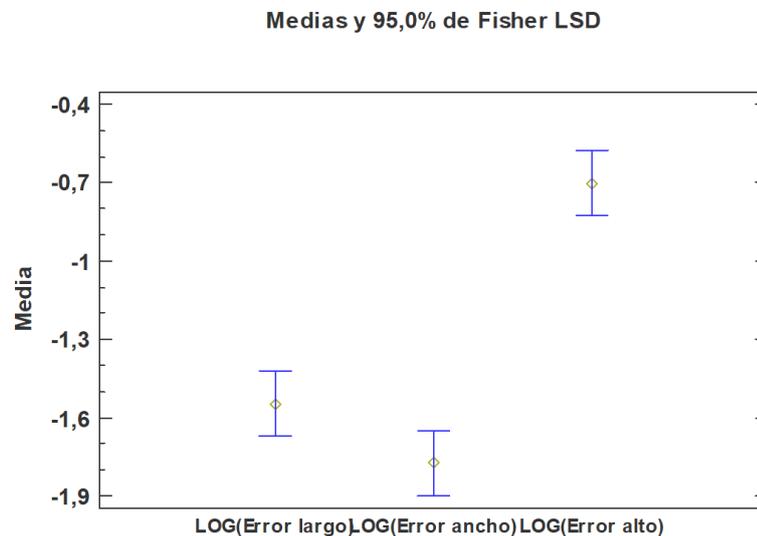


Gráfico 12 Intervalos LSD e.largo-e.ancho-e.alto

Comparación	Sigma1	Sigma2	F-Ratio	P-Valor
LOG(Error largo) / LOG(Error ancho)	0,696725	1,00253	0,482976	0,0044
LOG(Error largo) / LOG(Error alto)	0,696725	0,184155	14,3138	0,0000
LOG(Error ancho) / LOG(Error alto)	1,00253	0,184155	29,6366	0,0000

Tabla 19 Comparación errores

No se observa una superposición del error de largo y del error de ancho, lo que implica que existen diferencias significativas entre esos errores en cuanto a la media se refiere, sin embargo, los intervalos casi se tocan. No sucede lo mismo en cuanto se realiza esta comparación con el error de alto.

Estas diferencias pueden ser debidas a que tanto cuando se realizan las dimensiones ancho y largo se trabaja en un mismo plano usando el mismo tipo de solución técnica para el desplazamiento del extrusor, un sistema de correa dentada y motor paso a paso sin realimentación, mientras que cuando se realiza el movimiento vertical (impresión de la "altura") se emplea dos usillos roscados accionados por dos motores Nema17 sin realimentación.

11.3. Información análisis de cribado sin centros

11.3.1. Efectos significativos para error dimensional largo

11.3.1.1. Análisis de la varianza para error dimensional largo

Fuente	Suma Cuadrados	de	Gl	Cuadrado Medio	Razón- F	Valor- P
EFFECTOS PRINCIPALES						
A:Altura de capa	0,0356266		1	0,0356266	4,02	0,0521
B:Grosor pared	0,0236391		1	0,0236391	2,67	0,1106
C:Densidad relleno	0,0000765625		1	0,0000765625	0,01	0,9264
D:Flujo	0,0922641		1	0,0922641	10,42	0,0026
E:Velocidad	0,188139		1	0,188139	21,24	0,0000
INTERACCIONES						
AB	0,00878906		1	0,00878906	0,99	0,3255
AC	0,00406406		1	0,00406406	0,46	0,5023
AD	0,0337641		1	0,0337641	3,81	0,0583
AE	0,000126562		1	0,000126562	0,01	0,9055
BC	0,0147016		1	0,0147016	1,66	0,2054
BD	0,000451562		1	0,000451562	0,05	0,8226
BE	0,00832656		1	0,00832656	0,94	0,3384
CD	0,00213906		1	0,00213906	0,24	0,6260
CE	0,00926406		1	0,00926406	1,05	0,3129
DE	0,00975156		1	0,00975156	1,10	0,3007
ABC	0,00131406		1	0,00131406	0,15	0,7023
ABD	0,00262656		1	0,00262656	0,30	0,5893
ABE	0,000564062		1	0,000564062	0,06	0,8021
ACD	0,0141016		1	0,0141016	1,59	0,2147
ACE	0,00701406		1	0,00701406	0,79	0,3791
ADE	0,00926406		1	0,00926406	1,05	0,3129
BCD	0,00316406		1	0,00316406	0,36	0,5536
BCE	0,0276391		1	0,0276391	3,12	0,0854
BDE	0,0206641		1	0,0206641	2,33	0,1350
CDE	0,0102516		1	0,0102516	1,16	0,2888
RESIDUOS	0,336597		38	0,00885781		
TOTAL (CORREGIDO)	0,864323		63			

Tabla 20 de la varianza para error dimensional largo

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0916476	67,93%	38,78%	0,00%

Tabla 21 Resumen modelo para error dimensional largo

11.3.1.2. Diagrama Pareto para error dimensional largo

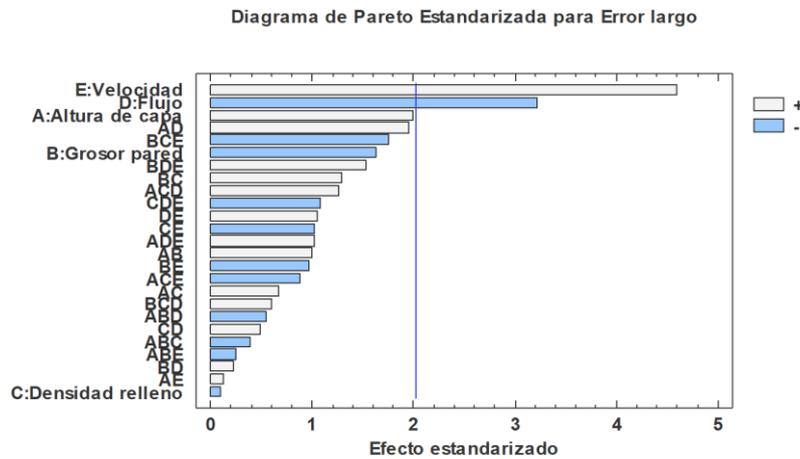


Gráfico 13 Pareto para e.largo

Se observa que los factores significativos son el flujo y la velocidad. Y para reducir el error se debería tomar una velocidad a nivel bajo, y un flujo a nivel alto. Este resultado puede entrar en contradicción con resultados posteriores lo que implica que la orientación de la pieza en la cama caliente es determinante a la hora de obtener un mayor o menor error.

Niveles seleccionados	
Factor	nivel
A: Altura de capa	*
B: Grosor de pared	*
C: Densidad de relleno	*
D: Flujo	+
E: Velocidad	-

Tabla 22 Niveles seleccionados para e.largo

11.3.1.3. Intervalos LSD para error dimensional largo

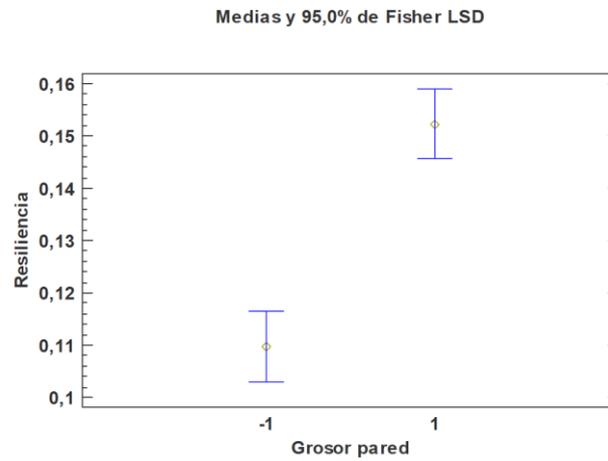


Gráfico 14 Intervalos LSD para resiliencia/grosor pared

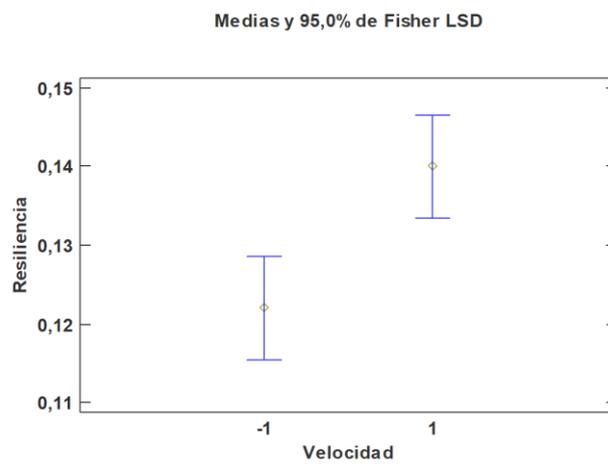


Gráfico 15 Intervalos LSD para resiliencia/velocidad

11.3.1.4. Gráficos de interacciones para error dimensional largo

No se presentan interacciones entre factores.

11.3.2. Efectos significativos para log (error dimensional ancho)

11.3.2.1. Análisis de la varianza para log (error dimensional ancho)

Fuente	Suma de Cuadrados	de	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES						
A:Altura de capa	2,80579		1	2,80579	5,49	0,0244
B:Grosor pared	0,765754		1	0,765754	1,50	0,2283
C:Densidad relleno	0,239647		1	0,239647	0,47	0,4975
D:Flujo	6,60047		1	6,60047	12,92	0,0009
E:Velocidad	20,5006		1	20,5006	40,14	0,0000
INTERACCIONES						
AB	2,65767		1	2,65767	5,20	0,0282
AC	0,818124		1	0,818124	1,60	0,2134
AD	1,06854		1	1,06854	2,09	0,1563
AE	1,0181		1	1,0181	1,99	0,1661
BC	0,814689		1	0,814689	1,60	0,2143
BD	0,170453		1	0,170453	0,33	0,5669
BE	0,900811		1	0,900811	1,76	0,1921
CD	0,144522		1	0,144522	0,28	0,5979
CE	0,00863535		1	0,00863535	0,02	0,8972
DE	0,671023		1	0,671023	1,31	0,2589
ABC	0,0980918		1	0,0980918	0,19	0,6637
ABD	0,745094		1	0,745094	1,46	0,2346
ABE	0,579641		1	0,579641	1,13	0,2935
ACD	0,0216405		1	0,0216405	0,04	0,8380
ACE	1,07146		1	1,07146	2,10	0,1557
ADE	0,40639		1	0,40639	0,80	0,3780
BCD	1,03447		1	1,03447	2,03	0,1629
BCE	0,689742		1	0,689742	1,35	0,2525
BDE	0,0727223		1	0,0727223	0,14	0,7080
CDE	0,00631409		1	0,00631409	0,01	0,9121
RESIDUOS	19,4092		38	0,510769		
TOTAL (CORREGIDO)	63,3196		63			

Tabla 23 Análisis de la varianza para log (error dimensional ancho)

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,710515	73,69%	49,77%	1,04%

Tabla 24 Resumen modelo para log (error dimensional ancho)

11.3.2.2. Diagrama Pareto para error dimensional log (error dimensional ancho)

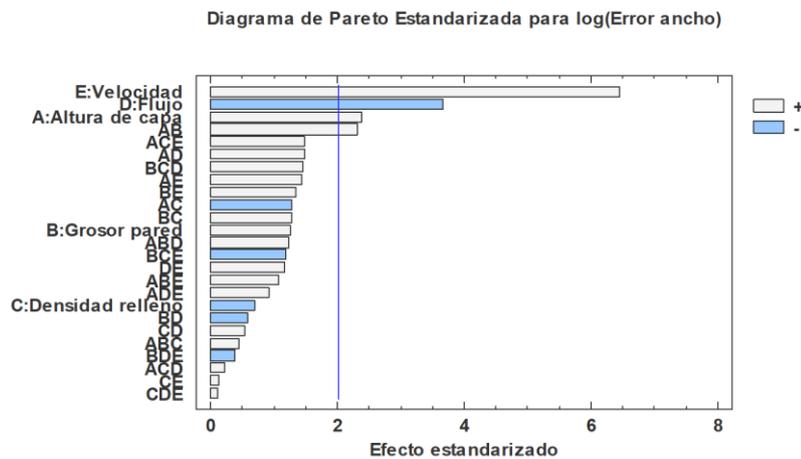


Gráfico 16 Pareto para log(e.ancho)

Se observa que los factores significativos son la altura de capa el flujo, la velocidad y la interacción altura de capa-grosor de pared.

A mayor velocidad, altura de capa y la combinación de altura de capa y grosor de pared (a niveles altos o bajos ambos) el error es mayor, sucede lo contrario con el flujo, el cual cuanto más bajo sea, el error también se verá reducido; esto puede deberse a que un flujo excesivo genera rebabas. En lo referente a la velocidad, puede que una mayor velocidad este relacionada con unas mayores vibraciones de la impresora lo que incurriría en un mayor error.

Niveles seleccionados	
Factor	nivel
A: Altura de capa	-
B: Grosor de pared	*
C: Densidad de relleno	*
D: Flujo	+
E: Velocidad	-

Tabla 25 Niveles seleccionados para e.ancho

11.3.2.3. Intervalos LSD para log (error dimensional ancho)

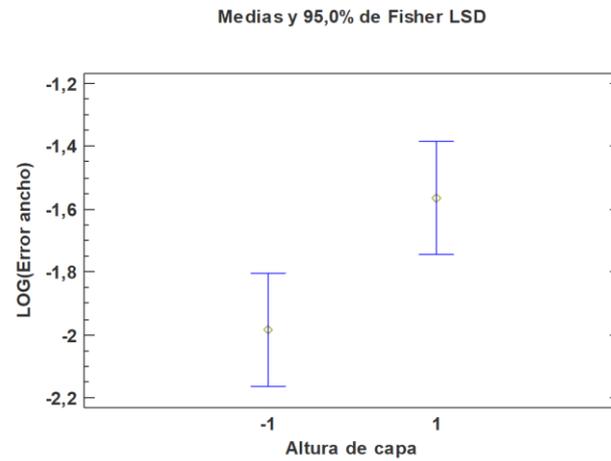


Gráfico 17 Intervalos LSD para Log(e.ancho)/ altura capa

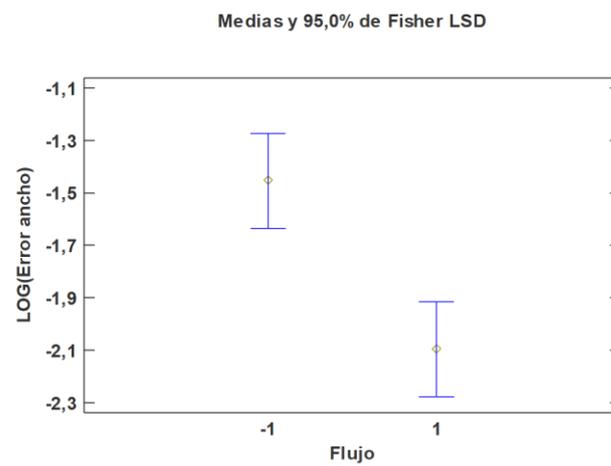


Gráfico 18 Intervalos LSD para Log(e.ancho)/ flujo

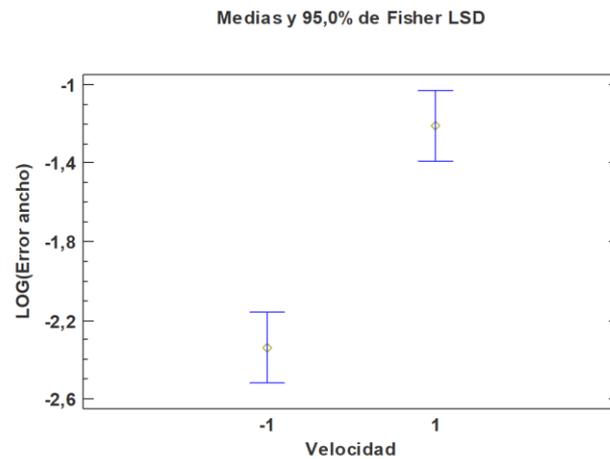


Gráfico 19 Intervalos LSD para $\text{Log}(e.\text{ancho})/ \text{velocidad}$

11.3.2.4. Gráficos de interacciones para log (error dimensional ancho)

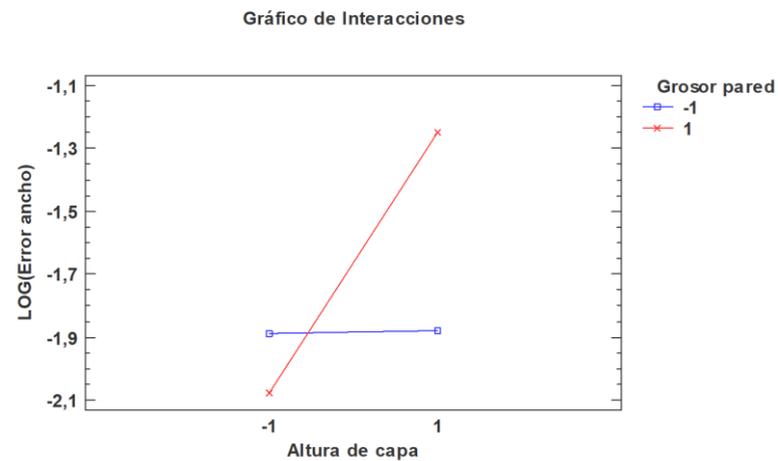


Gráfico 20 Interacciones $\text{Log}(e.\text{ancho})/ \text{altura capa y grosor pared}$

11.3.3. Efectos significativos para error dimensional alto

11.3.3.1. Análisis de la varianza para error dimensional alto

Fuente	Suma Cuadrados	de	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES						
A:Altura de capa	0,0252016		1	0,0252016	8,87	0,0050
B:Grosor pared	0,0582016		1	0,0582016	20,48	0,0001

C:Densidad relleno	0,00472656	1	0,00472656	1,66	0,2050
D:Flujo	0,192502	1	0,192502	67,74	0,0000
E:Velocidad	0,0523266	1	0,0523266	18,41	0,0001
INTERACCIONES					
AB	0,00170156	1	0,00170156	0,60	0,4438
AC	0,00170156	1	0,00170156	0,60	0,4438
AD	0,0301891	1	0,0301891	10,62	0,0024
AE	0,00150156	1	0,00150156	0,53	0,4717
BC	0,000976563	1	0,000976563	0,34	0,5612
BD	0,000564063	1	0,000564063	0,20	0,6585
BE	0,000689063	1	0,000689063	0,24	0,6253
CD	0,0102516	1	0,0102516	3,61	0,0651
CE	0,0000015625	1	0,0000015625	0,00	0,9814
DE	0,0147016	1	0,0147016	5,17	0,0287
ABC	0,00262656	1	0,00262656	0,92	0,3424
ABD	0,00375156	1	0,00375156	1,32	0,2577
ABE	0,00406406	1	0,00406406	1,43	0,2391
ACD	0,0000390625	1	0,0000390625	0,01	0,9073
ACE	0,00150156	1	0,00150156	0,53	0,4717
ADE	0,00288906	1	0,00288906	1,02	0,3197
BCD	0,00878906	1	0,00878906	3,09	0,0867
BCE	0,000689063	1	0,000689063	0,24	0,6253
BDE	0,00345156	1	0,00345156	1,21	0,2774
CDE	0,000451563	1	0,000451563	0,16	0,6924
RESIDUOS	0,107984	38	0,00284169		
TOTAL (CORREGIDO)	0,531473	63			

Tabla 26 Análisis de la varianza para error dimensional alto

Los efectos significativos para el error dimensional son la altura de capa, el grosor de pared, el flujo, la velocidad y las interacciones altura de capa-flujo, velocidad-flujo.

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0563845	80,26%	62,31%	25,75%

Tabla 27 Resumen modelo para error dimensional alto

11.3.3.2. Diagrama Pareto para error dimensional alto

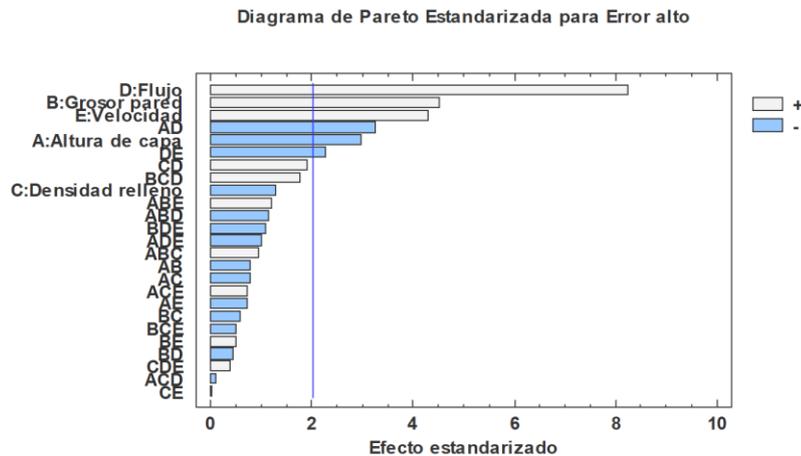


Gráfico 21 Pareto para error alto

Se ve como el flujo, cuanto más grande sea, más error producirá, eso puede deberse a las rebabas. Por otro lado, un mayor grosor de pared y una velocidad alta, darán como resultado un mayor error, no siendo así cuando se combinan el flujo y la velocidad a distintos niveles, lo que da pie a pensar que una mayor velocidad disminuirá las rebabas de un mayor flujo. La altura de capa, cuanto más pequeña sea, menor será el error producido.

