INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY CAMPUS TOLUCA



OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE PARA LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA MÁQUINA HERRAMIENTA CNC EN EL MAQUINADO DE MOLDES DE ALUMINIO 7075 PARA COMPONENTES PLÁSTICOS AUTOMOTRICES

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ PRESENTA

ING. ENRIQUE CASTILLO SILVA

Asesor: Dra. Carmita Camposeco Negrete

Comité de tesis: Dra. Carmita Camposeco Negrete Presidenta Dr. Horacio Vieyra Ruíz Secretario M. en C. Karla Coyote Aguirre Vocal

> Toluca, Estado de México 3 de junio de 2020

A Dios,

A mi mamá, Zoila:

Por creer siempre en mí y no dejarme rendir nunca por apoyarme y demostrarme todos los días tu cariño estando siempre al pendiente mío aún en la distancia y por ser la persona más importante de mi vida Gracias,

esto va por ti...

Con amor

Quique

Resumen

Los recursos de energía fósil se desvanecen continuamente, es necesario encontrar formas para reducir el uso de energía eléctrica y evitar su desperdicio. Hoy en día, las personas son cada vez más conscientes del deterioro ambiental. Algunas palabras clave como el agotamiento de los recursos, el calentamiento global y las emisiones de efecto invernadero aparecen con más frecuencia en los titulares de las noticias y los principales temas de disputas políticas o económicas.

Desde el punto de vista de las tecnologías de producción, una de las maneras de mejorar el desempeño sustentable es reduciendo el consumo de energía de los procesos de maquinado. En el maquinado, el ahorro económico y la mejora del desempeño de sustentabilidad se puede lograr mediante la reducción de consumo energético debido a que la energía es un recurso esencial para la producción. Por lo tanto, si se reduce su consumo, los costos operativos y el impacto ambiental derivado de la producción serán disminuidos.

Se han llevado a cabo distintas investigaciones con el objetivo de encontrar modelos eficientes que minimicen el consumo de energía eléctrica por parte de las máquinas herramienta, variando ajustes como las estrategias de mecanizado o diversos parámetros de corte tanto en torneado como fresado, utilizando modelos de análisis como regresiones lineales, ANOVA o metodologías de Taguchi. Se han presentado estudios que trabajan con aleaciones de aluminio tales como la serie 7000 que se caracteriza por tener buenas propiedades de maquinabilidad. Sin embargo, no se ha considerado medir el consumo energético de la máquina herramienta CNC, durante el maquinado de moldes de aluminio 7075 para la manufactura de componentes plásticos del sector automotriz.

El presente trabajo de investigación muestra un estudio experimental relacionado con la optimización de los parámetros de corte involucrados en el fresado del aluminio 7075 para la manufactura de placas inserto de molde de un componente automotriz, empleando tres operaciones de mecanizado: desbaste, semi-acabado y acabado. Utilizando métodos de Taguchi, cuatro variables de respuesta fueron minimizadas: la energía consumida por el mecanizado, el tiempo de maquinado, la rugosidad superficial de las placas y el desgaste de la herramienta de corte.

De acuerdo con los resultados obtenidos y predicciones generadas basadas en modelos estadísticos para la ingeniería de calidad, es posible disminuir el impacto al medio ambiente mediante la reducción del consumo energético de la máquina herramienta, ya que la energía utilizada puede traducirse en emisiones de CO₂, por lo tanto si se reduce el consumo de energía eléctrica derivado por la manufactura, las emisiones del efecto invernadero también podrán ser minimizadas.

Agradecimientos

En esta sección deseo extender un gran agradecimiento hacia aquellas personas e Instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de tesis.

En primer lugar, le agradezco fuertemente a mi mamá Zoila, por haberme dado la vida que desde entonces he podido gozar, le agradezco por siempre amarme, cuidarme, consolarme, enseñarme, motivarme, quererme y apoyarme incondicionalmente en todas y cada una de mis necesidades y peticiones sin excepción alguna, dejándolo completamente todo a un lado por ponerme como su más linda prioridad. Sin su calidez y bella compañía, no me habría convertido en el hombre que soy ahora y que el día de hoy presenta este trabajo de tesis, el que con mucho esfuerzo y sacrificio, logramos completar.

Extiendo mi más sincero agradecimiento al ITESM Campus Toluca por haberme otorgado una beca de colegiatura.