Niveles seleccionados	
Factor	nivel
A: Altura de capa	+
B: Grosor de pared	-
C: Densidad de relleno	*
D: Flujo	-
E: Velocidad	-

Tabla 28 Niveles seleccionados para e.alto

11.3.3.3. Intervalos LSD para error dimensional alto

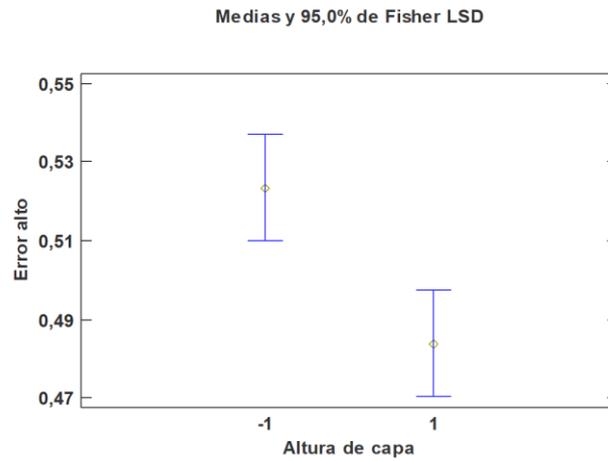


Gráfico 22 Intervalos LSD para error alto/altura capa

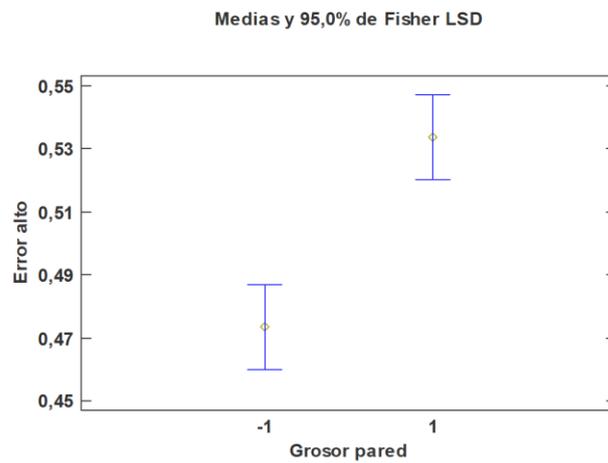


Gráfico 23 Intervalos LSD para error alto/grosor pared

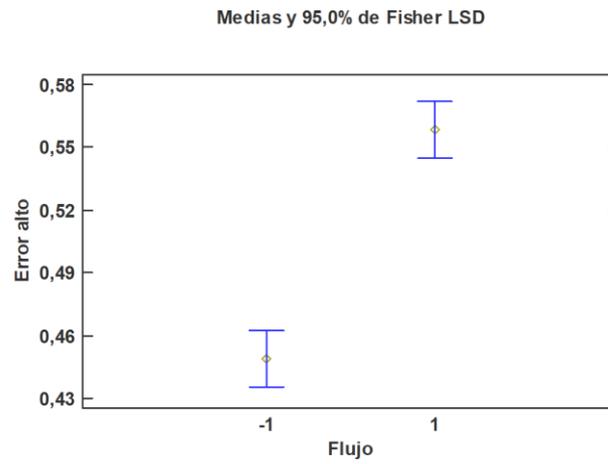


Gráfico 24 Intervalos LSD para error alto/flujo

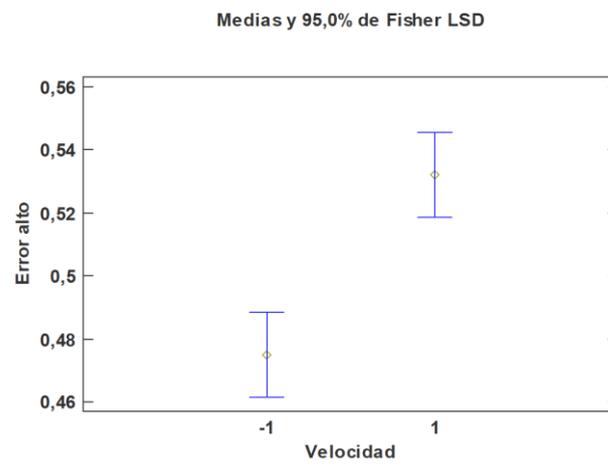


Gráfico 25 Intervalos LSD para error alto/ velocidad

11.3.3.4. Gráficos de interacciones para error dimensional alto

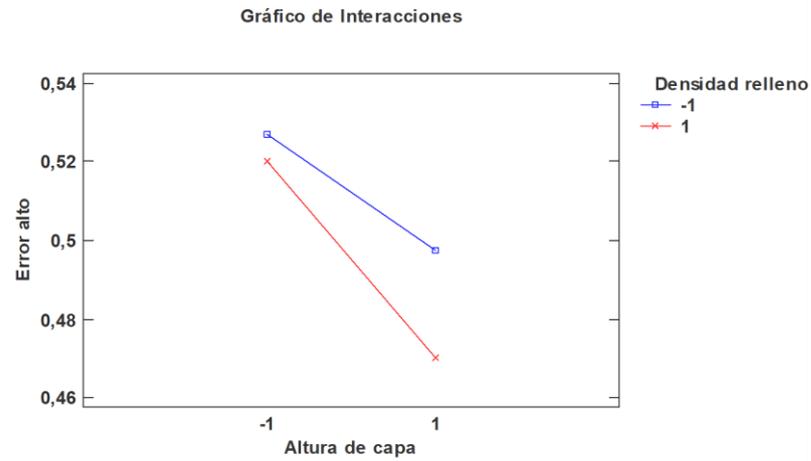


Gráfico 26 Interacciones e.alto/altura capa/densidad relleno

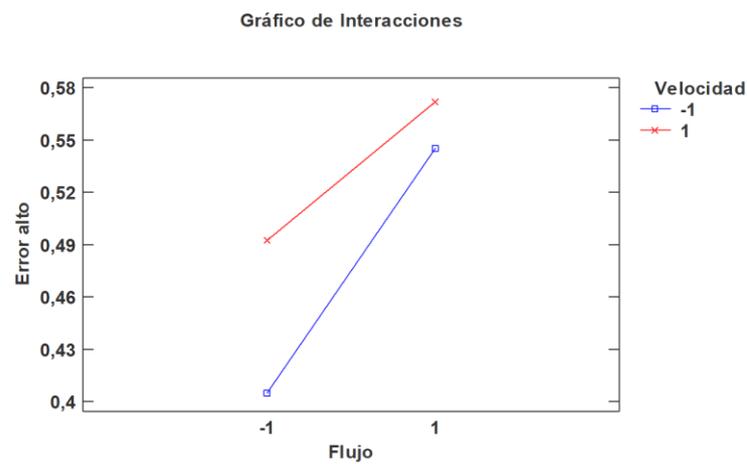


Gráfico 27 Interacciones e.alto/flujo/velocidad

11.3.4. Efectos significativos para LOG(Resiliencia)

11.3.4.1. Análisis de Varianza para LOG(resiliencia)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor-P	Fuente	Suma de Cuadrados
A:Altura de capa	0,0926687	1	0,0926687	3,36	0,0760	A:Altura de capa	0,0926687
B:Grosor pared	1,75715	1	1,75715	63,76	0,0000	B:Grosor pared	1,75715
C:Densidad relleno	0,0125634	1	0,0125634	0,46	0,5044	C:Densidad relleno	0,0125634
D:Flujo	0,00679565	1	0,00679565	0,25	0,6229	D:Flujo	0,00679565
E:Velocidad	0,225884	1	0,225884	8,20	0,0073	E:Velocidad	0,225884
AB	0,0443	1	0,0443	1,61	0,2140	AB	0,0443
AC	0,000682595	1	0,000682595	0,02	0,8759	AC	0,000682595
AD	0,0110495	1	0,0110495	0,40	0,5311	AD	0,0110495
AE	0,0000251966	1	0,0000251966	0,00	0,9761	AE	0,0000251966
BC	0,000296532	1	0,000296532	0,01	0,9180	BC	0,000296532
BD	0,219313	1	0,219313	7,96	0,0082	BD	0,219313
BE	0,251334	1	0,251334	9,12	0,0049	BE	0,251334
CD	0,0346496	1	0,0346496	1,26	0,2705	CD	0,0346496
CE	0,00681658	1	0,00681658	0,25	0,6224	CE	0,00681658
DE	0,232721	1	0,232721	8,44	0,0066	DE	0,232721
ABC	0,070137	1	0,070137	2,54	0,1205	ABC	0,070137
ABD	0,0208804	1	0,0208804	0,76	0,3905	ABD	0,0208804
ABE	0,0202802	1	0,0202802	0,74	0,3974	ABE	0,0202802
ACD	0,0861117	1	0,0861117	3,12	0,0867	ACD	0,0861117
ACE	0,000121267	1	0,000121267	0,00	0,9475	ACE	0,000121267

ADE	0,0487783	1	0,0487783	1,77	0,1928	ADE	0,0487783
BCD	0,0247943	1	0,0247943	0,90	0,3500	BCD	0,0247943
BCE	0,0584487	1	0,0584487	2,12	0,1550	BCE	0,0584487
BDE	0,0239666	1	0,0239666	0,87	0,3580	BDE	0,0239666
CDE	0,0065481	1	0,0065481	0,24	0,6293	CDE	0,0065481
ABCD	0,0119668	1	0,0119668	0,43	0,5146	ABCD	0,0119668
ABCE	0,0197341	1	0,0197341	0,72	0,4037	ABCE	0,0197341
ABDE	0,00892319	1	0,00892319	0,32	0,5733	ABDE	0,00892319
ACDE	0,0340828	1	0,0340828	1,24	0,2744	ACDE	0,0340828
BCDE	0,0097532	1	0,0097532	0,35	0,5561	BCDE	0,0097532
bloques	0,0367374	1	0,0367374	1,33	0,2568	bloques	0,0367374
Error total	0,88189	32	0,0275591			Error total	0,88189
Total (corr.)	4,25941	63				Total (corr.)	4,25941
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor-P	Fuente	Suma de Cuadrados

Tabla 29 Análisis de Varianza para LOG(resiliencia)

Efecto	Coefficiente	Contribución relativa
B:Grosor pared	0,157918	0,40659761
BE	0,0603258	0,15532318
DE	-0,0575071	0,14806577
E:Velocidad	0,0570029	0,14676758
BD	-0,0556351	0,14324585

Tabla 30 Resumen LOG(resiliencia)

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0724598	78,43%	58,83%	18,88%

Tabla 31 Resumen modelo para LOG(resiliencia)

Efectos a estudiar: Grosor pared(B), Velocidad (E), flujo(D) y las interacciones: BE, DE, BD.

11.3.4.2. Diagrama Pareto para LOG(Resiliencia)

Diagrama de Pareto Estandarizada para LOG(Resiliencia)

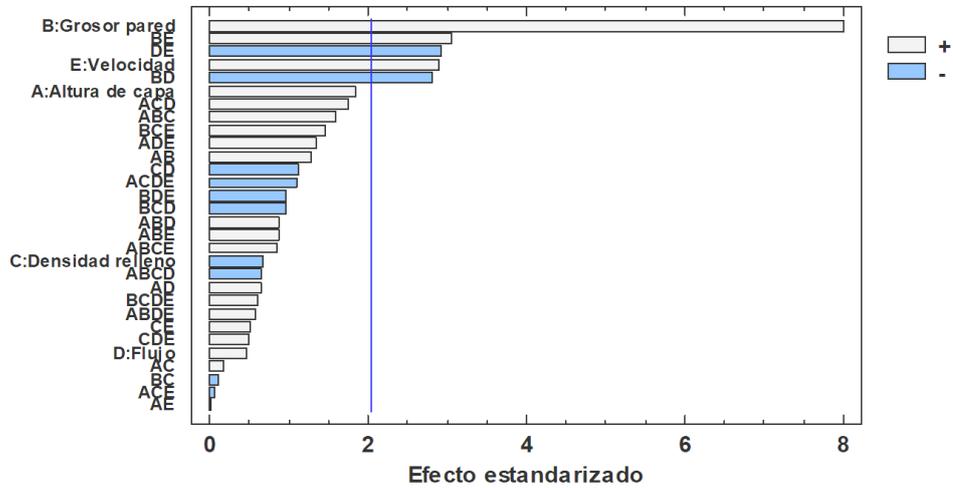


Gráfico 28 Pareto log(resiliencia)

Como era de esperar, un mayor grosor de pared implicará una mayor resistencia al impacto. Se vuelve manifiestamente interesante como seleccionar niveles iguales para velocidad y grosor de pared conllevan una mayor resiliencia, al contrario que cuando se seleccionan niveles diferentes de velocidad y flujo o flujo y grosor de pared.

Niveles seleccionados	
Factor	nivel
A: Altura de capa	*
B: Grosor de pared	+
C: Densidad de relleno	*
D: Flujo	+
E: Velocidad	-

Tabla 32 Niveles seleccionados para resiliencia

11.3.4.3. Intervalos LSD para LOG(Resiliencia)

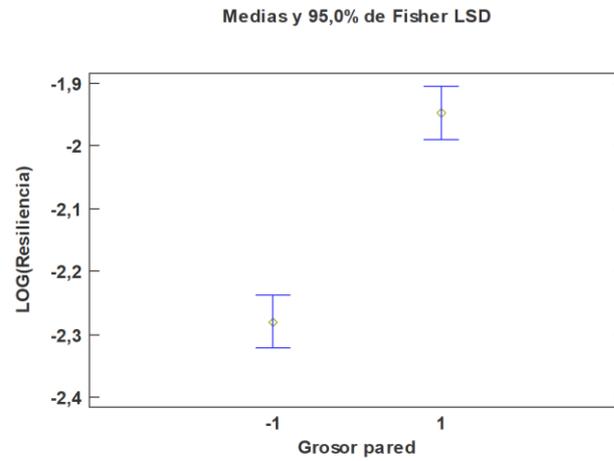


Gráfico 29 Intervalos LSD log(resiliencia)/grosor pared

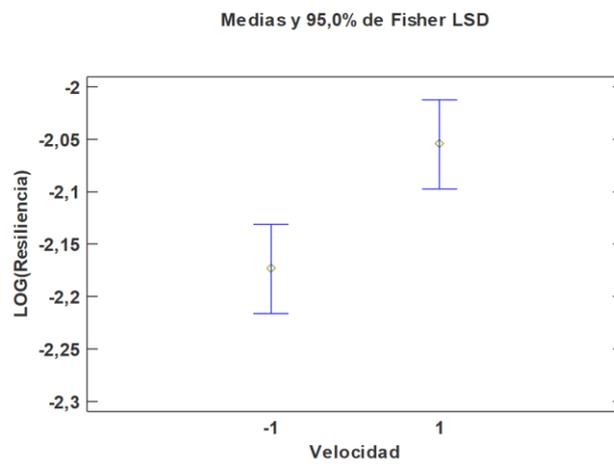


Gráfico 30 Intervalos LSD log(resiliencia)/velocidad

11.3.4.4. Gráficos de interacciones para LOG(Resiliencia)

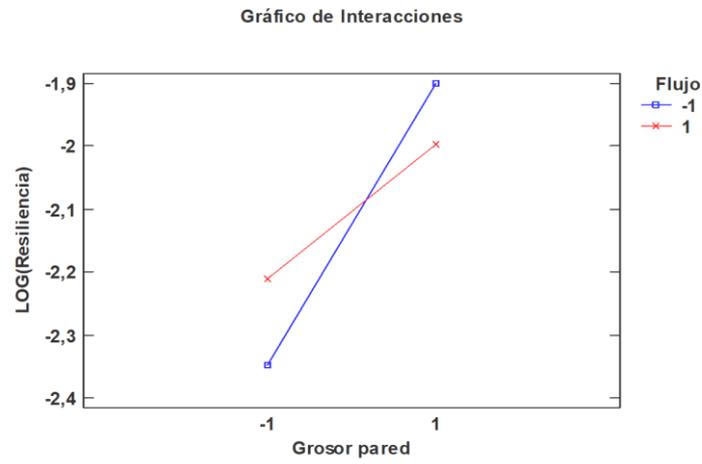


Gráfico 31 interacciones log(resiliencia)/grosor pared/flujo

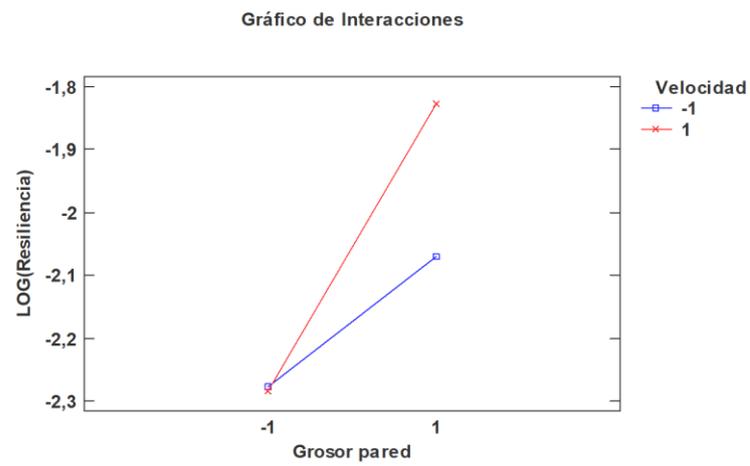


Gráfico 32 interacciones log(resiliencia)/grosor pared/velocidad

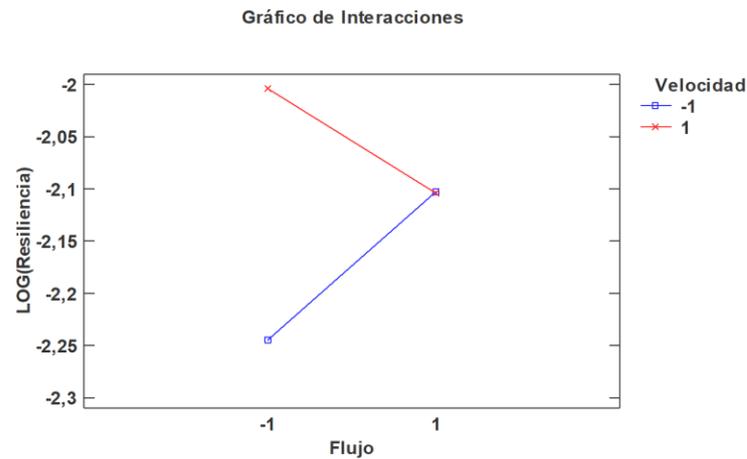


Gráfico 33 interacciones log(resiliencia)/flujo/velocidad

11.3.5. Efectos significativos log(rugosidad media)

11.3.5.1. Análisis de la varianza para Log(Ra)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor-P		
EFECTOS PRINCIPALES							Coeficientes
A:Altura capa	5,31343	1	5,31343	23,24	0,0000	A:Altura de capa	0,288136
B:Grosor pared	0,962182	1	0,962182	4,21	0,0482	B:Grosor pared	0,122614
C:Densidad relleno	0,527062	1	0,527062	2,31	0,1384	C:Densidad relleno	-0,0907488
D:Flujo	0,00564323	1	0,00564323	0,02	0,8761	D:Flujo	0,00939018
E:Velocidad	4,17475	1	4,17475	18,26	0,0002	E:Velocidad	0,255403
INTERACCIONES							
AB	0,0134841	1	0,0134841	0,06	0,8096	AB	0,0145151
AC	0,271581	1	0,271581	1,19	0,2836	AC	-0,0651418
AD	1,45563	1	1,45563	6,37	0,0166	AD	-0,150812
AE	0,557799	1	0,557799	2,44	0,1278	AE	0,0933575
BC	0,0316087	1	0,0316087	0,14	0,7124	BC	0,0222235

BD	0,0551128	1	0,0551128	0,24	0,626 7	BD	0,0293452
BE	0,0590222	1	0,0590222	0,26	0,614 8	BE	-0,0303681
CD	0,440616	1	0,440616	1,93	0,174 3	CD	0,0829737
CE	0,0379474	1	0,0379474	0,17	0,686 3	CE	0,0243501
DE	0,0084006 9	1	0,0084006 9	0,04	0,849 2	DE	-0,0114569
ABC	0,453284	1	0,453284	1,98	0,168 5	ABC	0,084158
ABD	0,386834	1	0,386834	1,69	0,202 3	ABD	-0,077745
ABE	0,258328	1	0,258328	1,13	0,295 5	ABE	-0,0635325
ACD	0,24638	1	0,24638	1,08	0,306 8	ACD	-0,0620458
ACE	0,109157	1	0,109157	0,48	0,494 4	ACE	-0,0412987
ADE	0,313272	1	0,313272	1,37	0,250 1	ADE	-0,0699634
BCD	0,132789	1	0,132789	0,58	0,451 4	BCD	-0,0455502
BCE	0,0140465	1	0,0140465	0,06	0,805 8	BCE	-0,0148147
BDE	1,09495	1	1,09495	4,79	0,035 8	BDE	0,1308
CDE	0,257908	1	0,257908	1,13	0,295 9	CDE	-0,0634808
ABCD	0,04891	1	0,04891	0,21	0,646 7	ABCD	0,0276445
ABCE	0,244067	1	0,244067	1,07	0,309 0	ABCE	-0,061754
ABDE	0,0717027	1	0,0717027	0,31	0,579 2	ABDE	-0,0334717
ACDE	0,185318	1	0,185318	0,81	0,374 5	ACDE	-0,0538107
BCDE	0,0226251	1	0,0226251	0,10	0,755 1	BCDE	-0,0188021
RESIDUOS	7,54417	3 3	0,228611				
TOTAL (CORREGIDO)	25,298	6 3					

Tabla 33 Análisis de la varianza para Log(Ra)

Factor	coeficiente	contribución relativa
A:Altura capa	0,288136	0,304016291
E:Velocidad	0,255403	0,269479249
AD	-0,150812	0,159123833
BDE	0,1308	0,138008895
B:Grosor pared	0,122614	0,129371732

Tabla 34 Resumen coeficientes para Log(Ra)

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,207651	70,18%	43,07%	0,00%

Tabla 35 Resumen modelo para Log(Ra)

Efectos a estudiar: Grosor pared (B), Velocidad (E), flujo(D), Altura de capa (A) y las interacciones: AD,BDE.

11.3.5.1. Diagrama de Pareto para Log(Ra)

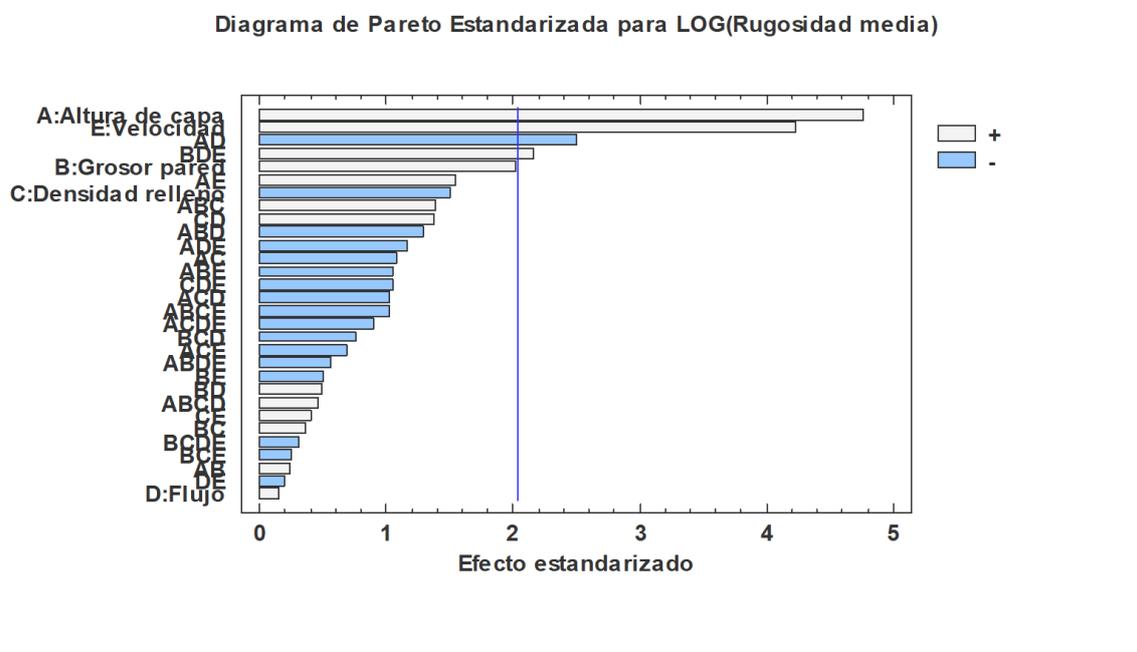


Gráfico 34 Pareto para Ra

Como se podía imaginar a mayor altura de capa, y mayor velocidad, la rugosidad es mayor, pero en el momento que se ponen a idénticos niveles la altura de capa y el flujo, con, altura de capa baja, y poco flujo, la rugosidad disminuye. Si lo que queremos es tener una rugosidad baja, se

deberían seleccionar altura de capa baja, velocidad baja, y flujo alto, así además, la interacción BDE saldría negativa y tendríamos una pieza con mejor acabado.