Le agradezco profundamente a mi asesora de tesis, mentora y profesora, la Dra. Carmita Camposeco Negrete, por otorgarme el alcance y todos los conocimientos necesarios para indagar en un tema tan importante como es el de la manufactura verde. Por alentarme, motivarme y convencerme de mi capacidad para aprender diversas disciplinas de ingeniería, las cuales desconocía con anterioridad a mi llegada al programa de Maestría en Ingeniería Automotriz. Sin olvidar mencionar y reconocer su constante intervención para enriquecer el trabajo de investigación realizado en el transcurso de estos 2 años.

Me gustaría darle las gracias al Dr. Horacio Vieyra y a la M. en C. Karla Coyote, por su gran participación como sinodales en este trabajo de tesis desde sus comienzos y por haberse involucrado en el tema de esta investigación, complementando el análisis y los resultados obtenidos desde el punto de vista del campo de conocimientos y la experiencia de ambos.

Deseo agradecerle al Dr. Alfredo Santana por confiar en mí y permitirme tanto el uso de la fresadora Mini HAAS de la celda de manufactura, como también el equipo de instrumentación electrónica para la adquisición de datos de la energía consumida por la misma máquina herramienta, con los que realicé todos los experimentos de fresado mostrados en este proyectos.

También agradezco a todo el personal de laboratorio de mecatrónica automotriz, por haberme brindado el apoyo requerido y facilitarme las herramientas necesarias para trabajar los experimentos ejecutados con los equipos especializados del CIMA por cada vez que se requirió de su uso. Además, agradezco al ITESM Campus Estado de México por permitirme el uso del laboratorio de mecánica para utilizar el medidor de dureza del material de trabajo empleado.

Les agradezco de corazón a todos mis compañeros de maestría quienes me extendieron la mano y me brindaron su apoyo en momentos específicos cuando no había nadie más que me pudiera guiar en el aprendizaje de ciertas actividades y por colocar su granito de arena, contribuyendo a mi formación profesional y crecimiento personal durante mi estancia en el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA).

Agradezco al Dr. Alejandro Rojo por haberme dado la oportunidad de ingresar a este posgrado y de formar parte del Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA) como Ingeniero investigador de tiempo completo, donde tuve la oportunidad de involucrarme con el ramo automotriz, mediante los proyectos de colaboración de industria e investigación científica.

También le doy las gracias al Dr. Enrique Cárdenas y Castillo por compartirme sus enseñanzas de liderazgo y crecimiento humano de su trayectoria profesional durante su cátedra y el cómo mejorar el control de las emociones para una mejor toma de decisiones en la vida profesional.

En adición, le agradezco al Dr. Luis Alejandro Álvarez por extenderme su apoyo durante etapas tempranas de este proyecto de tesis, para poder cumplir con requisitos indispensables de diseño, gracias a sus conocimientos de modelación virtual y dibujo mecánico 3D en SolidWorks.

Extiendo mi gratitud hacia María Elizabeth Toledano, por brindarme su apoyo desde el departamento de administración escolar del ITESM en todos los trámites requeridos durante mi estancia en el Campus Toluca y por compartirme siempre su gran calidez humana.

Agradezco al Dr. Jorge Rodríguez Arce, por su apoyo dentro de la asignatura de Proyecto Integrador, al dar constante seguimiento de los procesos y requisitos previos para la presentación del examen de grado.

Índice general

RESUMEN		III
AGRADECIMIE	ENTOS	IV
ALCANCE DEL	L PROYECTO	1
Objetivo genera Objetivos especíi	NL FICOS	2
CAPÍTULO 1. A	NTECEDENTES	3
 MANUFACT MANUFACT MANUFACT CONSUMO I CONSUMO I A. CONSUMO I S. RELACIÓN I ALUMINIO 7 	'ura sustentable 'ura verde de energía eléctrica de energía de máquinas fresadoras de emisiones CO <mark>2</mark> 7075	

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE......9

2.1.	MOLDES	9
2.2.	FRESADO: RESPUESTA EN ENERGÍA CONSUMIDA	.11
2.3.	FRESADO: RESPUESTA EN TIEMPO DE MECANIZADO	.12
2.4.	FRESADO: RESPUESTA EN DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE CORTE	.13
2.5.	FRESADO: RESPUEST'A EN RUGOSIDAD SUPERFICIAL	.14