Niveles seleccionados	
Factor	nivel
A: Altura de capa	*
B: Grosor de pared	*
C: Densidad de relleno	*
D: Flujo	+
E: Velocidad	-

Tabla 36 Niveles seleccionados para rugosidad media

11.3.5.1. Intervalos LSD para Log(Ra)

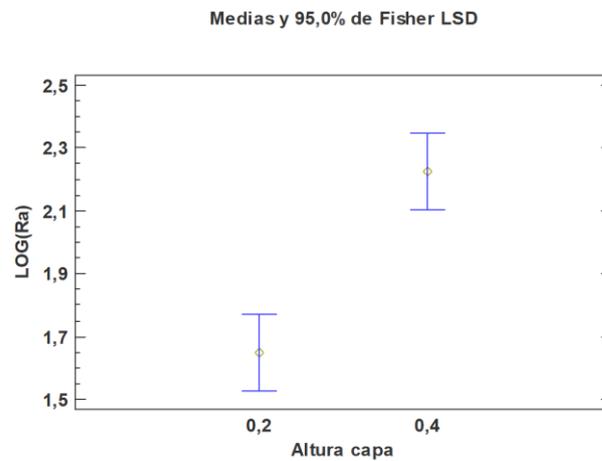


Gráfico 35 Intervalo LSD para Log(ra)/altura capa

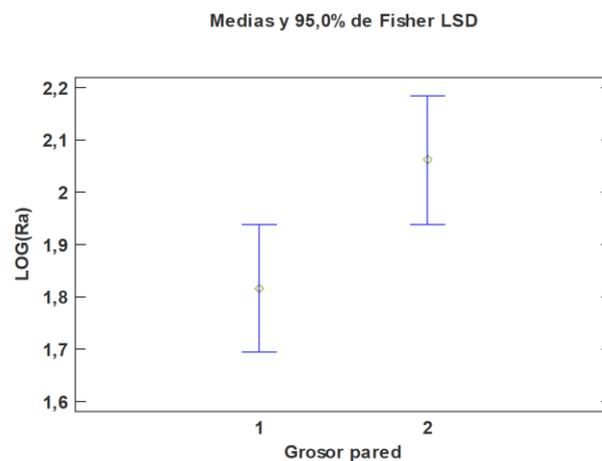


Gráfico 36 Intervalo LSD para Log(ra)/Grosor pared

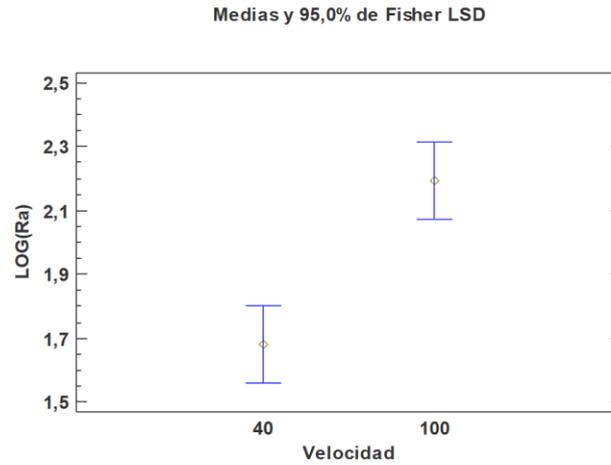


Gráfico 37 Intervalo LSD para Log(ra)/velocidad

11.3.5.1. Gráficos de interacciones de Log(Ra)

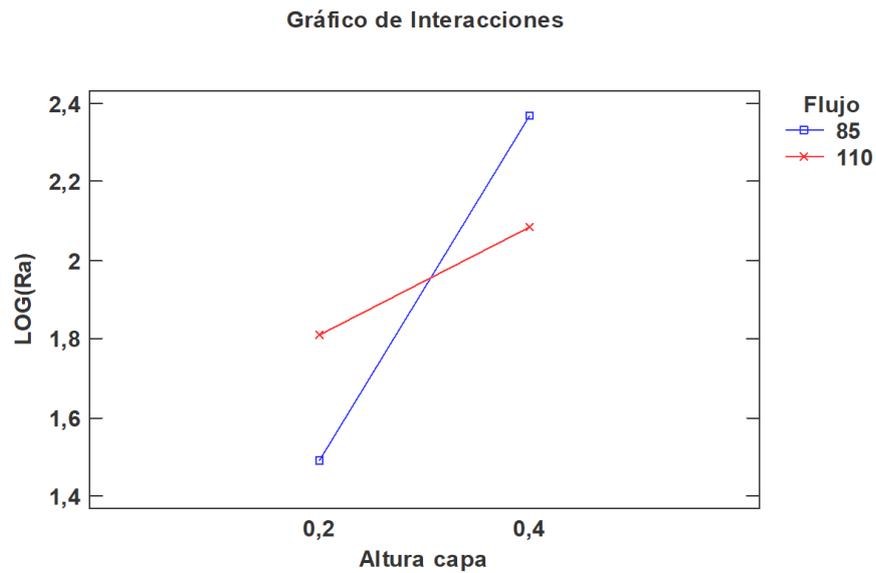


Gráfico 38 Interacciones para log(Ra)/altura capa/flujo

11.3.6. Efectos significativos LOG (tiempo de impresión)

11.3.6.1. Análisis de la varianza para Tiempo de impresión

Análisis de Varianza para Tiempo impresión - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	G l	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor -P		
EFFECTOS PRINCIPALES							coeficientes
A:Altura capa	4,98539	1	4,98539	13648917,71	0,0000	A:Altura de capa	-0,2791
B:Grosor pared	0,0583683	1	0,0583683	159799,75	0,0000	B:Grosor pared	0,0301994
C:Densidad relleno	0,187348	1	0,187348	512918,43	0,0000	C:Densidad relleno	0,0541046
D:Flujo	4,5991E-9	1	4,5991E-9	0,01	0,9113	D:Flujo	-0,00000847708
E:Velocidad	11,4313	1	11,4313	31296339,73	0,0000	E:Velocidad	-0,422627
INTERACCIONES							
AB	0,0331112	1	0,0331112	90651,34	0,0000	AB	0,0227456
AC	0,0000819335	1	0,0000819335	224,32	0,0000	AC	-0,00113146
AD	5,46555E-8	1	5,46555E-8	0,15	0,7014	AD	-0,0000292231
AE	0,00219299	1	0,00219299	6003,95	0,0000	AE	-0,00585368
BC	0,00574995	1	0,00574995	15742,13	0,0000	BC	0,00947855
BD	2,362E-7	1	2,362E-7	0,65	0,4271	BD	0,0000607505
BE	0,000377989	1	0,000377989	1034,85	0,0000	BE	-0,00243024
CD	1,88089E-7	1	1,88089E-7	0,51	0,4781	CD	-0,0000542116
CE	0,00327803	1	0,00327803	8974,55	0,0000	CE	0,00715676
DE	6,55829E-7	1	6,55829E-7	1,80	0,1894	DE	-0,000101229

ABC	0,0186626	1	0,0186626	51094,07	0,00 00	ABC	0,0170764
ABD	2,10222E-10	1	2,10222E-10	0,00	0,98 10	ABD	- 0,00000181 238
ABE	0,0017363 5	1	0,0017363 5	4753,75	0,00 00	ABE	0,00520869
ACD	7,17524E-8	1	7,17524E-8	0,20	0,66 05	ACD	- 0,00003348 33
ACE	0,0012250 8	1	0,0012250 8	3354,00	0,00 00	ACE	- 0,00437514
ADE	2,87949E-7	1	2,87949E-7	0,79	0,38 10	ADE	- 0,00006707 61
BCD	8,15763E-8	1	8,15763E-8	0,22	0,63 96	BCD	0,00003570 2
BCE	0,0216625	1	0,0216625	59307,16	0,00 00	BCE	0,0183977
BDE	6,59621E-7	1	6,59621E-7	1,81	0,18 82	BDE	0,00010152 1
CDE	7,55232E-9	1	7,55232E-9	0,02	0,88 65	CDE	- 0,00001086 3
ABCD	2,87724E-7	1	2,87724E-7	0,79	0,38 12	ABCD	0,00006704 99
ABCE	0,0074247 8	1	0,0074247 8	20327,45	0,00 00	ABCE	0,0107709
ABDE	3,47092E-8	1	3,47092E-8	0,10	0,75 98	ABDE	- 0,00002328 8
ACDE	1,94732E-8	1	1,94732E-8	0,05	0,81 88	ACDE	0,00001744 33
BCDE	6,95485E-8	1	6,95485E-8	0,19	0,66 54	BCDE	0,00003296 51
RESIDUOS	0,0000120 535	3 3	3,65259E-7			A:Altura de capa	-0,2791
TOTAL (CORREGIDO)	16,7579	6 3				B:Grosor pared	0,0301994
						C:Densid ad relleno	0,0541046

Tabla 37 Análisis de la varianza para Tiempo de impresión

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0035974	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 38 Resumen modelo para Tiempo de impresión

11.3.6.2. Diagrama de Pareto para Log(Tiempo de impresión)

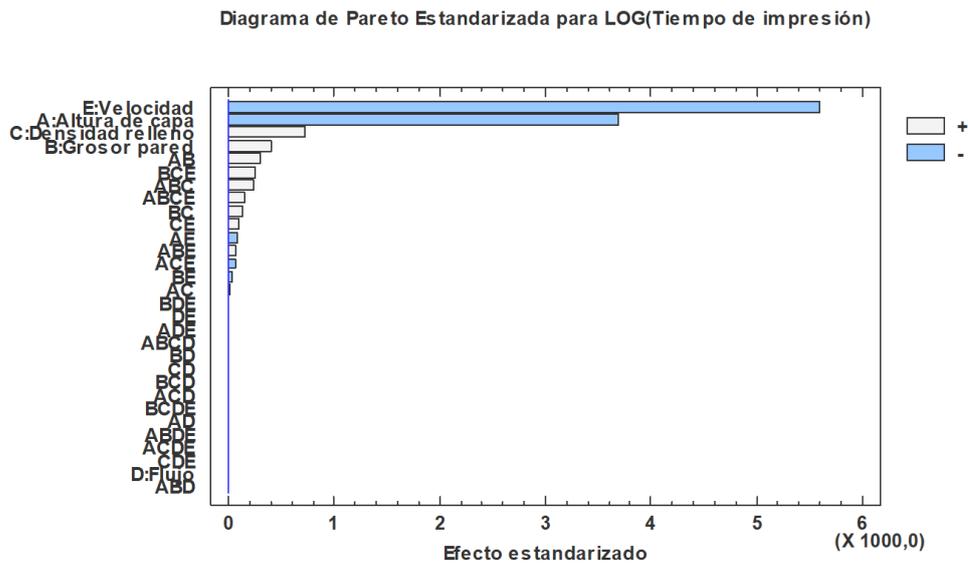


Gráfico 39 Pareto para log(t.impresión)

Como era de esperar todos los factores a excepción del flujo han resultado ser significativos así como sus interacciones. Si lo que se desea es imprimir de forma rápida sin importar nada más (pudiera ser que la figura fuese un armazón que posteriormente se cubriese con algún tipo de masilla) debería usarse un nivel alto de velocidad.

Niveles seleccionados	
Factor	nivel
A: Altura de capa	-
B: Grosor de pared	-
C: Densidad de relleno	-
D: Flujo	*
E: Velocidad	+

Tabla 39 Niveles seleccionados para e.largo

11.3.6.3. Intervalos LSD para LOG(Tiempo de impresión)

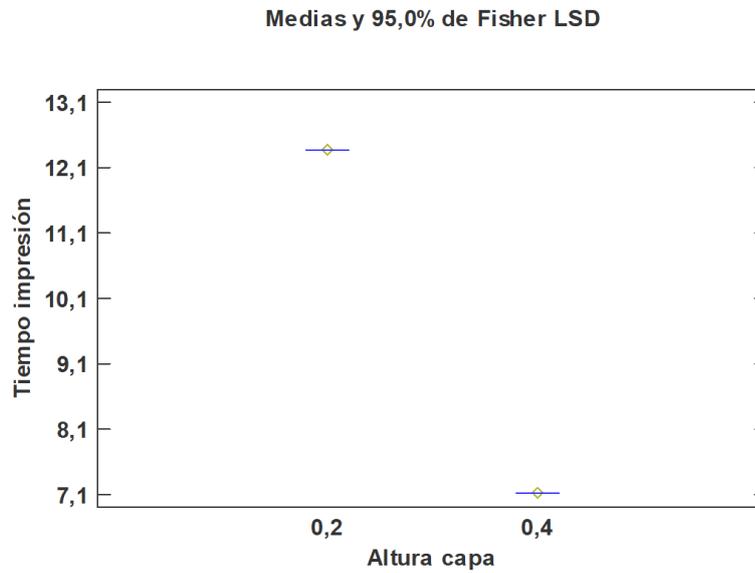


Gráfico 40 Intervalo LSD para Log(t.impresión)/altura capa

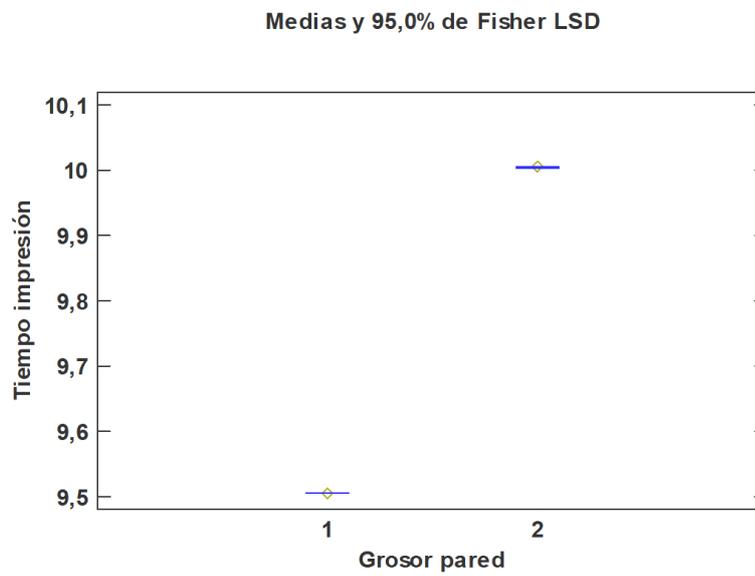


Gráfico 41 Intervalo LSD para Log(t.impresión)/grosor pared

Medias y 95,0% de Fisher LSD

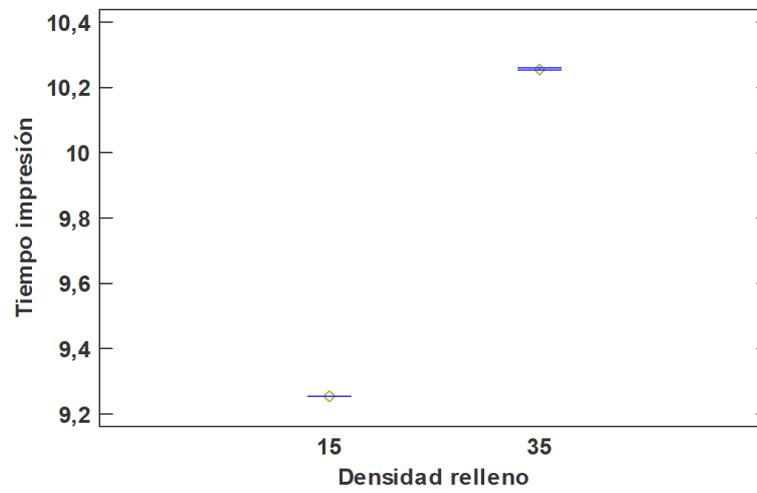


Gráfico 42 Intervalo LSD para Log(t.impresión)/densidad relleno

Medias y 95,0% de Fisher LSD

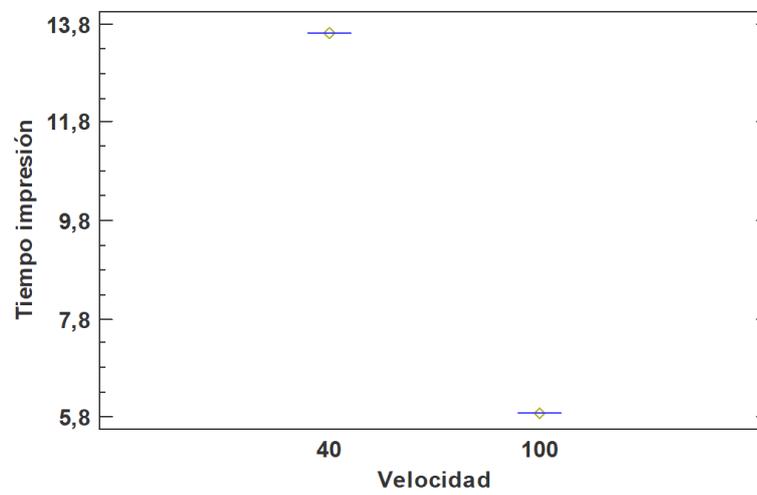


Gráfico 43 Intervalo LSD para Log(t.impresión)/velocidad

11.3.6.4. Gráfico de interacciones para LOG (Tiempo de impresión)

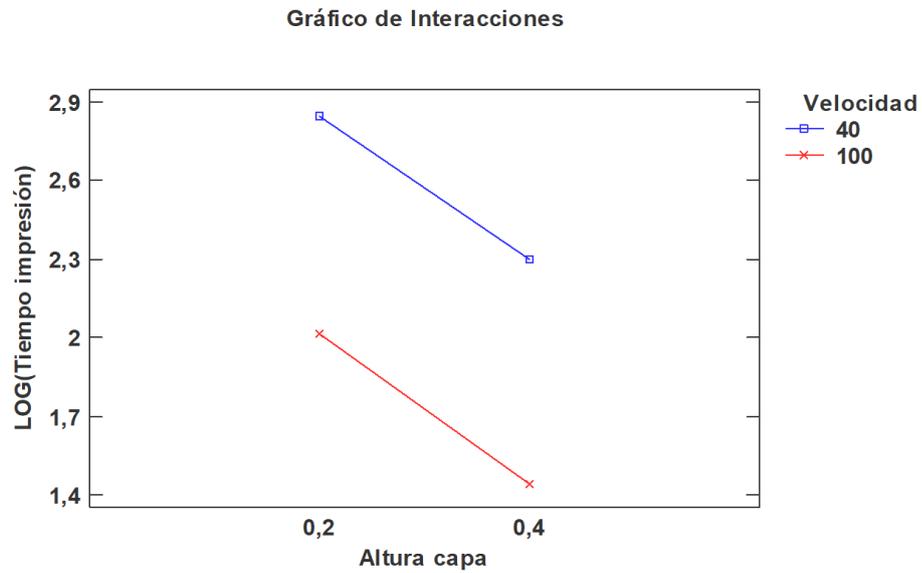


Gráfico 44 interacciones $\log(t.\text{impresión})/\text{velocidad}/\text{altura capa}$

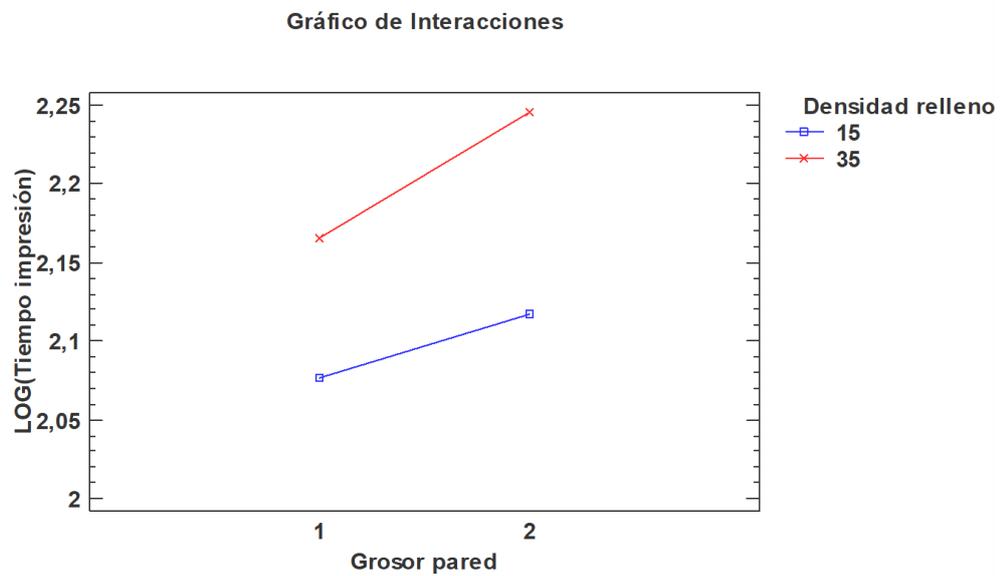


Gráfico 45 interacciones $\log(t.\text{impresión})/\text{grosor pared}/\text{densidad relleno}$

Gráfico de Interacciones

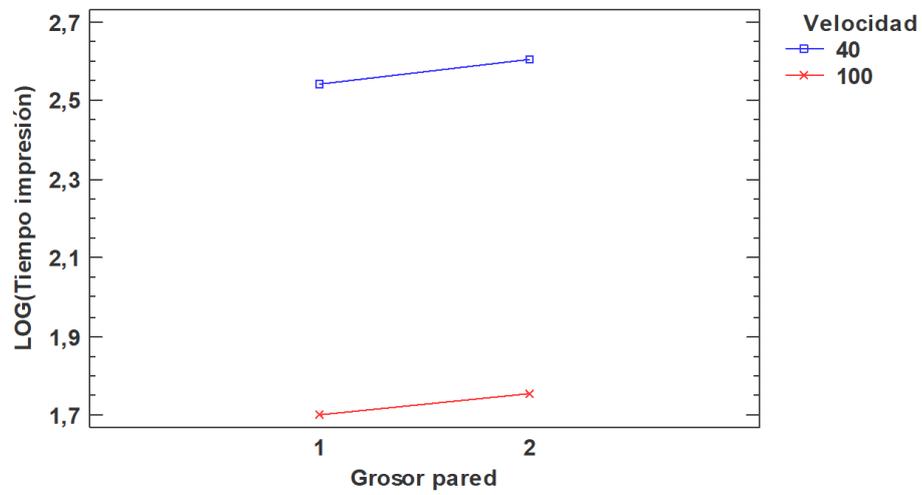


Gráfico 46 interacciones $\log(t.\text{impresión})/\text{velocidad}/\text{grosor pared}$

Gráfico de Interacciones

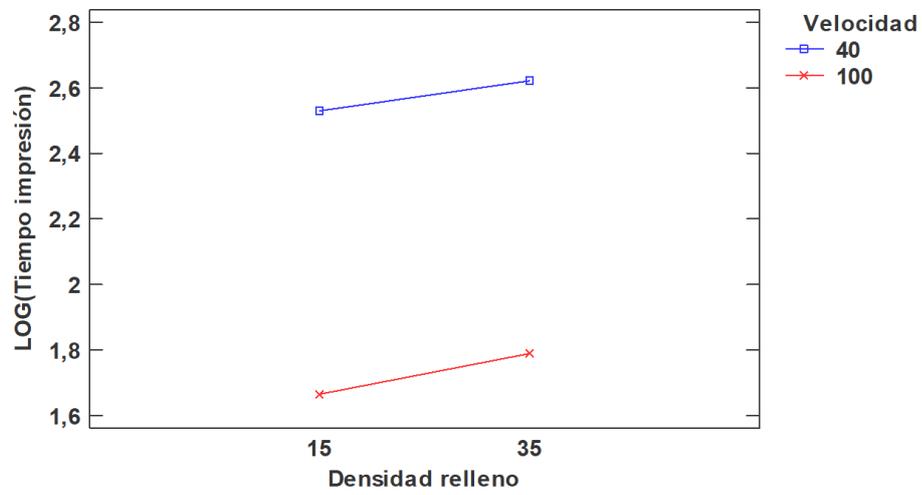


Gráfico 47 interacciones $\log(t.\text{impresión})/\text{densidad relleno}/\text{velocidad}$

11.3.7. Efectos significativos Peso

11.3.7.1. Análisis de la varianza para Peso

Fuente	Suma de Cuadrados	de	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES						
A:Altura de capa	0,00787656		1	0,00787656	305,23	0,0000
B:Grosor pared	0,382852		1	0,382852	14836,38	0,0000
C:Densidad relleno	0,177452		1	0,177452	6876,66	0,0000
D:Flujo	0,812252		1	0,812252	31476,61	0,0000
E:Velocidad	0,0000390625		1	0,0000390625	1,51	0,2273
INTERACCIONES						
AB	0,000451562		1	0,000451562	17,50	0,0002
AC	0,000826562		1	0,000826562	32,03	0,0000
AD	0,000126562		1	0,000126562	4,90	0,0338
AE	0,0000390625		1	0,0000390625	1,51	0,2273
BC	0,00878906		1	0,00878906	340,60	0,0000
BD	0,00581406		1	0,00581406	225,31	0,0000
BE	0,0000765625		1	0,0000765625	2,97	0,0943
CD	0,00191406		1	0,00191406	74,17	0,0000
CE	0,0000015625		1	0,0000015625	0,06	0,8072
DE	0,0000140625		1	0,0000140625	0,54	0,4656
ABC	0,000126562		1	0,000126562	4,90	0,0338
ABD	0,0000015625		1	0,0000015625	0,06	0,8072
ABE	0,0000140625		1	0,0000140625	0,54	0,4656
ACD	0,0000015625		1	0,0000015625	0,06	0,8072
ACE	0,0000390625		1	0,0000390625	1,51	0,2273
ADE	0,0000015625		1	0,0000015625	0,06	0,8072
BCD	0,0000015625		1	0,0000015625	0,06	0,8072
BCE	0,0000140625		1	0,0000140625	0,54	0,4656
BDE	0,0000015625		1	0,0000015625	0,06	0,8072
CDE	0,0000015625		1	0,0000015625	0,06	0,8072
ABCD	0,000351562		1	0,000351562	13,62	0,0008
ABCE	0,0000390625		1	0,0000390625	1,51	0,2273
ABDE	0,0000765625		1	0,0000765625	2,97	0,0943
ACDE	0,0000015625		1	0,0000015625	0,06	0,8072
BCDE	0,0000140625		1	0,0000140625	0,54	0,4656
RESIDUOS	0,000851563		33	0,0000258049		
TOTAL (CORREGIDO)	1,40006		63			

Tabla 40 Análisis de la varianza para Peso

Se observa que los factores significativos son, la altura de capa, el grosor de pared, la densidad de relleno, el flujo, y el resto de interacciones que aparecen en rojo, o con un p-valor menor a 0,05.