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL: PROCESO DE FRESADO 18

3.1.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EMPLEADA	18
3.2.	COMPONENTE ANALIZADO	20
3.3.	SIMULACIÓN DE COMPONENTE Y MÓDULOS CAD/CAM	22
3.4.	CONFIRMACIÓN DEL COMPONENTE FABRICADO VIRTUALMENTE	26
3.5.	MATERIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO Y ESPECIFICACIONES DE LA MÁQUINA HERRAMIENTA.	27
3.6.	PARÁMETROS RELACIONADOS CON LA HERRAMIENTA DE CORTE	28
3.7.	Metodología de Taguchi	33

3.8. D	ISEÑO ROBUSTO: RELACIÓN SEÑAL RUIDO Y GRÁFICAS S/N	
3.9. D	ISEÑO DE EXPERIMENTOS	
3.9.1.	Arreglo ortogonal	
3.9.2.	Parámetros de corte y sus niveles	
3.9.3.	Operaciones y sub-operaciones	
3.9.4.	Factores y niveles de las matrices de diseño L9	
3.9.5.	Asignación de herramientas por operación	
3.9.6.	Sistemas de medición de energía, rugosidad, dureza y desgaste	

4.1.	RESULTADOS DE PLACAS CORAZÓN Y CAVIDAD	
4.2.	ANÁLISIS DE DESBASTE PARA PLACA CORAZÓN	
4.2.	1. Respuesta a la Energía consumida	55
4.2.2	2. Respuesta al Tiempo de maquinado	
4.2.2	3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte	
4.3.	ANÁLISIS DE DESBASTE PARA PLACA CAVIDAD	61
4.3.	1. Respuesta a la Energía consumida	61
4.3.2	2. Respuesta al Tiempo de maquinado	63
4.3.	3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte	65
4.4.	ANÁLISIS DE SEMI-ACABADO PARA PLACA CORAZÓN	67
4.4.	1. Respuesta a la Energía consumida	
4.4.2	2. Respuesta al Tiempo de maquinado	69
4.4.2	3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte	71
4.5.	ANÁLISIS DE SEMI-ACABADO PARA PLACA CAVIDAD	73
4.5.	1. Respuesta a la Energía consumida	<i>73</i>
4.5.2	2. Respuesta al Tiempo de maquinado	75
4.5.	3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte	77
4.5.4	4. Respuesta a la Rugosidad superficial	
4.6.	ANÁLISIS DE ACABADO PARA PLACA CORAZÓN	
4.6.	1. Respuesta a la Energía consumida	
4.6.2	2. Respuesta al Tiempo de maquinado	
4.6.2	3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte	
4.6.4	4. Respuesta a la Rugosidad superficial	
4.7.	RESUMEN DE RESULTADOS	
4.8.	COMBINACIONES DE LOS NIVELES SUGERIDOS	
4.9.	CONFIRMACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS	
4.9.	1. Confirmación de tiempos de maquinado en módulo CAM	
4.10.	EQUIVALENCIA DE LA ENERGÍA CONSUMIDA A EMISIONES CO2	
4.11.	AHORRO EN ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA	
4.12.	AHORRO EN TIEMPO DE MAQUINADO	
4.13.	AHORRO EN DESGASTE DE LA HERRAMIENTA	
4.14.	AHORRO EN RUGOSIDAD SUPERFICIAL RA	
4.15.	RESUMEN DE AHORROS POR VARIABLE DE RESPUESTA	

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO 107

5.1.	CONCLUSIONES	.107
5.2.	TRABAJO A FUTURO	107

ANEXO A. MEDICIONES DE DESGASTE DE HERRAMIENTA. 108

ANEXO A1. HERRAMIENTAS DE DESBASTE EN PLACA CORAZÓN	
ANEXO A2. HERRAMIENTAS DE DESBASTE EN PLACA CAVIDAD	
ANEXO A3. HERRAMIENTAS DE SEMI-ACABADO EN PLACA CORAZÓN	111
ANEXO A4. HERRAMIENTAS DE SEMI-ACABADO EN PLACA CAVIDAD	113
ANEXO A5. HERRAMIENTAS DE ACABADO (CONTOUR AREA) EN PLACA CORAZÓN	114
ANEXO A6. HERRAMIENTAS DE ACABADO (FLOWCUT REF TOOL) EN PLACA CORAZÓN	116