11.3.7.2. Diagrama de Pareto para Peso

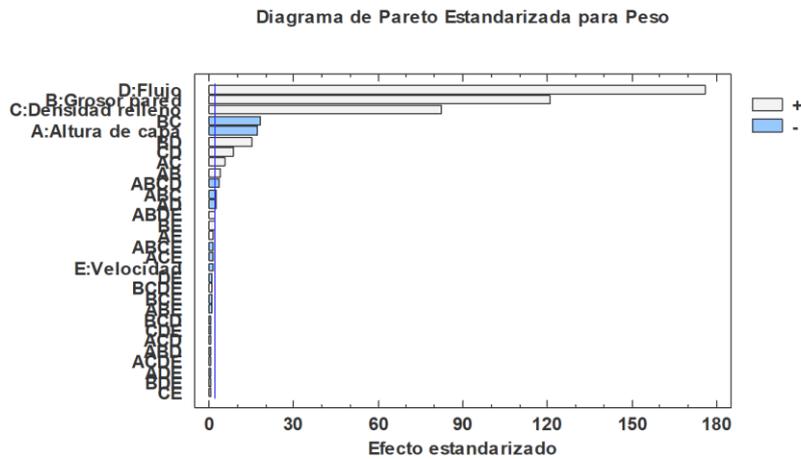


Gráfico 48 Pareto para peso

En el presente caso, vuelve a repetirse lo sucedido con la variable tiempo de impresión, el sentido común, o lógica resulta concordar con los resultados. Recomendándose así los siguientes niveles para reducir el peso de las impresiones:

Niveles seleccionados	
Factor	nivel
A: Altura de capa	*
B: Grosor de pared	*
C: Densidad de relleno	*
D: Flujo	+
E: Velocidad	-

Tabla 41 Niveles seleccionados para e.largo

11.3.7.3. Intervalos LSD para Peso

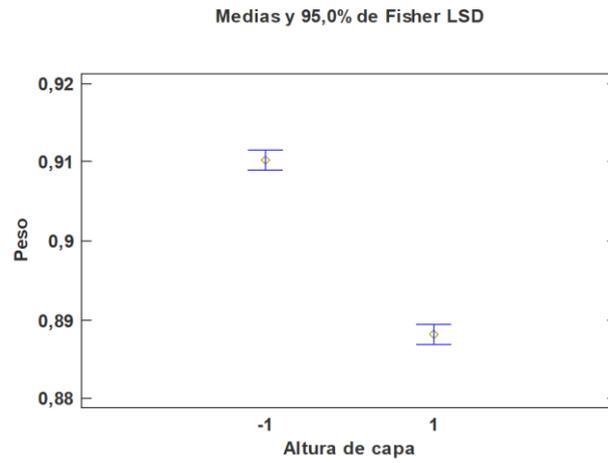


Gráfico 49 Intervalos LSD para peso/altura capa

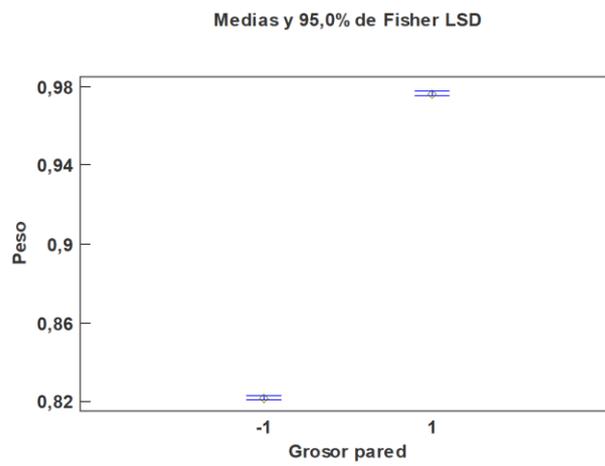


Gráfico 50 Intervalos LSD para peso/grosor pared

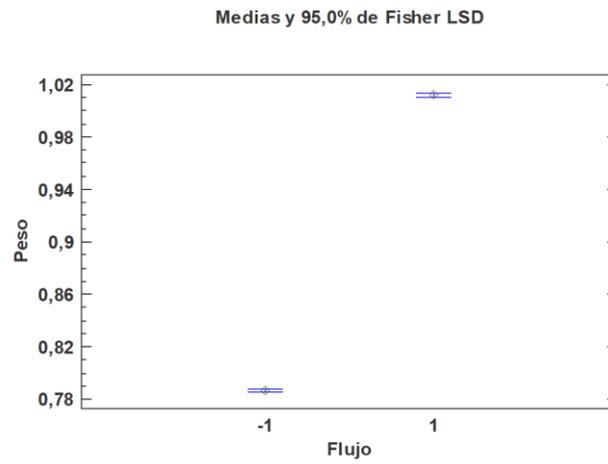


Gráfico 51 Intervalos LSD para peso/flujo

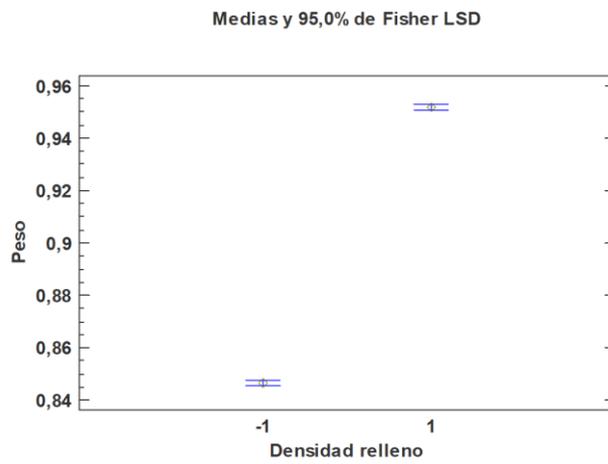


Gráfico 52 Intervalos LSD para peso/densidad relleno

11.3.7.4. Gráfico de interacciones para Peso

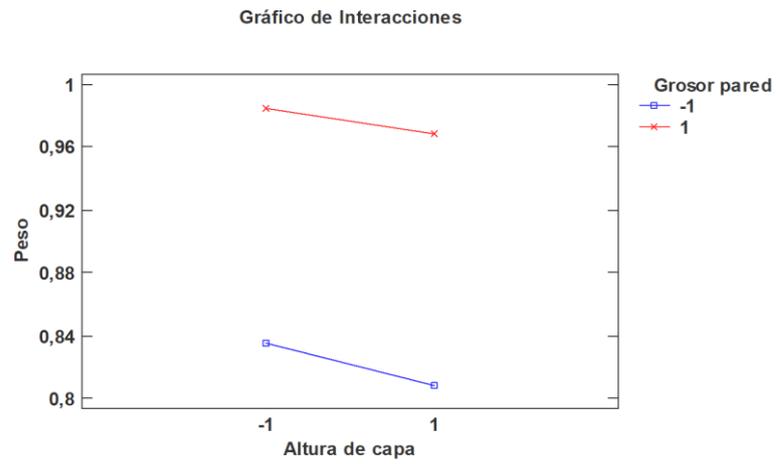


Gráfico 53 Interacciones peso/altura capa/grosor pared

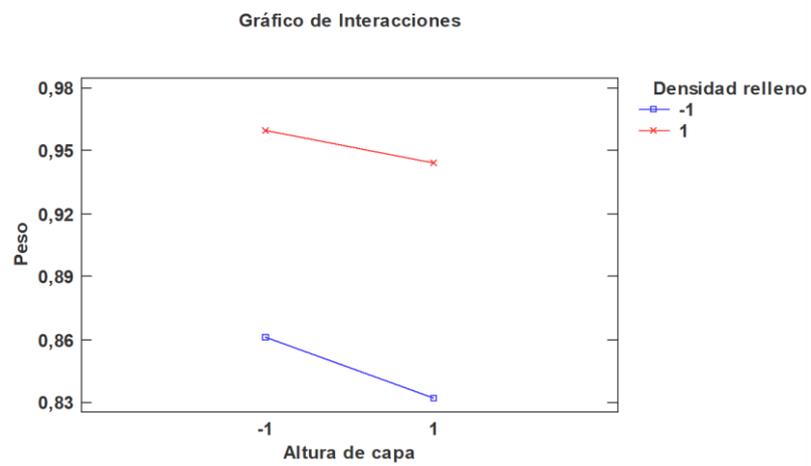


Gráfico 54 Interacciones peso/densidad relleno/altura capa

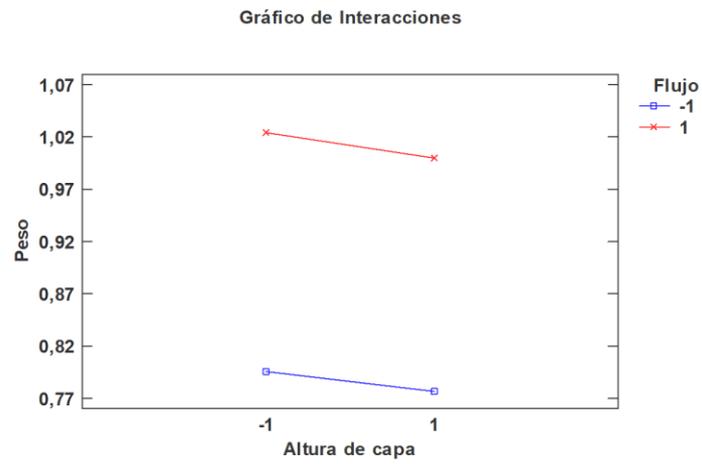


Gráfico 55 Interacciones peso/altura capa/flujo

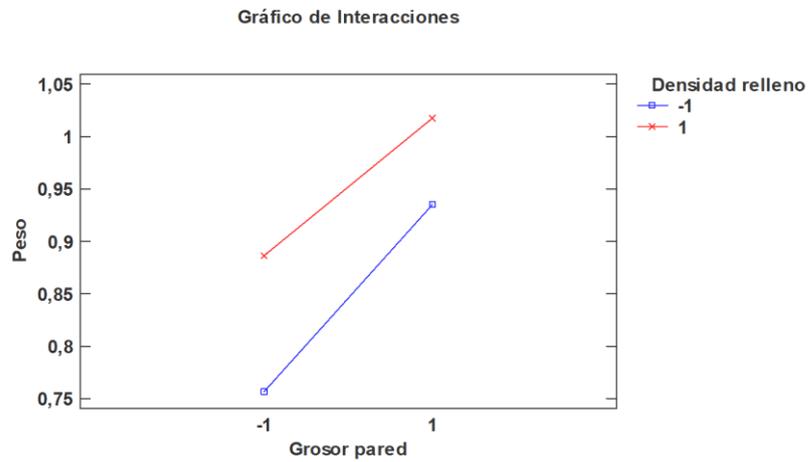


Gráfico 56 Interacciones peso/densidad relleno/grosor pared

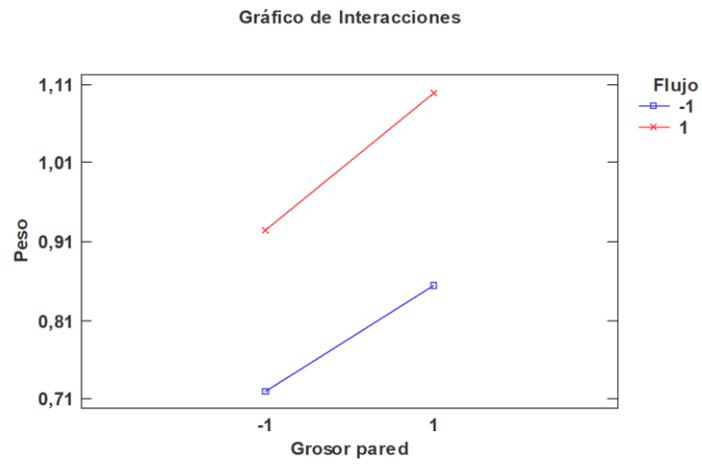


Gráfico 57 Interacciones peso/grosor pared/flujo

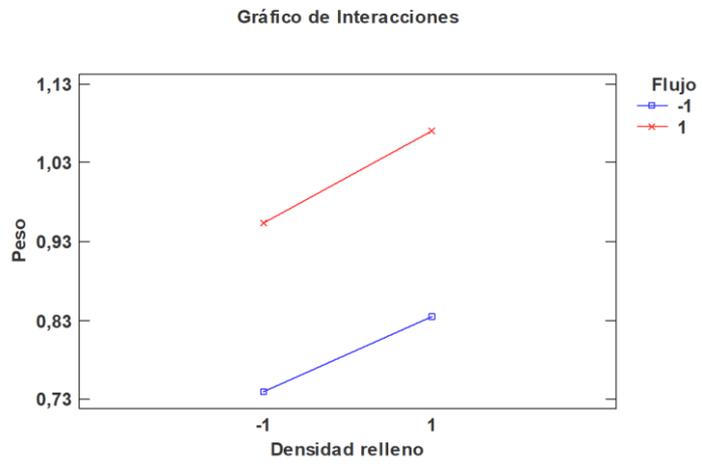


Gráfico 58 Interacciones peso/flujo/densidad relleno

11.4. Información análisis de cribado con centros

Los efectos que en el análisis sin centros han salido como significativos al hacerse el análisis añadiendo los centros siguen siendo significativos, por esta razón se prescindirá de realizar el estudio pormenorizado de cada variable de respuesta y simplemente se mostrarán las gráficas de los efectos con centros y tablas para poder analizar la posible curvatura de la variable respuesta.

11.4.1. Error dimensional largo

Sin centros:

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0916476	67,93%	38,78%	0,00%

Tabla 42 Resumen del modelo sin centros error dimensional largo

Gráfica de efectos principales para Error largo Medias ajustadas

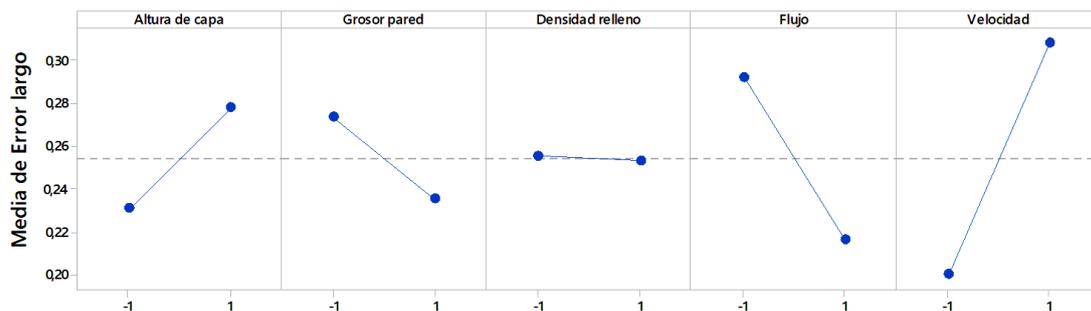


Gráfico 59 Efectos principales error largo

Con centros:

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,102751	61,88%	29,05%	0,00%

Tabla 43 Resumen del modelo con centros error dimensional largo

Gráfica de efectos principales para Error largo Medias ajustadas

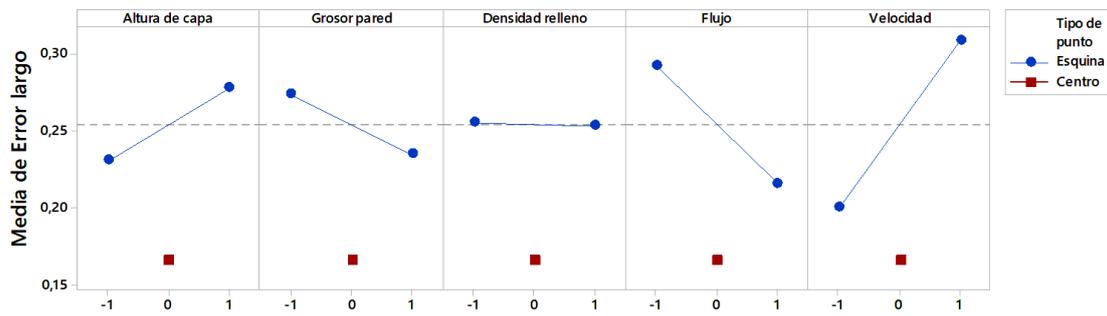


Gráfico 60 Efectos principales con centros error largo

Se observa que la capacidad predictiva del modelo es menor con los centros, pero los centros muestran una curvatura en todas las variables por lo que el modelo lineal es insuficiente.

11.4.2. Log(Error dimensional ancho)

Sin centros:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,710515	73,69%	49,77%	1,04%

Tabla 44 Resumen del modelo sin centros Log(error dimensional largo)

Gráfica de efectos principales para log(e,ancho) Medias ajustadas

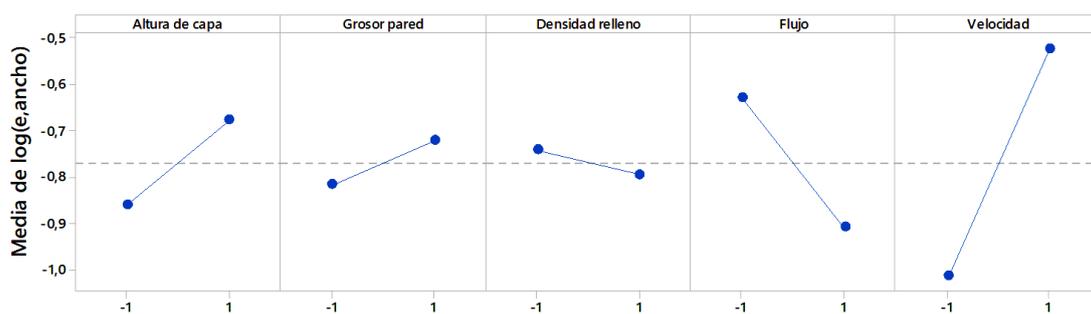


Gráfico 61 Efectos principales log(e,ancho)

Con centros:

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,342495	68,25%	40,91%	0,00%

Tabla 45 Resumen del modelo con centros Log(error dimensional largo)

11.4.3. Error dimensional alto

Sin centros:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0563845	80,26%	62,31%	25,75%

Tabla 46 Tabla 37 Resumen del modelo sin centros error dimensional alto

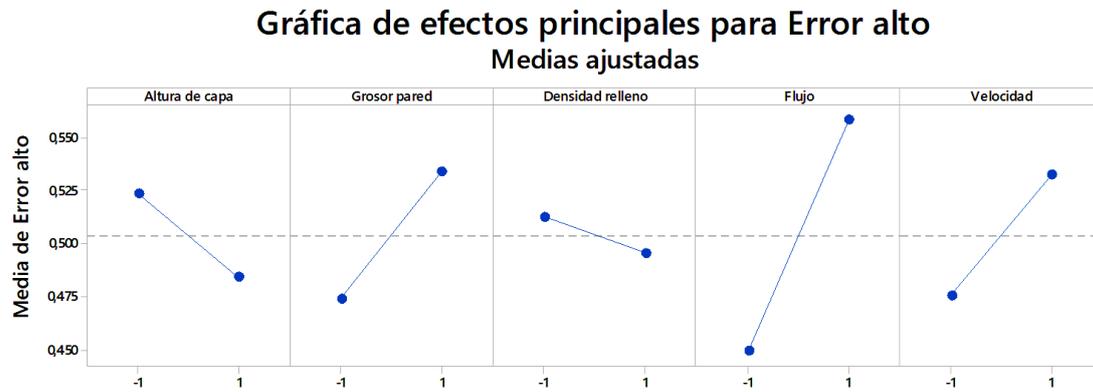


Gráfico 62 Efectos principales e.alto

Con centros:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0614159	79,43%	61,71%	31,90%

Tabla 47 Resumen del modelo con centros error dimensional alto

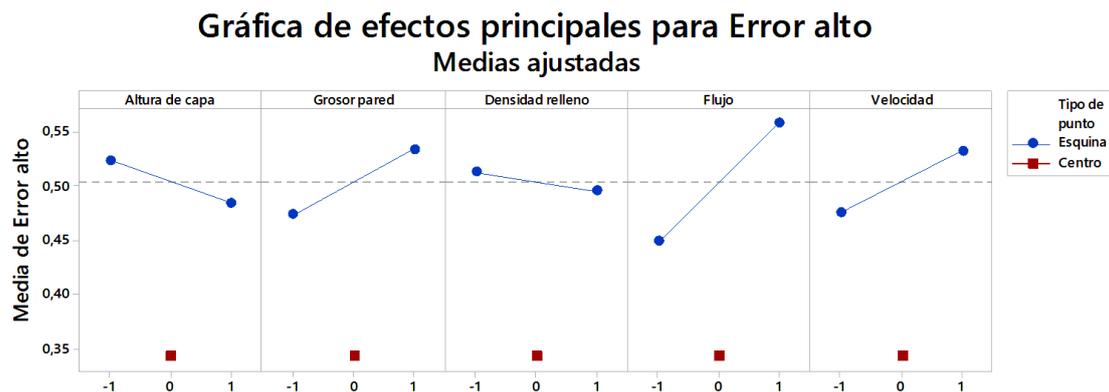


Gráfico 63 Efectos principales con centros e.alto

Se observa que la capacidad predictiva del modelo es menor con los centros, pero los centros muestran una curvatura en todas las variables por lo que el modelo lineal es insuficiente.

11.4.4. Log(Resiliencia)

Sin centros:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0724598	78,43%	58,83%	18,88%

Tabla 48 Resumen del modelo sin centros LOG(resiliencia)

Gráfica de efectos principales para log(resiliencia) Medias ajustadas

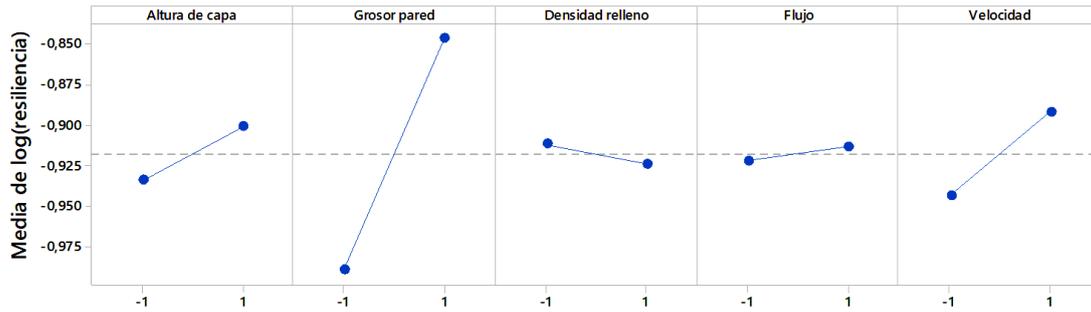


Gráfico 64 Efectos principales log(resiliencia)

Con centros:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0711988	77,55%	58,22%	17,81%

Tabla 49 Resumen del modelo con centros LOG(resiliencia)

Gráfica de efectos principales para LOG(resiliencia) Medias ajustadas

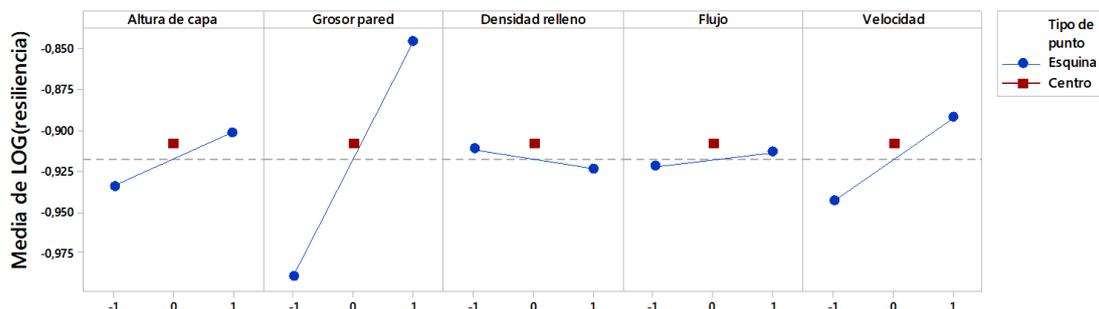


Gráfico 65 Efectos principales con centros log(resiliencia)

Se observa que la capacidad predictiva del modelo es menor con los centros, pero los centros muestran una curvatura (poco acusada) en todas las variables por lo que el modelo lineal es insuficiente.

11.4.5. Log (rugosidad media)

Sin centros:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,207651	70,18%	43,07%	0,00%

Tabla 50 Resumen del modelo sin centros LOG(Ra)

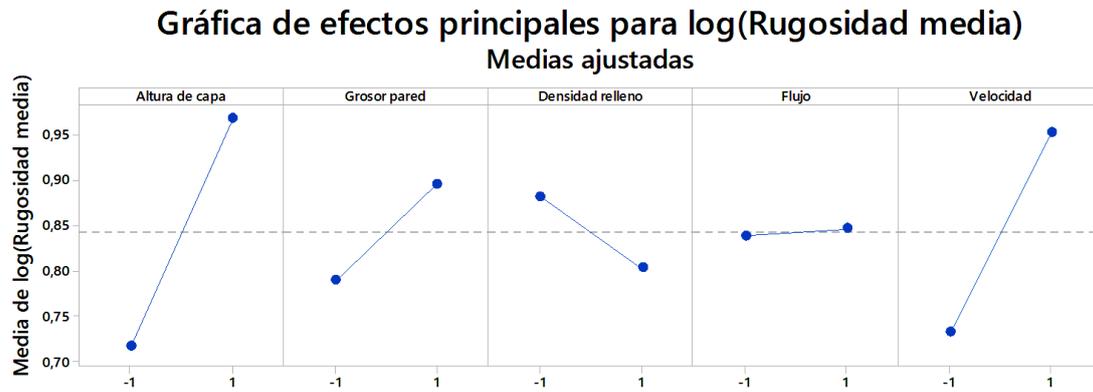


Gráfico 66 Efectos principales log(Ra)

Con centros:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,206837	68,53%	41,42%	0,00%

Tabla 51 43 Resumen del modelo con centros LOG(Ra)

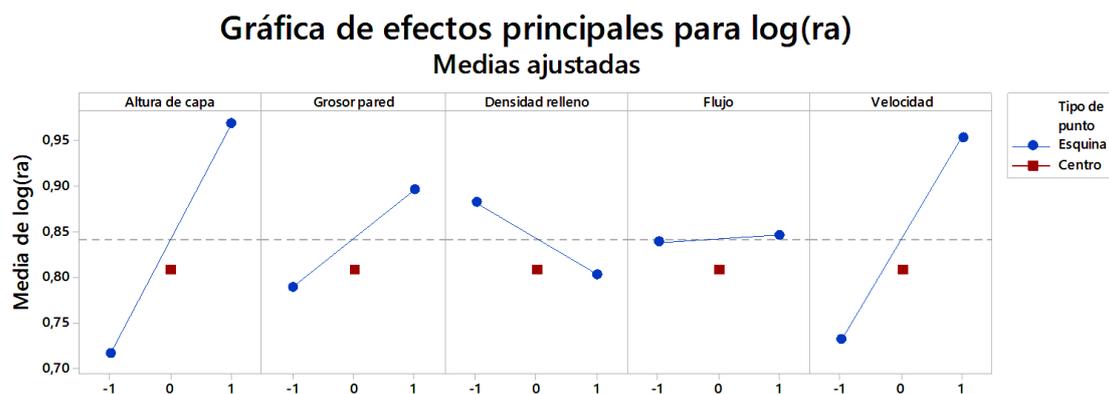


Gráfico 67 Efectos principales con centros log(Ra)

Se observa que la capacidad predictiva del modelo es menor con los centros, pero los centros muestran una curvatura en todas las variables por lo que el modelo lineal es insuficiente.

11.4.6. Log(tiempo de impresión)

Sin centros:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0035974	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 52 Resumen del modelo sin centros LOG(t. impresión)

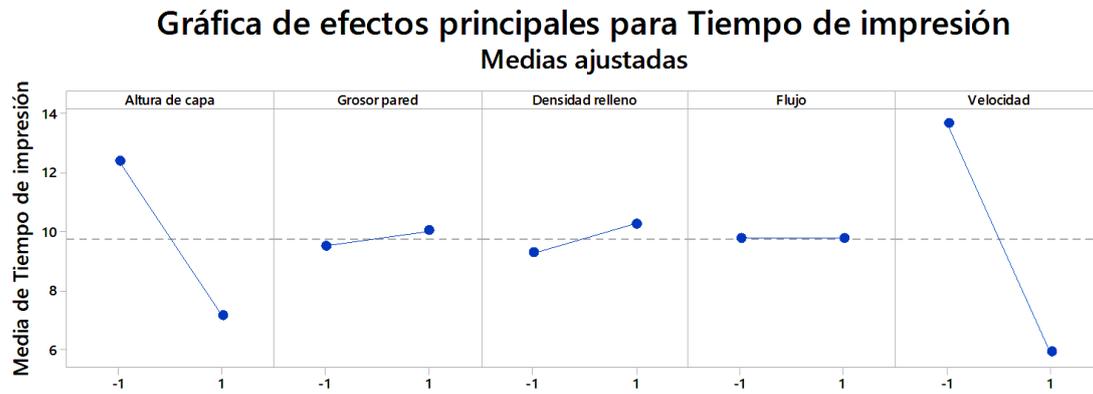


Gráfico 68 Efectos principales t. impresión

Con centros:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 53 Resumen del modelo con centros LOG(t. impresión)

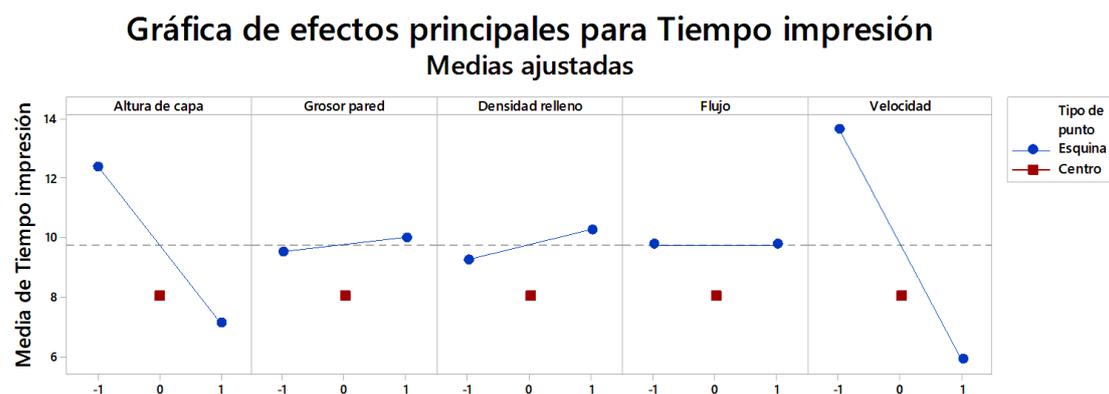


Gráfico 69 Efectos principales con centros t. impresión

11.4.7. Peso

Sin centros:

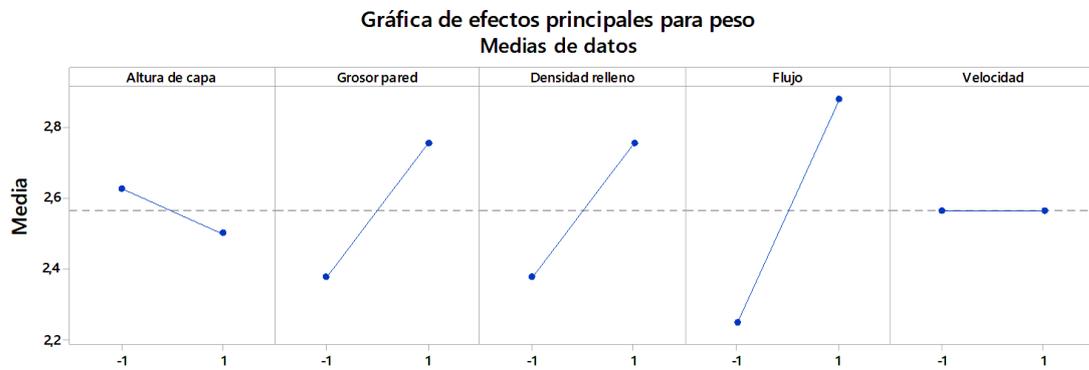


Gráfico 70 Efectos principales sin centros peso

Con centros:

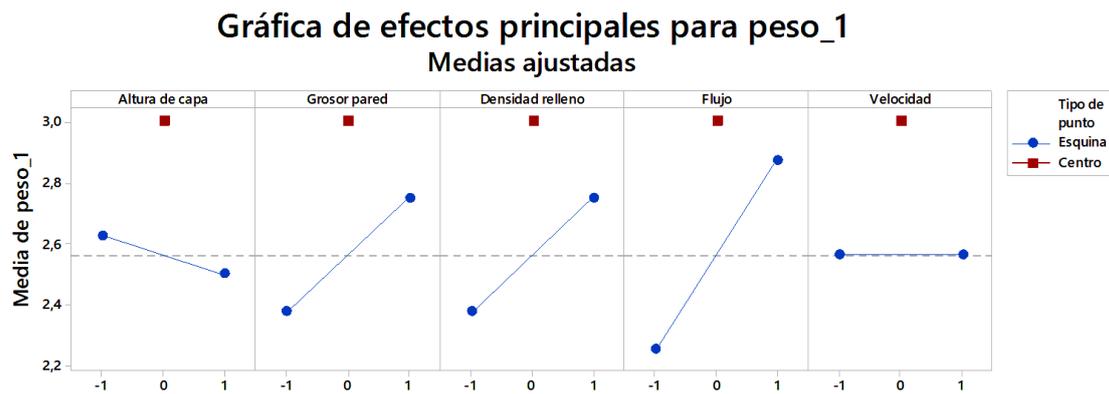


Gráfico 71 Efectos principales con centros peso

11.5. Diseño de experimentos mediante la técnica de superficie de respuesta

Una vez se ha visto que el modelo simple no es válido debe pasarse a un modelo más complejo, en este caso se ha optado por un modelo de cubo y estrella que posteriormente será usado para modelar una curva de superficie de respuesta.

11.5.1. Superficie de respuesta para error dimensional largo.

11.5.1.1. Análisis de la normalidad de los datos para error dimensional largo

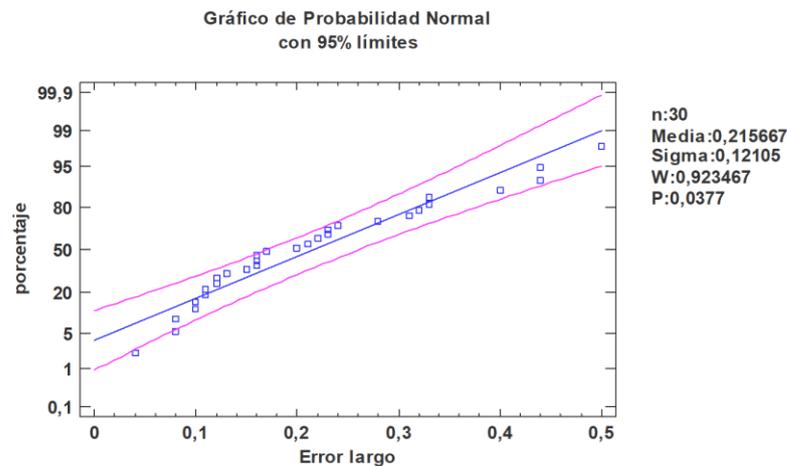


Gráfico 72 normalidad de los datos para error dimensional largo

Recuento	30
Promedio	0,215667
Mediana	0,185
Desviación Estándar	0,12105
Coefficiente de Variación	56,1281%
Mínimo	0,04
Máximo	0,5
Rango	0,46
Sesgo Estandarizado	1,7667
Curtosis Estandarizada	-0,236125

Tabla 54 Análisis de la normalidad de los datos para error dimensional largo

Por lo tanto se trata de una variable normal que no requiere de transformación.

11.5.1.2. Efectos significativos para error dimensional largo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Altura capa	0,0009375	1	0,0009375	0,07	0,8003
B:Grosor pared	0,00350417	1	0,00350417	0,25	0,6259
C:Flujo	0,0782042	1	0,0782042	5,52	0,0320
D:Velocidad	0,00150417	1	0,00150417	0,11	0,7489
AA	0,00750963	1	0,00750963	0,53	0,4773

AB	0,0115562	1	0,0115562	0,82	0,3800
AC	0,00050625	1	0,00050625	0,04	0,8525
AD	0,0264063	1	0,0264063	1,86	0,1912
BB	0,00288516	1	0,00288516	0,20	0,6580
BC	0,00950625	1	0,00950625	0,67	0,4249
BD	0,00005625	1	0,00005625	0,00	0,9506
CC	0,0428394	1	0,0428394	3,02	0,1014
CD	0,00455625	1	0,00455625	0,32	0,5787
DD	0,00450006	1	0,00450006	0,32	0,5810
Error total	0,226861	16	0,0141788		
Total (corr.)	0,42551	30			

Tabla 55 Efectos significativos para error dimensional largo

Gráfica de efectos principales para Error largo Medias ajustadas

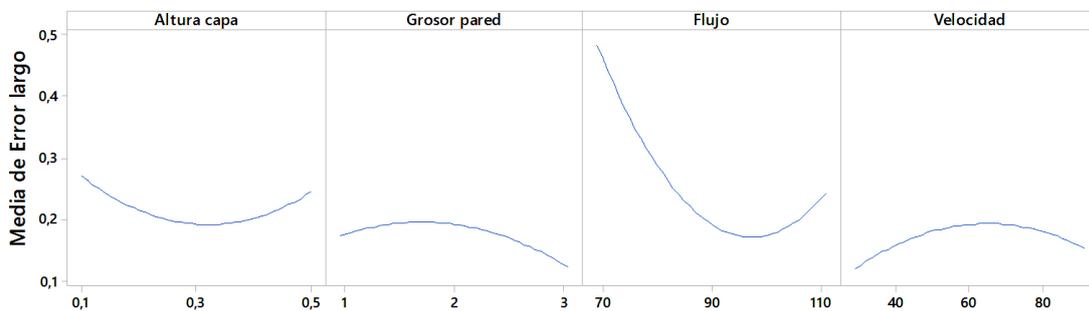


Gráfico 73 Efectos principales error largo

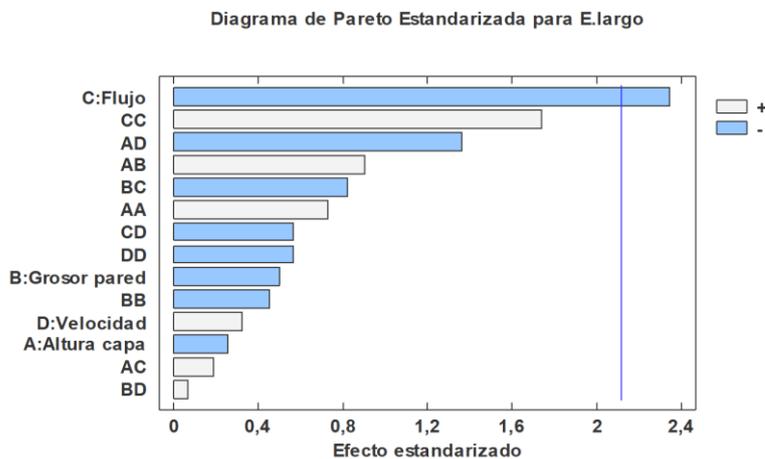


Gráfico 74 Pareto e.largo

En el rango de valores estudiado solo aparece una variable con significación, lo cual lleva a pensar que o bien se trata de un sistema con caídas abruptas de significación, o bien que existe una gran variabilidad o que ha habido un fallo de medida, humano o metodológico.

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,119075	46,68%	0,03%	0,00%

Tabla 56 Resumen modelo para error dimensional largo

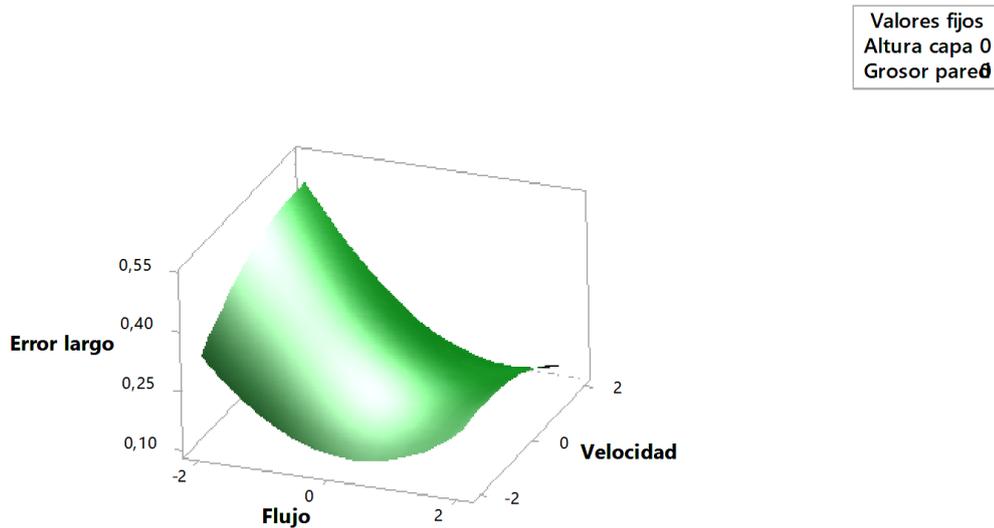
11.5.1.3. Ajuste del modelo para error dimensional largo.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Error largo} = & 2,19 - 0,99 \text{ Altura capa} + 0,399 \text{ Grosor pared} - 0,0606 \text{ Flujo} + 0,0250 \text{ Velocidad} \\
 & + 1,62 \text{ Altura capa} * \text{Altura capa} - 0,0402 \text{ Grosor pared} * \text{Grosor pared} \\
 & + 0,000387 \text{ Flujo} * \text{Flujo} - 0,000056 \text{ Velocidad} * \text{Velocidad} \\
 & + 0,538 \text{ Altura capa} * \text{Grosor pared} + 0,0056 \text{ Altura capa} * \text{Flujo} \\
 & - 0,0271 \text{ Altura capa} * \text{Velocidad} - 0,00488 \text{ Grosor pared} * \text{Flujo} \\
 & + 0,00025 \text{ Grosor pared} * \text{Velocidad} - 0,000113 \text{ Flujo} * \text{Velocidad}
 \end{aligned}$$

11.5.1.4. Superficie de respuesta para error dimensional largo.

Gráfica de superficie de Error largo vs. Velocidad; Flujo



Gráficas de superficie de Error largo

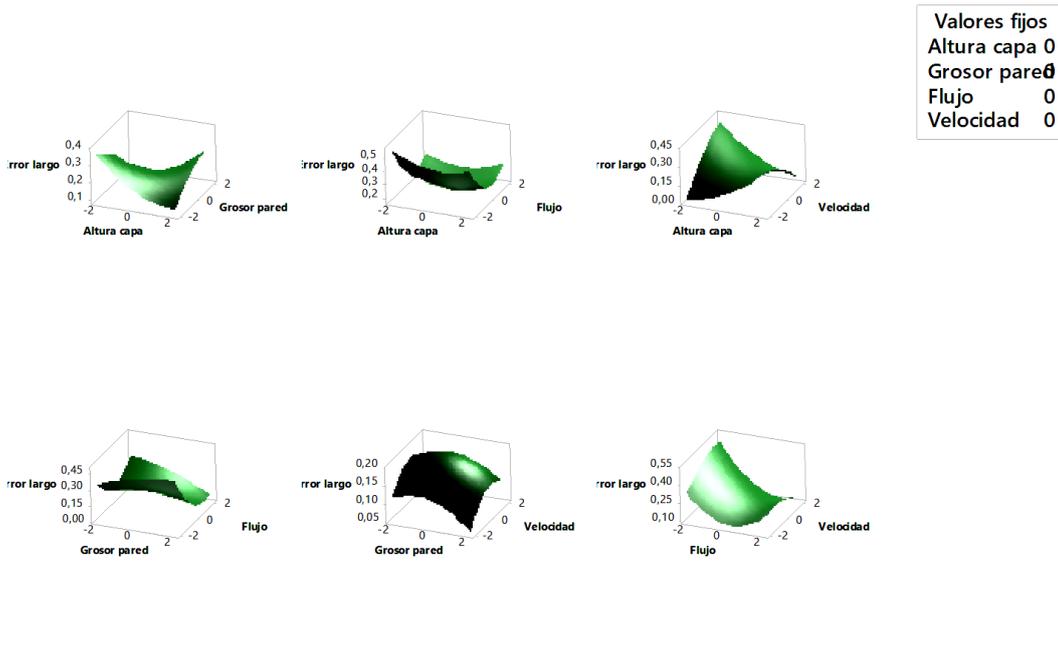


Gráfico 75 Superficie respuesta e.largo

11.5.2. Superficie de respuesta para log(error dimensional ancho).

11.5.2.1. Análisis de la normalidad de los datos de log(error dimensional ancho).

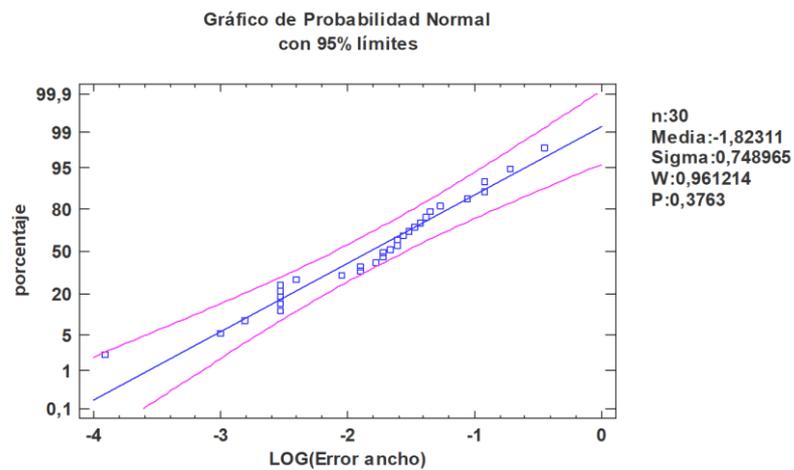


Gráfico 76 Análisis de la normalidad de los datos de log(error dimensional ancho)

Recuento	30
Promedio	-1,82311
Mediana	-1,68776
Desviación Estándar	0,748965
Coefficiente de Variación	-41,0817%
Mínimo	-3,91202
Máximo	-0,446287
Rango	3,46574
Sesgo Estandarizado	-1,41097
Curtosis Estandarizada	0,834053

Tabla 57 Análisis de la normalidad de los datos de log(error dimensional ancho)

11.5.2.2. Efectos significativos para log(error dimensional ancho).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Altura capa	0,406565	1	0,406565	0,41	0,5237
B:Grosor pared	0,0000602617	1	0,0000602617	0,00	0,9938
C:Flujo	0,345166	1	0,345166	0,35	0,5569
D:Velocidad	0,539067	1	0,539067	0,54	0,4628
AA	0,00000570251	1	0,00000570251	0,00	0,9981
AB	0,125746	1	0,125746	0,13	0,7229
AC	0,0420711	1	0,0420711	0,04	0,8375
AD	0,188475	1	0,188475	0,19	0,6642
BB	0,0109493	1	0,0109493	0,01	0,9167
BC	0,0475709	1	0,0475709	0,05	0,8273
BD	0,0139541	1	0,0139541	0,01	0,9060
CC	0,00311209	1	0,00311209	0,00	0,9555
CD	0,00681822	1	0,00681822	0,01	0,9342
DD	0,000285941	1	0,000285941	0,00	0,9865
Error total	1,35292	16	0,0845575	0,08	1,0000
Sigma externa			1,0		
Total (corr.)	3,08437	30			

Tabla 58 Efectos significativos para log(error dimensional ancho).