ANEXO C. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) PARA MEDIAS Y S/N

ANEXO C1. RESPUESTAS DE DESBASTE EN PLACA CORAZÓN	
ANEXO C2. RESPUESTAS DE DESBASTE EN PLACA CAVIDAD	
ANEXO C3. RESPUESTAS DE SEMI-ACABADO EN PLACA CORAZÓN	
ANEXO C4. RESPUESTAS DE SEMI-ACABADO EN PLACA CAVIDAD	
ANEXO C5. RESPUESTAS DE ACABADO (CONTOUR AREA) EN PLACA CORAZÓN	
ANEXO C6. RESPUESTAS DE ACABADO (FLOWCUT REF TOOL) EN PLACA CORAZÓN	

BIBLIOGRAFÍA 155

Índice de figuras

Figura 1. Metodología de investigación empleada.	. 19
Figura 2. Cubierta de plástico perteneciente al ensamble de apertura y cierre de puerta.	. 20
Figura 3. Cubierta de plástico sustraída para su análisis	. 21
Figura 4. Automóvil MINI Cooper s año 2006	. 21
Figura 5. Componente automotriz virtual, fabricado en SolidWorks	. 22
Figura 6. Placas del molde del componente automotriz, fabricado en SolidWorl	ks . 23
Figura 7. Vista lateral de placa corazón, vista superior de placa cavidad, vistas isométricas de placa corazón y cavidad respectivamente.	. 23
Figura 8. Interfaz CAM en NX, selección de parámetros	. 24
Figura 9. Simulación experimental de placa corazón en NX, etapa inicial de desbaste.	. 25
Figura 10. Simulación experimental de placa corazón en NX, etapa intermedia o desbaste	de . 25
Figura 11. Simulación experimental de placa corazón en NX, etapa final de desbaste	. 26
Figura 12. Confirmación del componente en material plástico ASA.	. 26
Figura 13. Piezas de trabajo	. 27
Figura 14. Fresadora Mini HAAS	. 28
Figura 15. Herramienta #1 para desbaste	. 29
Figura 16. Herramienta #2 para semi-acabado	. 30
Figura 17. Herramienta #3 para acabado (Contour area)	. 31
Figura 18. Herramienta #4 para acabado (Flowcut ref. tool)	. 32

Figura 20. DEWESoft Sirius 8 canales
Figura 21. Configuración delta trifásica
Figura 22. Estación de trabajo del equipo de medición
Figura 23. Mitutoyo modelo SJ-201
Figura 24. Medición de rugosidad en superficie inferior de placa corazón 44
Figura 25. Medición de rugosidad en superficie superior de placa corazón 45
Figura 26. MACROMET 1 Hardness Tester 46
Figura 27. Prueba de dureza midiendo la resistencia a la penetración de la superficie
Figura 28. Medición de desgaste de herramienta en micrómetros para cortadores rectos
Figura 29. Medición de desgaste de herramienta en micrómetros para cortadores punta de bola
Figura 30. Fotografía de placas inserto en ángulo isométrico
Figura 31. Fotografía del ensamble de ambas placas inserto
Figura 32. Fotografía del total de placas corazón53
Figura 33. Fotografía del total de placas cavidad54
Figura 34. Gráfica de efectos para el consumo promedio de energía en placa corazón
Figura 35. Gráfica de efectos S/N para el consumo promedio de energía en placa corazón
Figura 36. Gráfica de efectos para el tiempo promedio en placa corazón
Figura 37. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio en placa corazón58
Figura 38. Gráfica de efectos para el desgaste promedio en placa corazón 60
Figura 39. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio en placa corazón. 60
Figura 40. Gráfica de efectos para el consumo promedio de energía en placa cavidad