Gráfica de efectos principales para Error ancho Medias ajustadas

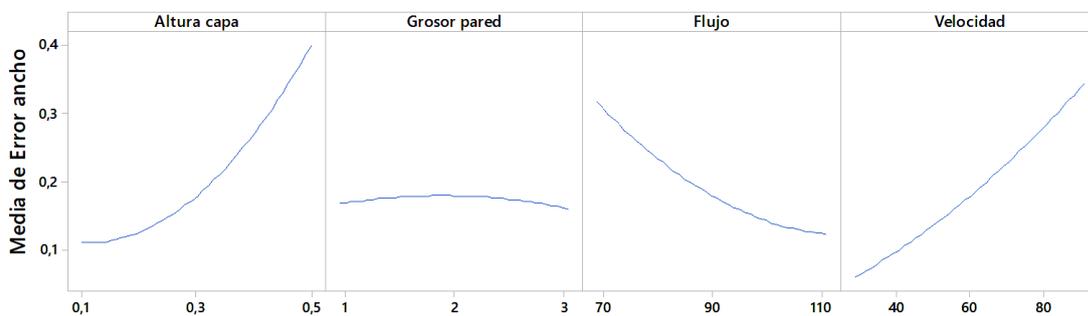


Gráfico 77 Efectos principales error ancho

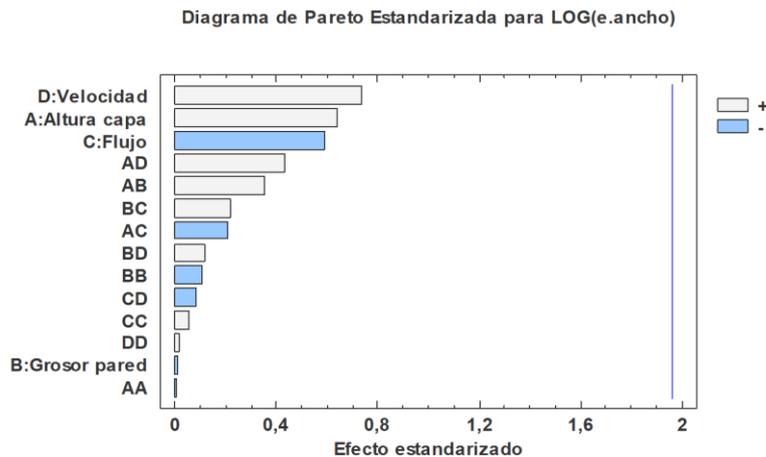


Gráfico 78 Pareto log(e.ancho)

En el rango de valores estudiado no aparece variable alguna con significación, lo cual lleva a pensar que o bien se trata de un sistema con caídas abruptas de significación, o bien que existe una gran variabilidad o que ha habido un fallo de medida, humano o metodológico. **De estos resultados no se pueden sacar conclusiones robustas.**

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,290787	56,14%	17,76%	0,00%

Tabla 59 Resumen para log(error dimensional ancho).

11.5.2.3. Ajuste del modelo para log(error dimensional ancho).

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Error ancho} = & 1,44 - 1,88 \text{ Altura capa} - 0,569 \text{ Grosor pared} - 0,0139 \text{ Flujo} \\
 & + 0,0060 \text{ Velocidad} \\
 & + 1,91 \text{ Altura capa} * \text{Altura capa} - 0,0136 \text{ Grosor pared} * \text{Grosor pared} \\
 & + 0,000091 \text{ Flujo} * \text{Flujo} + 0,000024 \text{ Velocidad} * \text{Velocidad} \\
 & + 0,200 \text{ Altura capa} * \text{Grosor pared} - 0,0137 \text{ Altura capa} * \text{Flujo} \\
 & + 0,0383 \text{ Altura capa} * \text{Velocidad} + 0,00500 \text{ Grosor pared} * \text{Flujo} \\
 & + 0,00183 \text{ Grosor pared} * \text{Velocidad} - 0,000217 \text{ Flujo} * \text{Velocidad}
 \end{aligned}$$

11.5.2.4. Superficie de respuesta para log(e.ancho ancho).

Gráficas de superficie de log(e.ancho)

Valores fijos
 Altura capa 0
 Grosor pared 0
 Flujo 0
 Velocidad 0

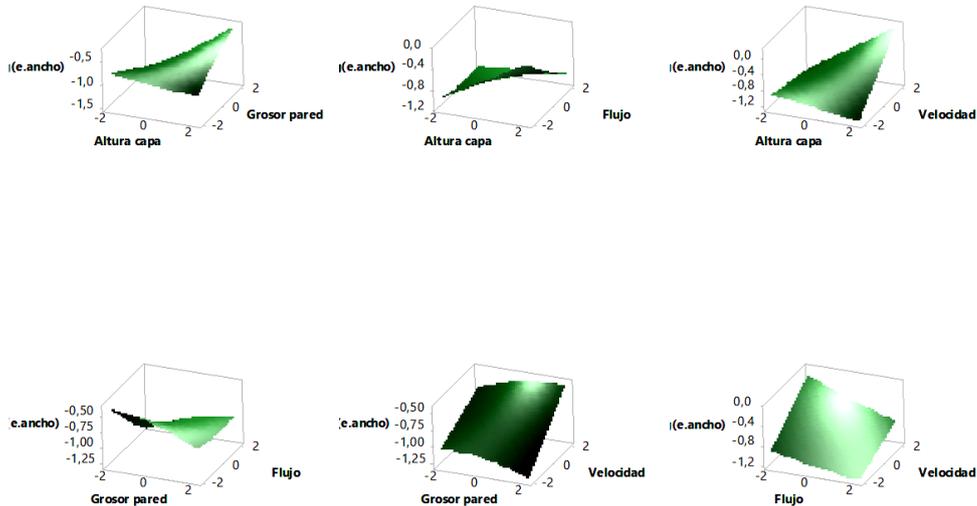


Gráfico 79 Superficie respuesta log(e.ancho)

11.5.3. Superficie de respuesta para error dimensional alto

11.5.3.1. Análisis de la normalidad de los datos de error dimensional alto

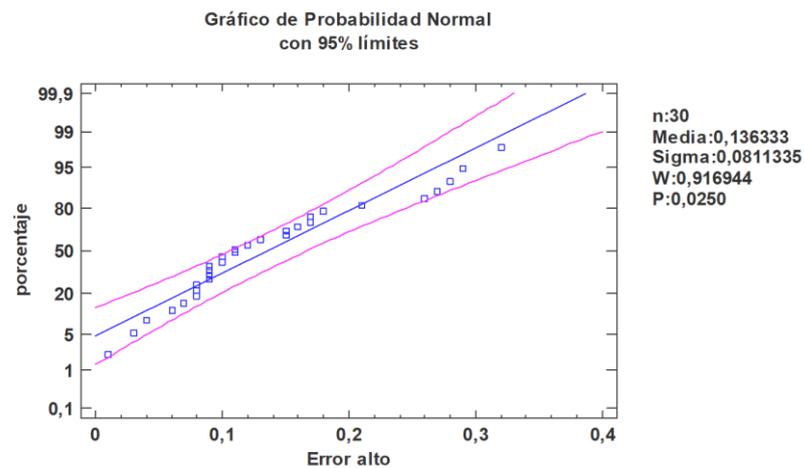


Gráfico 80 5.5.3.1. Análisis de la normalidad de los datos de error dimensional alto

Recuento	30
Promedio	0,136333
Mediana	0,11
Desviación Estándar	0,0811335
Coefficiente de Variación	59,5111%
Mínimo	0,01
Máximo	0,32
Rango	0,31
Sesgo Estandarizado	1,8139
Curtosis Estandarizada	-0,134816

Tabla 60 Análisis de la normalidad de los datos de error dimensional alto

11.5.3.2. Efectos significativos para error dimensional alto

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Altura capa	0,0003375	1	0,0003375	0,04	0,8454
B:Grosor pared	0,000204167	1	0,000204167	0,02	0,8794
C:Flujo	0,0100042	1	0,0100042	1,16	0,2965
D:Velocidad	0,0063375	1	0,0063375	0,74	0,4030
AA	0,0000191553	1	0,0000191553	0,00	0,9629
AB	0,00140625	1	0,00140625	0,16	0,6911
AC	0,00330625	1	0,00330625	0,38	0,5437
AD	0,00140625	1	0,00140625	0,16	0,6911
BB	0,00261809	1	0,00261809	0,30	0,5885
BC	0,0115562	1	0,0115562	1,35	0,2631
BD	0,00855625	1	0,00855625	1,00	0,3331
CC	0,00241064	1	0,00241064	0,28	0,6035
CD	0,0105062	1	0,0105062	1,22	0,2851
DD	0,00142873	1	0,00142873	0,17	0,6888
Error total	0,137418	16	0,00858862		
Total (corr.)	0,19811	30			

Tabla 61 Efectos significativos para error dimensional alto

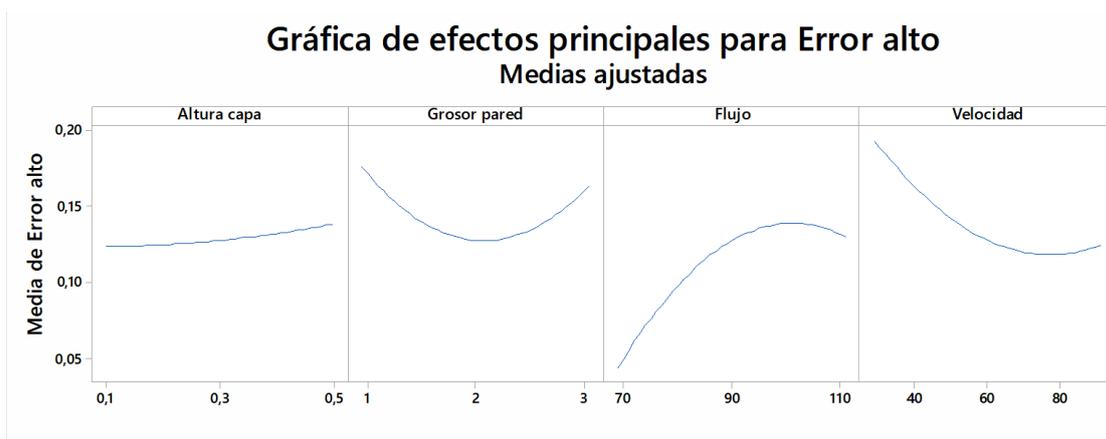


Gráfico 81 Efectos principales error alto

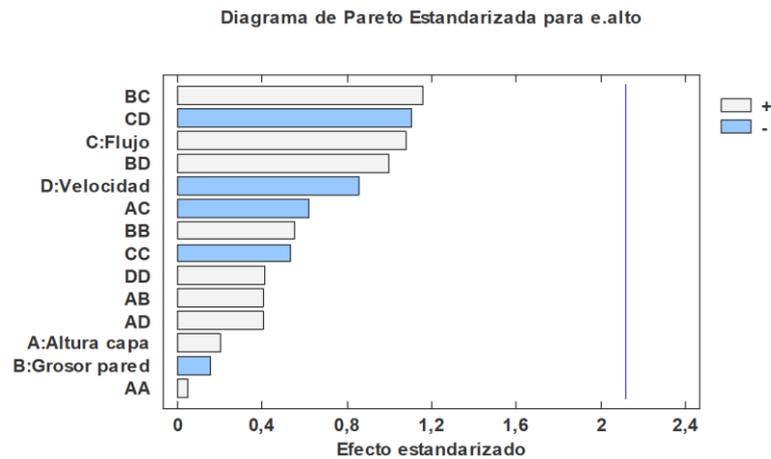


Gráfico 82 Pareto e.alto

En el rango de valores estudiado no aparece variable alguna con significación, lo cual lleva a pensar que o bien se trata de un sistema con caídas abruptas de significación, o bien que existe una gran variabilidad o que ha habido un fallo de medida, humano o metodológico. **De estos resultados no se pueden sacar conclusiones robustas.**

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,119075	46,68%	0,03%	0,00%

Tabla 62 Resumen modelo para error dimensional alto

11.5.3.3. Ajuste del modelo para error dimensional alto

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Error alto} = & -0,21 + 0,53 \text{ Altura capa} - 0,884 \text{ Grosor pared} + 0,0224 \text{ Flujo} \\
 & + 0,0025 \text{ Velocidad} \\
 & + 0,08 \text{ Altura capa} * \text{Altura capa} + 0,0383 \text{ Grosor pared} * \text{Grosor pared} \\
 & - 0,000092 \text{ Flujo} * \text{Flujo} + 0,000031 \text{ Velocidad} * \text{Velocidad} \\
 & + 0,187 \text{ Altura capa} * \text{Grosor pared} - 0,0144 \text{ Altura capa} * \text{Flujo} \\
 & + 0,0062 \text{ Altura capa} * \text{Velocidad} + 0,00538 \text{ Grosor pared} * \text{Flujo} \\
 & + 0,00308 \text{ Grosor pared} * \text{Velocidad} - 0,000171 \text{ Flujo} * \text{Velocidad}
 \end{aligned}$$

11.5.3.4. Superficie de respuesta para error dimensional alto

Gráficas de superficie de Error alto

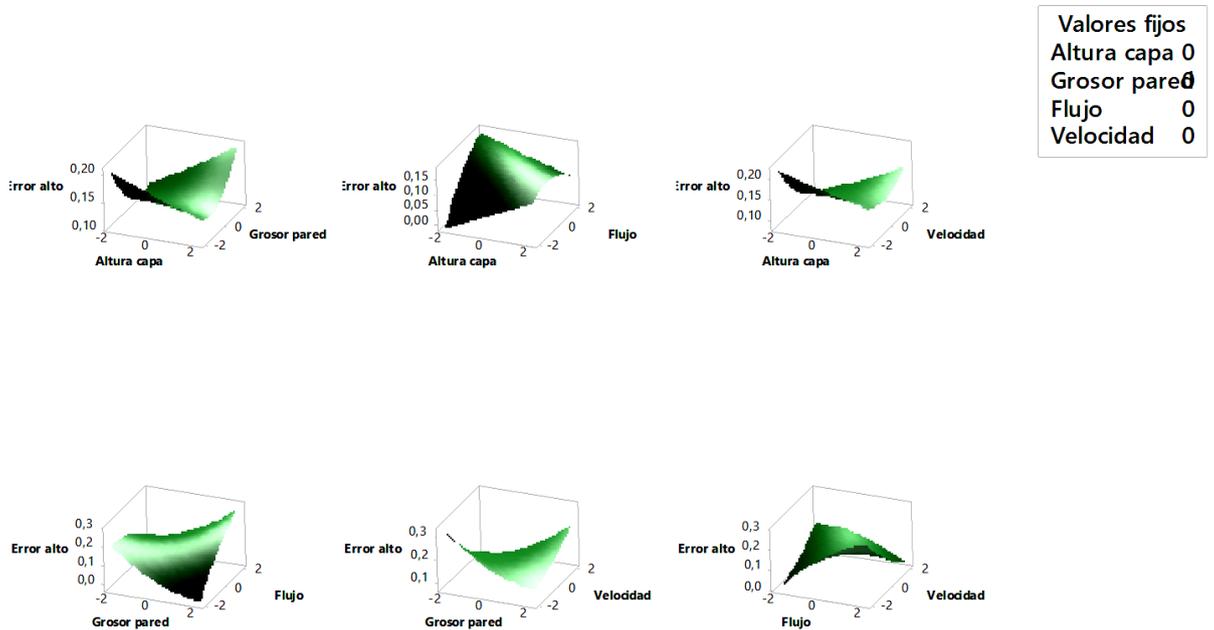


Gráfico 83 Superficie respuesta e.alto

11.5.4. Superficie de respuesta para Resiliencia.

Se ha optado por un diseño central compuesto de tres variables (las que fueron significativas en el cribado para la resiliencia) con 7 puntos centrales y un $\alpha=1.68$, este valor de α convierte el diseño de experimentos en rotatable, lo que significa que la varianza de la respuesta predicha es constante en esferas, o en otras palabras, que la calidad de la predicción es constante en la región estudiada [8]. El diseño de experimentos aplicado para esta variable expresado en variables naturales es el que se detalla a continuación (como el factor densidad de relleno no es significativo se mantiene constante siendo igual a 15%)

run	tratamiento	TipoPt	Altura capa	Grosor pared	Flujo	Velocidad	Resiliencia
16	1	1	0,3	1	85	40	0,088
4	2	1	0,3	2	85	40	0,184
10	3	1	0,3	1	110	40	0,112
1	4	1	0,3	2	110	40	0,152
14	5	1	0,3	1	85	85	0,096
2	6	1	0,3	2	85	85	0,208
11	7	1	0,3	1	110	85	0,104
5	8	1	0,3	2	110	85	0,216
8	9	-1	0,3	0,6591035 85	97,5	62,5	0,096

3	10	-1	0,3	2,3408964 15	97,5	62,5	0,216
15	11	-1	0,3	1,5	76,47758962	62,5	0,176
6	12	-1	0,3	1,5	118,5224104	62,5	0,24
17	13	-1	0,3	1,5	97,5	24,659	0,088
18	14	-1	0,3	1,5	97,5	100,340	0,12
19	15	0	0,3	1,5	97,5	62,5	0,152
7	16	0	0,3	1,5	97,5	62,5	0,136
9	17	0	0,3	1,5	97,5	62,5	0,128
12	18	0	0,3	1,5	97,5	62,5	0,184
20	19	0	0,3	1,5	97,5	62,5	0,112
13	20	0	0,3	1,5	97,5	62,5	0,16

Tabla 63 Experimentos para superficie resupestada resiliencia

11.5.4.1. Análisis de la normalidad de los datos de la variable resiliencia

Gráfica de probabilidad de Resiliencia
Normal - 95% de IC

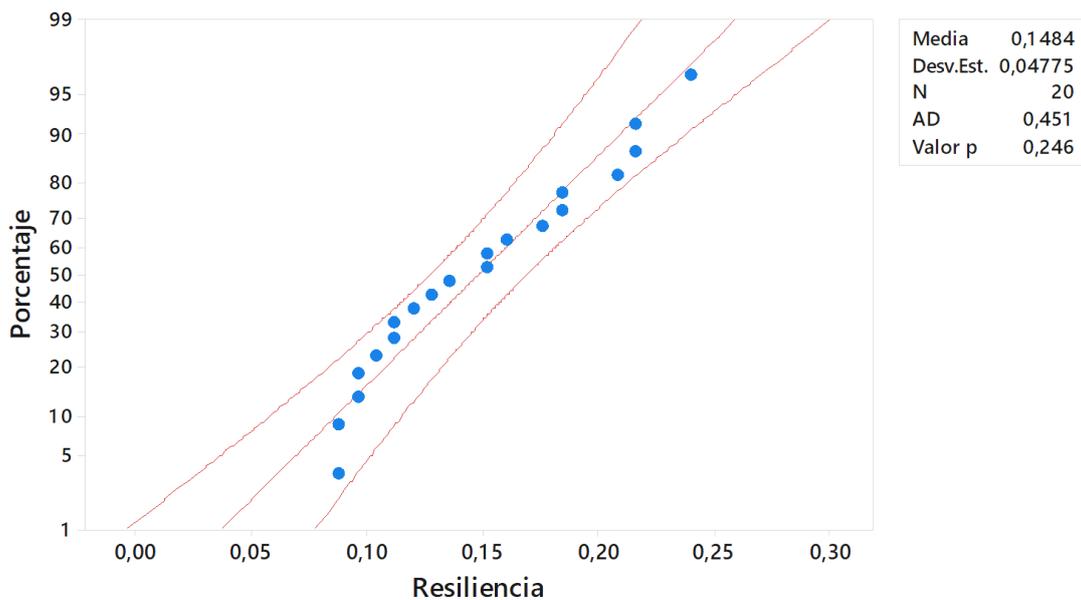


Gráfico 84 normalidad de los datos de la variable resiliencia

Como puede observarse los datos quedan enmarcados dentro de los límites lo cual queda confirmado con la curtosis y el sesgo estandarizado; por tanto, para su análisis no es necesaria la transformación de los datos.

Recuento	20
Promedio	0,1484
Mediana	0,144
Desviación Estándar	0,047752
Coefficiente de Variación	32,1779%
Mínimo	0,088

Máximo	0,24
Rango	0,152
Sesgo Estandarizado	0,750402
Curtosis Estandarizada	-0,966484

Tabla 64 Análisis de la normalidad de los datos de la variable resiliencia

11.5.4.2. Efectos significativos para la resiliencia

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	0,037874	0,004208	7,72	0,002
Lineal	3	0,025564	0,008521	15,63	0,000
Grosor Pared	1	0,023112	0,023112	42,40	0,000
Flujo	1	0,000979	0,000979	1,80	0,210
Velocidad	1	0,001473	0,001473	2,70	0,131
Cuadrado	3	0,010878	0,003626	6,65	0,010
Grosor Pared*Grosor Pared	1	0,000025	0,000025	0,05	0,835
Flujo*Flujo	1	0,005592	0,005592	10,26	0,009
Velocidad*Velocidad	1	0,004200	0,004200	7,71	0,020
Interacción de 2 factores	3	0,001432	0,000477	0,88	0,486
Grosor Pared*Flujo	1	0,000392	0,000392	0,72	0,416
Grosor Pared*Velocidad	1	0,000968	0,000968	1,78	0,212
Flujo*Velocidad	1	0,000072	0,000072	0,13	0,724
Error	10	0,005451	0,000545		
Falta de ajuste	5	0,002198	0,000440	0,68	0,661
Error puro	5	0,003253	0,000651		
Total	19	0,043325			

Tabla 65 Efectos significativos para la resiliencia

Gráfica de efectos principales para log(resiliencia)

Medias ajustadas

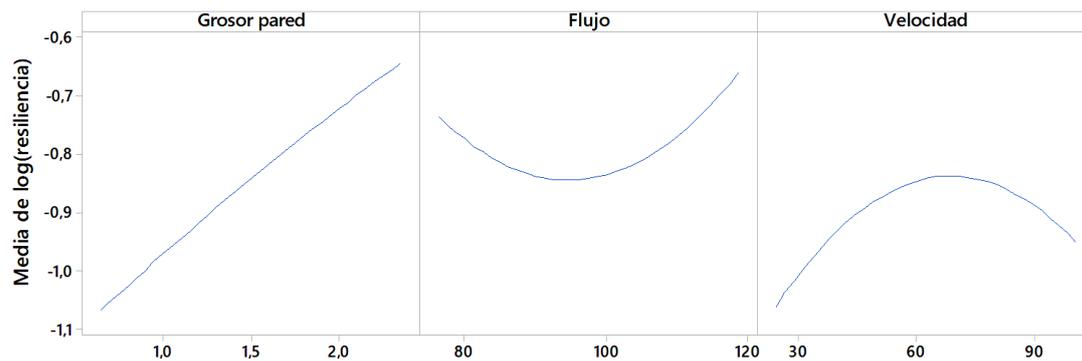


Gráfico 85 Efectos principales resiliencia

11.5.4.3. Ajuste del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0649368	88,77%	78,67%	60,96%

Tabla 66 Resumen modelo para la resiliencia

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 \log(\text{resiliencia}) = & 0,77 + 0,568 \text{ Grosor pared} - 0,0552 \text{ Flujo} + 0,01076 \text{ Velocidad} \\
 & - 0,0187 \text{ Grosor pared} * \text{Grosor pared} + 0,000320 \text{ Flujo} * \text{Flujo} \\
 & - 0,000112 \text{ Velocidad} * \text{Velocidad} - 0,00412 \text{ Grosor pared} * \text{Flujo} \\
 & + 0,00223 \text{ Grosor pared} * \text{Velocidad} + 0,000013 \text{ Flujo} * \text{Velocidad}
 \end{aligned}$$

11.5.4.4. Superficies de respuesta para Resiliencia

Gráficas de superficie de Resiliencia

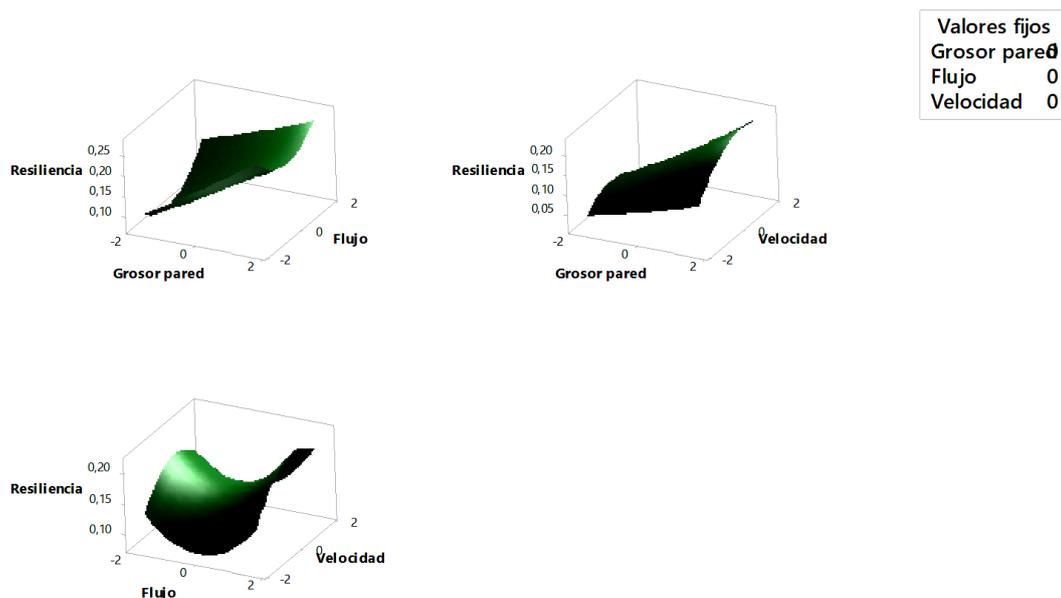


Gráfico 86 Superficies de respuesta para Resiliencia

11.5.5. Superficie de respuesta para rugosidad

11.5.5.1. Análisis de la normalidad de los datos de rugosidad

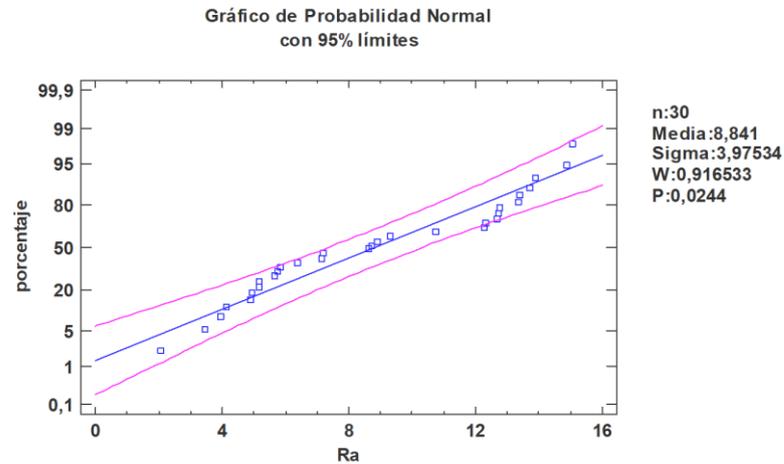


Gráfico 87 Análisis de la normalidad de los datos de rugosidad

Recuento	30
Promedio	8,841
Mediana	8,67
Desviación Estándar	3,97534
Coefficiente de Variación	44,9649%
Mínimo	2,07
Máximo	15,08
Rango	13,01
Sesgo Estandarizado	0,18931
Curtosis Estandarizada	-1,627

Tabla 67 Análisis de la normalidad de los datos de rugosidad

11.5.5.2. Efectos significativos para rugosidad

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	0,127143	0,0350278	
A:Altura capa	0,0075	0,0378343	1,0
B:Grosor pared	-0,00583333	0,0378343	1,0
C:Flujo	0,0408333	0,0378343	1,0
D:Velocidad	-0,0325	0,0378343	1,0
AA	0,0016369	0,034661	1,0288
AB	0,01875	0,0463374	1,0
AC	-0,02875	0,0463374	1,0
AD	0,01875	0,0463374	1,0
BB	0,0191369	0,034661	1,0288
BC	0,05375	0,0463374	1,0

BD	0,04625	0,0463374	1,0
CC	-0,0183631	0,034661	1,0288
CD	-0,05125	0,0463374	1,0
DD	0,0141369	0,034661	1,0288

Tabla 68 Efectos significativos para rugosidad

Gráfica de efectos principales para Rugosidad Medias ajustadas

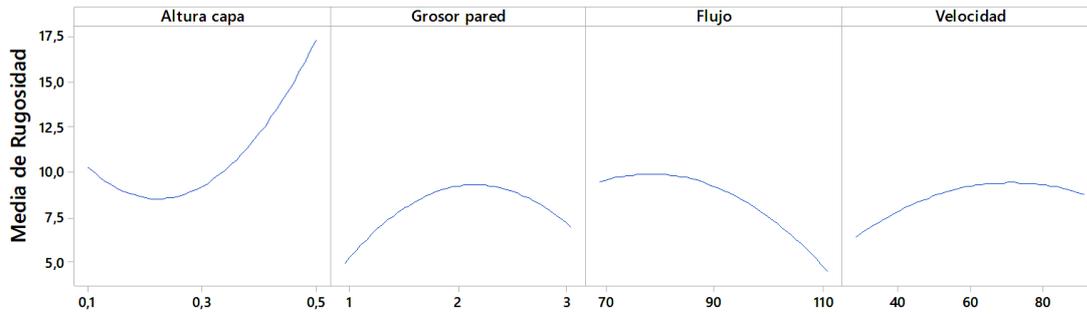


Gráfico 88 Efectos principales rugosidad

Diagrama de Pareto Estandarizada para e.alto

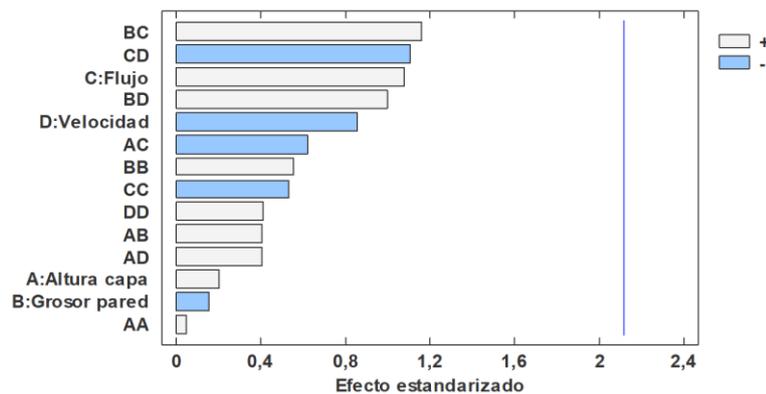


Gráfico 89 Pareto e.alto

En el rango de valores estudiado no aparece variable alguna con significación, lo cual lleva a pensar que o bien se trata de un sistema con caídas abruptas de significación, o bien que existe una gran variabilidad o que ha habido un fallo de medida, humano o metodológico. **De estos resultados no se pueden sacar conclusiones robustas.**

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3,56784	55,56%	16,67%	0,00%

Tabla 69 Resumen modelo para rugosidad

11.5.5.3. Ajuste del modelo para rugosidad

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidad} = & 6,5 - 182 \text{ Altura capa} + 19,6 \text{ Grosor pared} + 0,28 \text{ Flujo} - 0,062 \text{ Velocidad} \\
 & + 114,1 \text{ Altura capa} * \text{Altura capa} - 2,97 \text{ Grosor pared} * \text{Grosor pared} \\
 & - 0,00504 \text{ Flujo} * \text{Flujo} - 0,00163 \text{ Velocidad} * \text{Velocidad} \\
 & - 18,4 \text{ Altura capa} * \text{Grosor pared} + 1,551 \text{ Altura capa} * \text{Flujo} \\
 & + 0,480 \text{ Altura capa} * \text{Velocidad} - 0,022 \text{ Grosor pared} * \text{Flujo} \\
 & + 0,012 \text{ Grosor pared} * \text{Velocidad} + 0,00140 \text{ Flujo} * \text{Velocidad}
 \end{aligned}$$

11.5.5.4. Superficie de respuesta para rugosidad

Gráficas de superficie de Ra

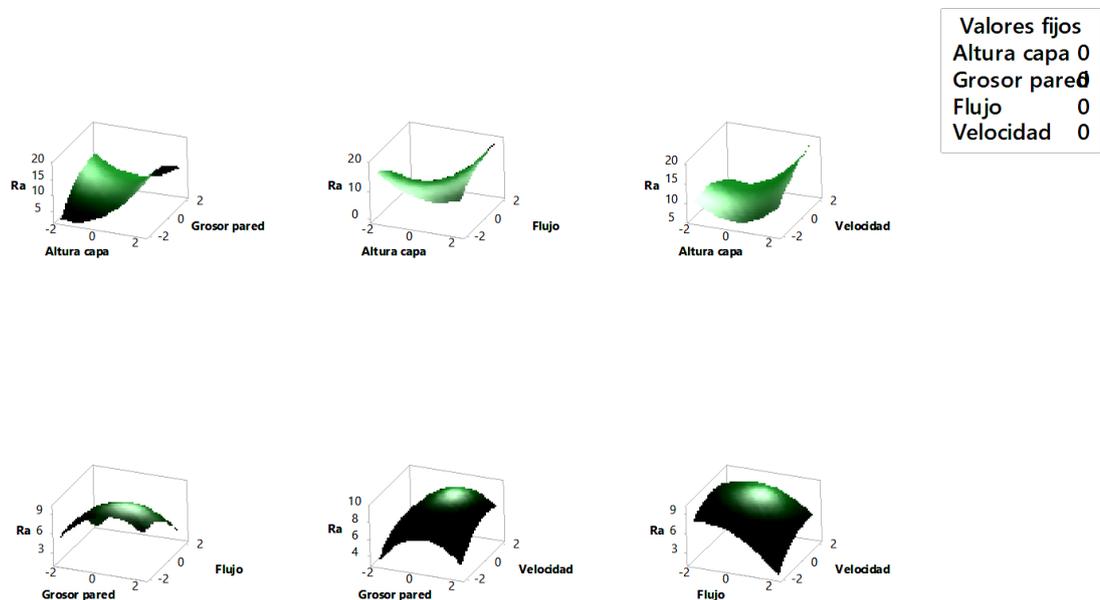


Gráfico 90 Superficie de respuesta para rugosidad

11.5.6. Superficie de respuesta para tiempo de impresión

11.5.6.1. Análisis de la normalidad de los datos de tiempo de impresión

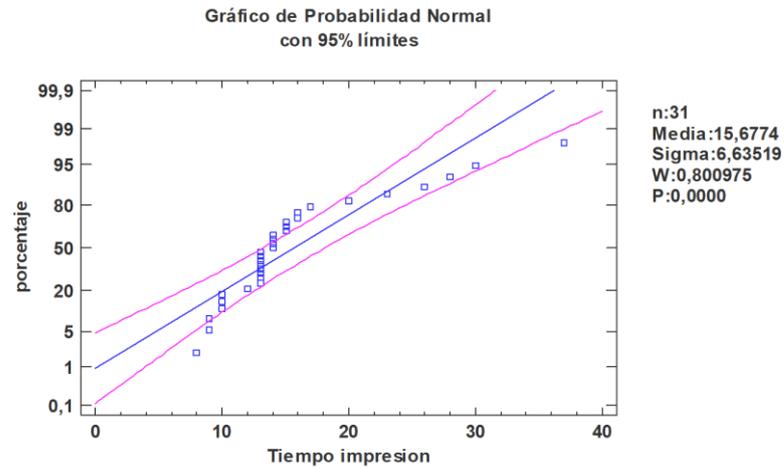


Gráfico 91 Análisis de la normalidad de los datos de tiempo de impresión

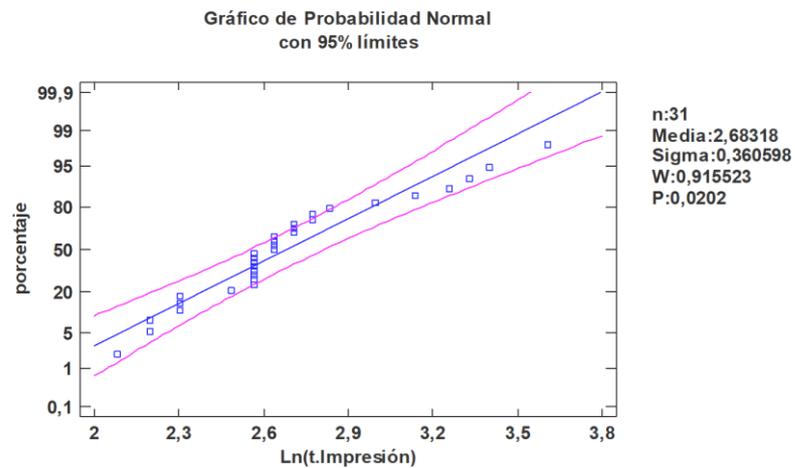


Gráfico 92 Análisis de la normalidad de los datos de tiempo de impresión

Recuento	31
Promedio	2,68318
Mediana	2,63906
Desviación Estándar	0,360598
Coefficiente de Variación	13,4392%
Mínimo	2,07944
Máximo	3,61092
Rango	1,53148
Sesgo Estandarizado	1,94099
Curtosis Estandarizada	0,753254

Tabla 70 Análisis de la normalidad de los datos de tiempo de impresión

11.5.6.2. Efectos significativos para tiempo de impresión

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Altura capa	1,5323	1	1,5323	295,28	0,0000
B:Grosor pared	0,0549655	1	0,0549655	10,59	0,0050
C:Relleno	0,0488317	1	0,0488317	9,41	0,0074
D:Velocidad	1,83692	1	1,83692	353,99	0,0000
AA	0,113663	1	0,113663	21,90	0,0003
AB	0,00585704	1	0,00585704	1,13	0,3038
AC	0,00225619	1	0,00225619	0,43	0,5190
AD	0,00271818	1	0,00271818	0,52	0,4797
BB	0,00276748	1	0,00276748	0,53	0,4758
BC	0,00170171	1	0,00170171	0,33	0,5748
BD	0,0017168	1	0,0017168	0,33	0,5732
CC	0,00254351	1	0,00254351	0,49	0,4939
CD	0,00271818	1	0,00271818	0,52	0,4797
DD	0,227838	1	0,227838	43,91	0,0000
Error total	0,0830276	16	0,00518923		
Total (corr.)	3,90093	30			

Tabla 71 Efectos significativos para tiempo de impresión

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0720363	97,87%	96,01%	87,74%

Tabla 72 Resumen modelo para tiempo de impresión

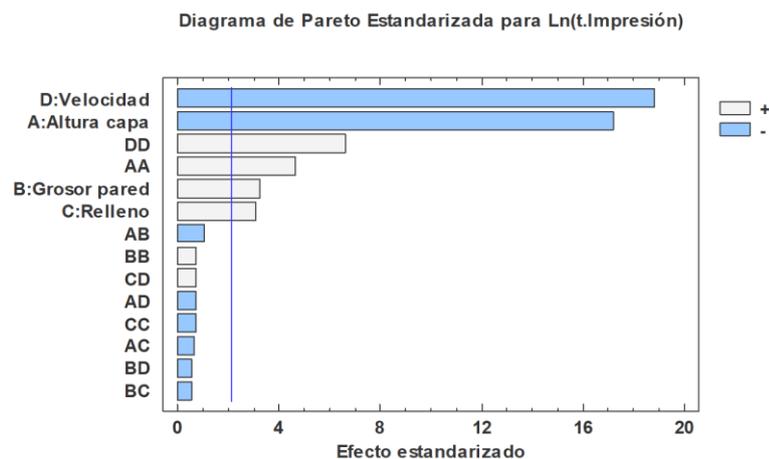


Gráfico 93 Pareto ln(t.impresión)

11.5.6.3. Ajuste del modelo para tiempo de impresión

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\ln(t.i, \text{impresión}) = 4,820 - 5,28 \text{ Altura capa} + 0,143 \text{ Grosor pared} + 0,00592 \text{ Densidad relleno}$$

$$- 0,03260 \text{ Velocidad} + 6,30 \text{ Altura capa} * \text{Altura capa}$$

$$+ 0,0175 \text{ Grosor pared} * \text{Grosor pared}$$

$$- 0,000031 \text{ Densidad relleno} * \text{Densidad relleno}$$

$$+ 0,000176 \text{ Velocidad} * \text{Velocidad} - 0,255 \text{ Altura capa} * \text{Grosor pared}$$

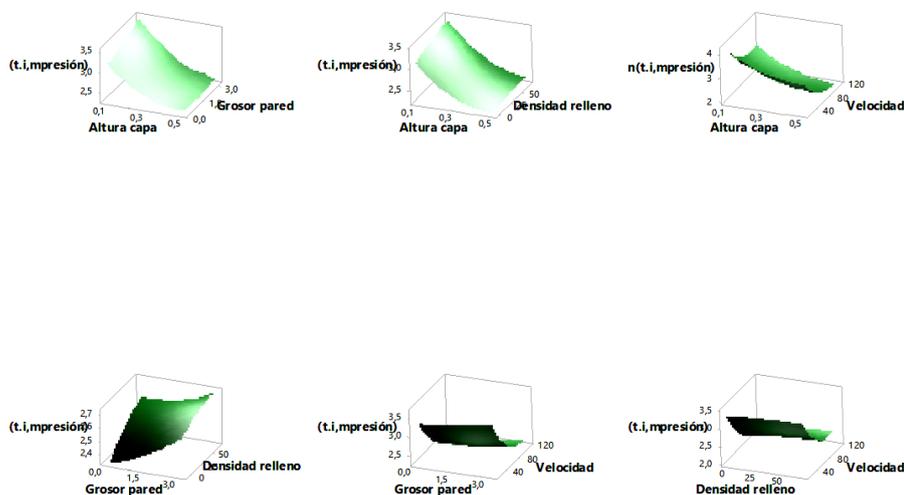
$$- 0,0068 \text{ Altura capa} * \text{Densidad relleno} - 0,00579 \text{ Altura capa} * \text{Velocidad}$$

$$- 0,00079 \text{ Grosor pared} * \text{Densidad relleno} - 0,00061 \text{ Grosor pared} * \text{Velocidad}$$

$$+ 0,000033 \text{ Densidad relleno} * \text{Velocidad}$$

11.5.6.4. Superficie de respuesta para tiempo de impresión

Gráficas de superficie de Ln(t.i, impresión)



Valores fijos	
Altura capa	0,3
Grosor pared	1,75
Densidad relleno	2,5
Velocidad	62,5

Gráfico 94 Superficie de respuesta para tiempo de impresión

11.5.7. Superficie de respuesta para peso

11.5.7.1. Análisis de la normalidad de los datos de peso

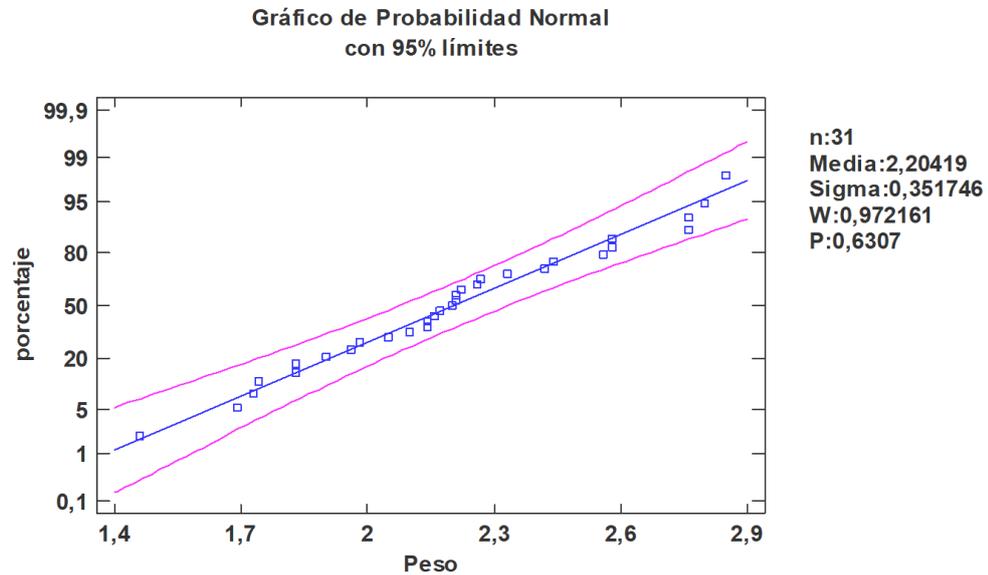


Gráfico 95 Análisis normalidad peso

11.5.7.2. Efectos significativos para peso

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	3,49619	0,24973	18,54	0,000
Lineal	4	3,36175	0,84044	62,38	0,000
Altura capa	1	3,01750	3,01750	223,97	0,000
Grosor pared	1	0,00070	0,00070	0,05	0,822
Densidad relleno	1	0,31054	0,31054	23,05	0,000
Flujo	1	0,03300	0,03300	2,45	0,137
Cuadrado	4	0,04436	0,01109	0,82	0,529
Altura capa*Altura capa	1	0,00113	0,00113	0,08	0,776
Grosor pared*Grosor pared	1	0,03767	0,03767	2,80	0,114
Densidad relleno*Densidad relleno	1	0,00004	0,00004	0,00	0,956
Flujo*Flujo	1	0,00880	0,00880	0,65	0,431
Interacción de 2 factores	6	0,09009	0,01501	1,11	0,397
Altura capa*Grosor pared	1	0,00051	0,00051	0,04	0,849
Altura capa*Densidad relleno	1	0,01381	0,01381	1,02	0,326
Altura capa*Flujo	1	0,07156	0,07156	5,31	0,035
Grosor pared*Densidad relleno	1	0,00031	0,00031	0,02	0,882
Grosor pared*Flujo	1	0,00391	0,00391	0,29	0,598
Densidad relleno*Flujo	1	0,00001	0,00001	0,00	0,983
Error	16	0,21556	0,01347		
Falta de ajuste	10	0,12687	0,01269	0,86	0,605
Error puro	6	0,08869	0,01478		

Total	30	3,71175			
--------------	----	---------	--	--	--

Gráfica de efectos principales para Peso Medias ajustadas

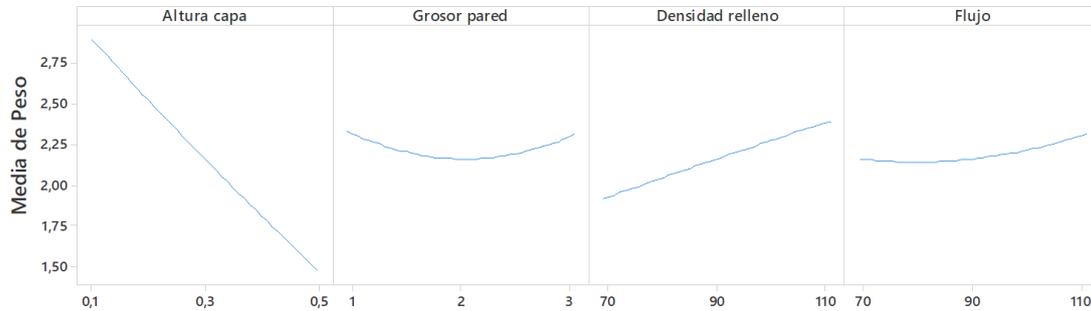


Gráfico 96 Efectos significativos peso

11.5.7.3. Ajuste del modelo para peso

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,116071	94,19%	89,11%	77,06%

11.5.7.4. Superficie de respuesta para peso

Gráficas de superficie de Peso

Valores fijos	
Altura capa	0,3
Grosor pared	2
Densidad relleno	90
Flujo	90

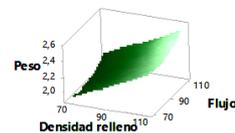
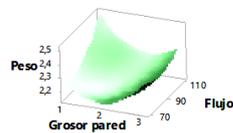
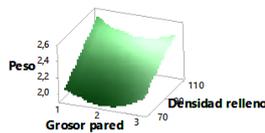
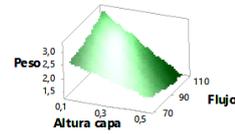
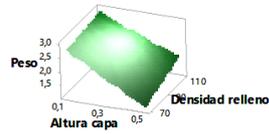
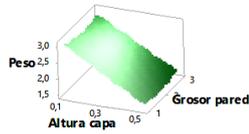


Gráfico 97 Superficie respuesta peso

11.6. Comparación de modelos predictivos

Como se ha podido observar el modelo más simple era el que mejor caracterizaba en teoría el comportamiento del sistema, pero al añadirse los centros se ha visto que el ajuste podía mejorarse. Al pasar a un modelo no lineal las capacidad predictiva ha bajado lo que da pie a pensar que es un sistema con una alta variabilidad en la mayoría de los medibles seleccionados o que las mediciones se podrían haber hecho mejor. La capacidad predictiva del modelo de resiliencia ha pasado de un 18,88% a más de un 60%, esto refuerza la teoría de las mediciones mejorables ya que en el péndulo de charpi el factor humano interviene mínimamente, no siendo así en las otras medidas.

11.7. Función de deseabilidad

Como se ha mencionado en apartados anteriores se va a emplear una función de deseabilidad general para tratar de optimizar simultáneamente diferentes variables. Pero en un primer momento se optimizarán de forma individual para tener un punto de referencia.

11.7.1. Optimización de respuesta individual: Error alto

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Error alto	Objetivo	-0,0000000	0	0,32	1	1

Tabla 73 Parámetros error alto

Rangos de variables

Variable	Valores
Altura capa	(0,1; 0,5)
Grosor pared	(1; 3)
Flujo	(80; 110)
Velocidad	(30; 90)

Tabla 74 Rangos variables error alto

Solución

Solución	Altura capa	Grosor pared	Flujo	Velocidad	Error alto Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	0,3	1,87039	110	90	0,0000000	1

Tabla 75 configuración para error alto

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor configuración de
Altura capa	0,3
Grosor pared	1,87039
Flujo	110
Velocidad	90

Tabla 76 valor de los factores

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Error alto	0,000	0,137	(-0,290; 0,290)	(-0,350; 0,350)

Valor medio de las probetas ensayadas:

Variable	Mediana	Error estándar de la media	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Error Alto	0,0667	0,0219	0,0379	0,0400	0,0400	0,0500	0,1100	0,1100

Tabla 77 Resultado optimización error alto

11.7.2. Optimización de respuesta individual: Error ancho

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Error ancho	Objetivo	-0,0000000	0	0,64	1	1

Rangos de variables

Variable	Valores
Altura capa	(0,1; 0,5)
Grosor pared	(1; 3)
Flujo	(80; 110)
Velocidad	(30; 90)

Solución

Solución	Altura capa	Grosor pared	Flujo	Velocidad	Error ancho Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	0,432287	2,99174	82,4237	33,0687	0,0000000	1,00000

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor configuración de
Altura capa	0,432287
Grosor pared	2,99174
Flujo	82,4237
Velocidad	33,0687

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Error ancho	0,000	0,187	(-0,396; 0,396)	(-0,457; 0,457)

Valores obtenidos de las probetas:

Variable	Media	Error estándar de la media	Desv. Es t.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
error Ancho	0,06333	0,00882	0,01528	0,05000	0,05000	0,06000	0,08000	0,08000

11.7.3. Optimización de respuesta individual: Error largo

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Error largo	Objetivo	-0,0000000	0	0,5	1	1

Solución

Solución	Altura capa	Grosor pared	Flujo	Velocidad	Error largo Ajuste	Deseabilidad compuesta

1	0,5	1	78,7133	90	0,000000	1,00000
---	-----	---	---------	----	----------	---------

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor configuración	de
Altura capa	0,5	
Grosor pared	1	
Flujo	78,7133	
Velocidad	90	

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Error largo	0,000	0,289	(-0,614; 0,614)	(-0,664; 0,664)

Valores obtenidos de las probetas:

Variable	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Error Largo	0,09333	0,00667	0,01155	0,08000	0,08000	0,10000	0,10000	0,10000

11.7.4. Optimización de respuesta individual: Rugosidad

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Rugosidad	Objetivo	-0,0000000	0	15,08	1	1

Solución

Solución	Altura capa	Grosor pared	Flujo	Velocidad	Rugosidad Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	0,360412	3	110	30	0,0000000	1,00000

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor configuración	de
Altura capa	0,360412	
Grosor pared	3	
Flujo	110	
Velocidad	30	

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Rugosidad	0,00	8,07	(-17,12; 17,12)	(-18,71; 18,71)

Valores obtenidos de las probetas:

Variable	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Rugosidad	3,160	0,562	0,973	2,070	2,070	3,470	3,940	3,940

11.7.5. Optimización de respuesta individual: Resiliencia

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Resiliencia	Máximo	0,088	0,24		1	1

Solución

Solución	Grosor pared	Flujo	Velocidad	Resiliencia Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	2,34090	76,4776	78,1713	0,288206	1

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
Grosor pared	2,3409
Flujo	76,4776
Velocidad	78,1713

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Resiliencia	0,2882	0,0372	(0,2054; 0,3710)	(0,1904; 0,3860)

Valores obtenidos de las probetas:

Variable	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Resiliencia	0,24667	0,00333	0,00577	0,24000	0,24000	0,25000	0,25000	0,25000

11.7.1. Optimización de respuesta individual: peso

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
Altura capa	0,5
Grosor pared	2,11111
Densidad relleno	70
Flujo	110

Valores obtenidos de las probetas:

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Peso	0,997	0,256	(0,455; 1,540)	(0,401; 1,593)

11.7.1. Optimización de respuesta individual: tiempo de impresión.

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
Altura capa	0,439394
Grosor pared	3
Densidad relleno	15
Velocidad	84,6465

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
tiempo de impresion	7,40	2,90	(1,26; 13,54)	(-0,29; 15,09)

El tiempo de impresión ha sido de 7 minutos en cada una de las probetas. Llama fuertemente la atención que no salga una velocidad de 100mm/s, esto puede deberse a la pérdida de información que se da al haber hecho experimentos 2^k en vez de 3^k , y por otro lado las interacciones que aparecen entre los diferentes factores.

11.8. Comparación de resultados de las probetas ensayadas vs las predicciones en optimización simple.

Como se ha observado todas las medias de las probetas ensayadas para la optimización simple entraban dentro de los márgenes predichos a pesar de la poca fuerza predictiva del modelo. Para la realización de las optimizaciones se han impreso 3 probetas para la comparación entre la predicción y el resultado.

En el presente apartado se realizarán varias optimizaciones multiobjetivo de tipo maximización/minimización con igual ponderación para las variables a optimizar ya que optimizaciones multiobjetivo con diferentes ponderaciones existen infinitas y de tener ponderaciones idénticas que diesen como resultado optimizaciones con el mismo nivel de importancia de las variables a optimizar se tendrían 127 posibilidades.

Para las optimizaciones se ha empleado Minitab. Se han acotado los valores en los que puede funcionar la impresora siendo los siguientes:

FACTOR	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
Altura capa	0.1	0.4
Grosor pared	1	3
Densidad de relleno	15	60
Flujo	40	90
Velocidad	20	100

Tabla 78 Límites para optimización multiobjetivo

11.8.1. Caso 1: Optimización simultanea de errores ancho, largo y rugosidad.

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Error ancho	Mínimo		0,02	0,64	1	1
Error largo	Mínimo		0,04	0,50	1	1
Rugosidad	Mínimo		2,07	15,08	1	1

Tabla 79 Límites para los parámetros optimización caso 1

Solución

Solución	Altura capa	Grosor pared	Flujo	Velocidad	Error ancho Ajuste	Error largo Ajuste	Rugosidad Ajuste
1	0,28	3	100	40	0,101384	0,0256264	3,32608

Tabla 80 Parametros para la optimización caso 1

Solución	Deseabilidad compuesta
1	0,922425

Tabla 81 Deseabilidad compuesta caso 1

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor configuración	de
Altura capa	0,281818	
Grosor pared	3	
Flujo	100	
Velocidad	40	
Densidad de relleno	15	

Tabla 82 factores caso 1

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Error ancho	0,101	0,135	(-0,184; 0,387)	(-0,264; 0,467)
Error largo	0,026	0,149	(-0,290; 0,341)	(-0,378; 0,430)
Rugosidad	3,33	4,46	(-6,13; 12,78)	(-8,78; 15,43)

Tabla 83 Valor de las respuestas en el caso 1

Estadísticas de las probetas impresas

Variable	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
c-error largo	0,12333	0,00333	0,00577	0,12000	0,12000	0,12000	0,13000
c-error ancho	0,1767	0,0176	0,0306	0,1500	0,1500	0,1700	0,2100
c-error alto	0,1767	0,0717	0,1242	0,1000	0,1000	0,1100	0,3200
c-Ra	10,75	2,25	3,90	8,30	8,30	8,70	15,25
c-resiliencia	0,18133	0,00267	0,00462	0,17600	0,17600	0,18400	0,18400
tiempo impresión	42,367	0,318	0,551	42,000	42,000	42,100	43,000

Tabla 84 Estadísticas de las probetas impresas

Como se puede observar los valores obtenidos entran dentro de los intervalos predichos.

11.8.2. Caso 2: Optimización simultanea de resiliencia, tiempo de impresión y peso.

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
peso	Mínimo		6,00	7	1	1
tiempo de impresión	Mínimo		16,00	50	1	1
Resiliencia	Máxima	0,088	0,24		1	1

Tabla 85 Objetivos caso 2

Solución

Solución	Grosor pared	Flujo	Velocidad	peso Ajuste	tiempo de impresión Ajuste	Resiliencia Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	2,14242	80	90	6,35787	14,7986	0,239411	0,861611

Tabla 86 Valor para los factores caso 2

Variable	Valor de configuración
Grosor pared	2,14242
Flujo	80
Velocidad	90
Densidad relleno	15
Altura capa	0,2

Tabla 87 Valor para los factores caso 2

Predicción de respuesta múltiple para el caso 2:

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
peso	6,358	0,391	(5,486; 7,230)	(5,266; 7,449)
tiempo de impresión	14,80	2,53	(9,16; 20,44)	(7,74; 21,85)
Resiliencia	0,2394	0,0310	(0,1702; 0,3086)	(0,1529; 0,3260)

Tabla 88 Predicción de respuesta múltiple caso 2

Estadísticas de las probetas impresas

Variable	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
C2-error largo	0,15667	0,00333	0,00577	0,15000	0,15000	0,16000	0,16000
C2-error ancho	0,1200	0,0503	0,0872	0,0600	0,0600	0,0800	0,2200
C2-error alto	0,1467	0,0145	0,0252	0,1200	0,1200	0,1500	0,1700
C2-Ra	7,91	3,62	6,27	3,47	3,47	5,18	15,08
C2-resiliencia	0,21000	0,00503	0,00872	0,20000	0,20000	0,21400	0,21600
tiempo impresión	20,333	0,333	0,577	20,000	20,000	20,000	21,000
peso	6,667	0,333	0,577	6,000	6,000	7,000	7,000

Tabla 89 Estadísticas de las probetas impresas

Como se puede observar los valores obtenidos entran dentro de los intervalos predichos.

12. CONCLUSIONES

Antes de estudiar las diferentes variables mediante el anova se ha debido comprobar su normalidad y en caso de no ser normales realizar una transformación.

Factor	Normalidad	Transformación	Normalidad tras la transformación
Error dimensional largo	Si	-	-
Error dimensional ancho	No	Logarítmica	si
Error dimensional alto	si	-	-
Resiliencia	No	Logarítmica	si
Rugosidad media	No	Logarítmica	si
Tiempo impresión	si	-	-
Peso	No	-	-

Tabla 90 Necesidad de transformación de las variables

Al aplicar el ANOVA se ha visto cuales eran los factores que eran significativos y las interacciones entre estos:

Variable/factor	A: Altura capa	B: Grosor pared	C: Densidad relleno	D: Flujo	E: Velocidad	interacciones
Error largo				Si	Si	
Error ancho	Si			Si	Si	AD,DE
Error alto	Si	Si		Si	Si	AD,DE
Resiliencia	Si	si			Si	BD,BE,DE,AD,BDE
Rugosidad media (Ra)	Si	Si	Si		Si	(todas menos las que incluyen flujo)
Peso	Si	Si	Si	Si		ABC,ABCD

Tabla 91 Factores significativos

El sentido común para este proceso generalmente funciona, pero no siempre es así.

Es interesante que la densidad de relleno en la zona estudiada no afecta a la resistencia mecánica frente a golpes lo cual permite que se rebajen los tiempos de impresión sin que la resistencia se vea comprometida aunque si que lo haría la rugosidad media.

El parámetro que más aparece es la velocidad, incluso en la resiliencia, esto puede deberse a que unas pasadas más rápidas dificultan que los materiales se solidifiquen juntos y la pieza sea menos integral.

Es interesante ver como la altura de capa en el rango ensayado parece no afectar a los errores dimensionales de largo pero si a ancho y alto.

En este trabajo de fin de master se han hecho patentes las diferencias entre la teoría y la práctica.

En lo referente a las medidas de longitudes (errores) en las probetas ensayadas aparecían rebabas o filamentos sueltos típicos de la impresión 3d los cuales debían quitarse para no incurrir en un error mayor en el trabajo.

La medida de la rugosidad presento cierta dificultad ya que ciertas zonas de la probeta se salían de rango y esto volvía necesario realizar más medidas en las zonas cercanas sin ser estas exactamente la misma zona en todas las probetas. Para la medida de la rugosidad podría haberse medido la rugosidad en las paredes de las piezas y no solo en la cara superior, así se podría establecer a predecir mejor el resultado final de la pieza y no solo una relación cualitativa o proporcional entre rugosidad de la pieza pared/parte superior.

La medida de los tiempos de impresión también presento cierta dificultad ya que si se imprimía una pieza por primera vez debía esperar a que se calentase la cama caliente lo cual añadía un tiempo extra de espera el cual no salía reflejado, por otro lado, se vieron diferencias entre imprimir piezas en un día frío y uno caliente, en el caliente, la cama alcanzaba la temperatura de forma más rápida.

Las medidas de resiliencia parecen ser las más robustas, aunque tener un aparato de medida con mayor resolución hubiese arrojado más información.

Podría haberse incluido en un primer momento más variables, pero de trabajos anteriores y la bibliografía pareció ser lo indicado quedarse y estudiar a fondo las relaciones que se establecen entre las variables seleccionadas del trabajo.

En cuanto a los datos en si mismos se ve que la capacidad predictiva de los mismos es muy limitada, esto se debe a la gran variabilidad que introduce la máquina. Este hecho puede que en otras impresoras de mayor precio o con las mejoras estructurales que se mencionan en las primeras páginas de este documento, no se diera.

Finalmente se podría decir que lo que se esperaba era lo que salió, no hubo grandes sorpresas, a mayor velocidad, mayor rugosidad por ejemplo, lo que si que puede suponer un cambio es que estas relaciones no son todas lineales y esto puede ayudar a los que empleen esta técnica de fabricación a conseguir piezas que se ajusten más a unos deseos como puedan ser tiempo de impresión, peso, resistencia...

13. Líneas futuras

En primer lugar, sería muy interesante encontrar un modo de medir las dimensiones así como la rugosidad con una menor variabilidad. Esto llevaría consigo unos resultados mucho más robustos.

Durante el desarrollo de este tfm se desarrolló una interfaz con Excel para que cualquier usuario pudiese tener acceso a los resultados sin tener que hacer uso de software estadístico, el problema apareció cuando la macro del Excel se bloqueaba ya que el algoritmo del Solver encargado de hallar la solución que mejorase la función de deseabilidad no hacía su función correctamente. Podría usarse otro software como fuese Gusek y dejarlo accesible en una web o algo así.

Otra línea de trabajo sería la introducción de una variable más (temperatura de extrusión) y al conocerse mejor el comportamiento de las otras variables poder plantear experimentos de tipo fracción factorial.

14. Opinión personal

Si bien la técnica de superficie de respuesta es útil, los datos medidos no eran de la mayor calidad y por eso me ha decepcionado un poco la baja capacidad predictiva del modelo. Esta técnica requiere de hacer muchos ensayos, imprimir muchas probetas y llevar un orden exquisito, y al final todo esto se me ha hecho pesado.

15. PRESUPUESTO

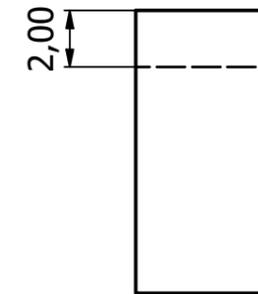
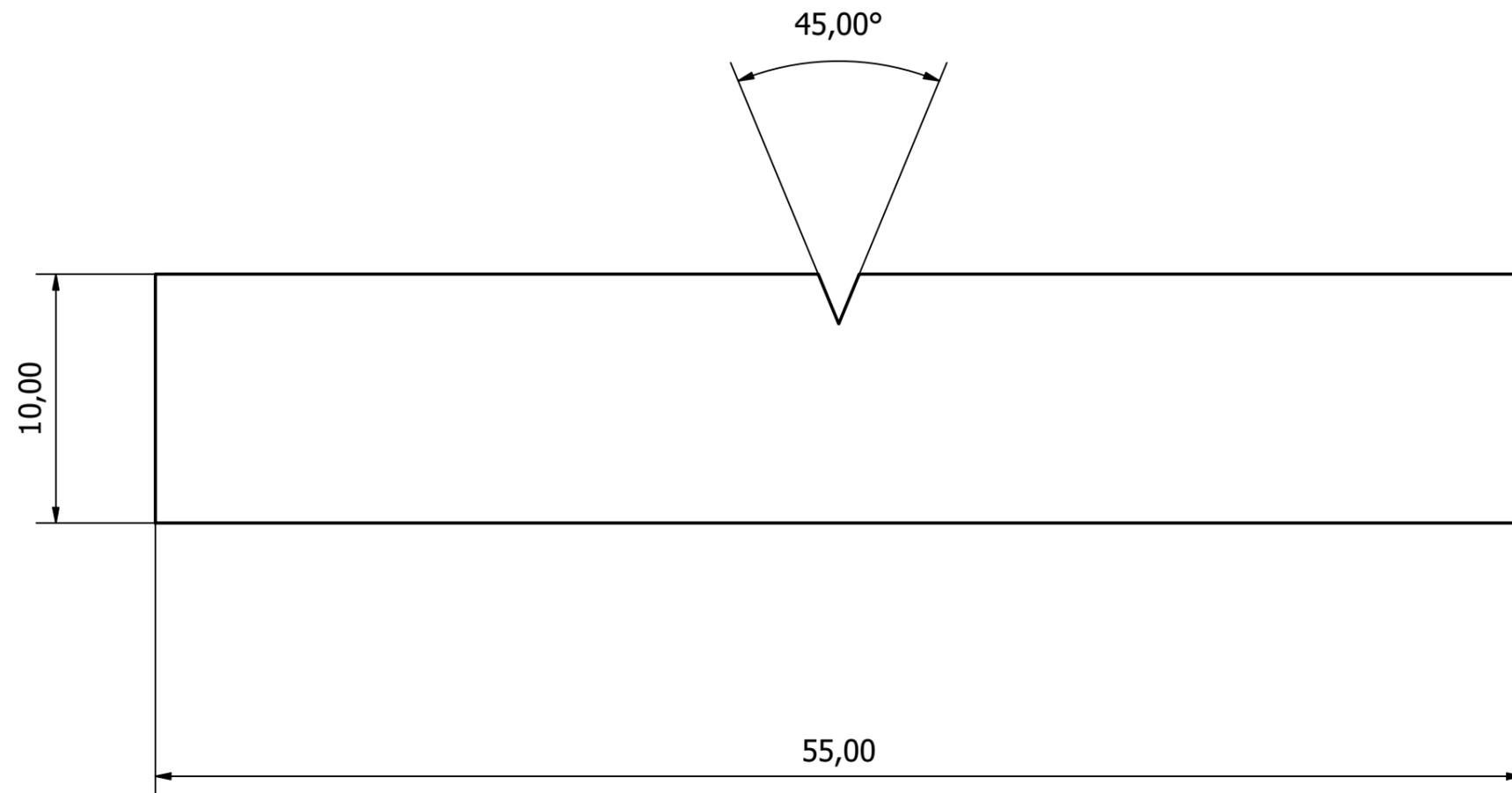
NºORD EN	Nº PRECIO	UD DESCRIPCIÓN UO	MEDICIÓN	PRECIO	IMPORT E(€)
Cap.1	1C	REDACCIOÓN DE LA MEMORIA			
01.01	P01.01	REDACCIOÓN DE LA MEMORIA			
	1	H INGENIERO	290	50	14500
		% COSTES DIRECTOS COMPLEMENTARIOS	0,02	14500	290
				Costes directos	14500
				Coste total	14790
Cap.2	2C	IMPRESIÓN DE PROBETAS			
02.01	P02.01	Ud impresión probetas			
	1	H PREINGENIERO	5	50	250
	2	MATERIAL	1	20	20
				Costes directos	270
				Coste total	270
Cap.3	3C	MEDICIONES			
03.01	P03.01	UD MEDICIÓN DE LAS PROBETAS			
	1	H INGENIERO	5	50	250
	5	% COSTES DIRECTOS COMPLEMENTARIOS	0,02	250	5
				Costes directos	255
				Coste total	255
NºORD EN	Nº PRECIO	UD DESCRIPCIÓN UO	MEDICIÓN	PRECIO	IMPORTE (€)
CAP.1	1C	REDACCIOÓN DE LA MEMORIA			

01.01	P01.01	REDACCIÓN DE LA MEMORIA	1	14790	14790
				TOTAL CAP1	14790
CAP.2	2C	IMPRESIÓN DE PROBETAS			
02.01	P02.01	Ud impresión probetas	1	270	270
				TOTAL CAP2	270
CAP.3	3C	MEDICIONES			
03.01	P03.01	UD MEDICIÓN DE LAS PROBETAS	1	255	255
				TOTAL CAP 3	255
		PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL			
		CAPÍTULO 1	14790	(€)	
		CAPÍTULO 2	270	(€)	
		CAPÍTULO 3	255	(€)	
		TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL	15315	(€)	
		13% GASTOS GENERALES	1990,95	(€)	
		6% BENEFICIO INDUSTRIAL	918,9	(€)	
		TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA	18224,85	(€)	
		21% IVA	3827,219	(€)	
		PRESUPUESTO TOTAL	22052,07	(€)	

El presupuesto del proyecto asciende a un total de veintidós mil cincuenta y dos euros con siete céntimos.



16. PLANOS



17. Referencias

- [1] C. A. Griffiths, J. Howarth, G. De Almeida-Rowbotham, A. Rees y R. Kerton, «A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 139, pp. 74-85, 15 12 2016.
- [2] S. Jiménez, F. Javier, F. D. La Puente y L. Geniz, «XVI CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GRÁFICA TÉCNICAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO».
- [3] «▷ Las 10 impresoras 3D más vendidas de 2019 | Impresora D3D,» [En línea]. Available: <http://impresorad3d.com/impresoras-3d-mas-vendidas-2018/>.
- [4] Electricidad tonin, «Electricidad tonin,» Electricidad tonin, 2020. [En línea]. Available: <https://www.electricidadtonin.com/anet-a8-preparando-disenando-nuestras-piezas/>. [Último acceso: 21 11 2020].
- [5] «Zona maker,» 21 11 2020. [En línea]. Available: <https://www.zonamaker.com/impresion-3d/software-imp3d/manual-de-cura>.
- [6] H. G. Pulido y R. de la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, McGraw-Hill International, 2008.
- [7] R. De la Vara Salazar y J. Domínguez Domínguez, «Métodos de superficie Multirespuesta: Un Estudio Comparativo,» *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, vol. 9, nº 1, p. 47, 29 4 2011.
- [8] D. C. Montgomery, «Chapter 9: Additional Design and Analysis Topics for Factorial and Fractional Factorial Designs,» de *Design and Analysis of Experiments (8th Edition)*, 2001, pp. 394-448.