Figura 41. Gráfica de efectos S/N para el consumo promedio de energía en placa cavidad
Figura 42. Gráfica de efectos para el tiempo promedio en placa cavidad
Figura 43. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio en placa cavidad 64
Figura 44. Gráfica de efectos para el desgaste promedio en placa cavidad
Figura 45. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio en placa cavidad66
Figura 46. Gráfica de efectos para el consumo promedio de energía en placa corazón
Figura 47. Gráfica de efectos S/N para el consumo promedio de energía en placa corazón
Figura 48. Gráfica de efectos para el tiempo promedio en placa corazón70
Figura 49. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio en placa corazón70
Figura 50. Gráfica de efectos para el desgaste promedio en placa corazón72
Figura 51. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio en placa corazón. 72
Figura 52. Gráfica de efectos para el consumo promedio de energía en placa cavidad
Figura 53. Gráfica de efectos S/N para el consumo promedio de energía en placa cavidad
Figura 54. Gráfica de efectos para el tiempo promedio en placa cavidad76
Figura 55. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio en placa cavidad76
Figura 56. Gráfica de efectos para el desgaste promedio en placa cavidad
Figura 57. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio en placa cavidad78
Figura 58. Gráfica de efectos para la rugosidad superficial promedio en placa cavidad
Figura 59. Gráfica de efectos S/N para la rugosidad superficial promedio en placa cavidad
Figura 60. Gráfica de efectos para el consumo de energía promedio (Contour area)

Figura 61. Gráfica de efectos para el consumo de energía promedio (Flowcut ref tool)
Figura 62. Gráfica de efectos S/N para el consumo de energía promedio (Contour area)
Figura 63. Gráfica de efectos S/N para el consumo de energía promedio (Flowcut ref tool)
Figura 64. Gráfica de efectos para el tiempo promedio (Contour area)
Figura 65. Gráfica de efectos para el tiempo promedio (Flowcut ref tool)
Figura 66. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio (Contour area) 86
Figura 67. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio (Flowcut ref tool) 86
Figura 68. Gráfica de efectos para el desgaste promedio (Contour area)
Figura 69. Gráfica de efectos para el desgaste promedio (Flowcut ref tool) 88
Figura 70. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio (Contour area) 89
Figura 71. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio (Flowcut ref tool).
Figura 72. Gráfica de efectos para la rugosidad superficial promedio en placa corazón
Figura 73. Gráfica de efectos S/N para la rugosidad superficial promedio en placa corazón
Figura A2.4. 56.73 µm de desgaste Corrida 4 de desbaste en placa cavidad110
Figura A2.6. 37.83 µm de desgaste Corrida 6 de desbaste en placa cavidad110
Figura A2.8. 89.47 µm de desgaste Corrida 8 de desbaste en placa cavidad110
Figura A6.3. 4.1 µm de desgaste Corrida 3 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón

Figura D1.2. Apariencia final en la operación desbaste con estrategia de corte Periferia sin fluido de corte145
Figura D1.3. Apariencia final en la operación desbaste con estrategia de corte Trocoidal sin fluido de corte145
Figura D1.4. Apariencia final en la operación desbaste con estrategia de corte Zigzag sin fluido de corte
Figura D1.5. Comparación entre estrategias de corte, Periferia vs Zigzag146
Figura D2.1. Fin de corrida de desbaste en placa cavidad sin fluido de corte 147
Figura D2.2. Desbaste irregular sin fluido de corte en placa cavidad148
Figura D2.3. Apariencia final de una corrida de desbaste irregular sin fluido de corte
Figura D2.4. Apariencia final de una corrida de desbaste regular sin fluido de corte
Figura D2.5. Comparación de corridas desbaste sin fluido de corte regular e irregular respectivamente
 Figura D2.5. Comparación de corridas desbaste sin fluido de corte regular e irregular respectivamente
 Figura D2.5. Comparación de corridas desbaste sin fluido de corte regular e irregular respectivamente
 Figura D2.5. Comparación de corridas desbaste sin fluido de corte regular e irregular respectivamente
 Figura D2.5. Comparación de corridas desbaste sin fluido de corte regular e irregular respectivamente
 Figura D2.5. Comparación de corridas desbaste sin fluido de corte regular e irregular respectivamente
Figura D2.5. Comparación de corridas desbaste sin fluido de corte regular e irregular respectivamente
 Figura D2.5. Comparación de corridas desbaste sin fluido de corte regular e irregular respectivamente

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones de la herramienta de corte utilizada para el desbaste	29
Tabla 2. Especificaciones de la herramienta de corte utilizada para el semi- acabado	30
Tabla 3 Especificaciones de la herramienta de corte utilizada para el acabado (Contour area)	31
Tabla 4 Especificaciones de la herramienta de corte utilizada para el acabado (Flowcut ref. tool).	32
Tabla 5 Matriz de diseño L9 ortogonal	35
Tabla 6 Parámetros de corte del Desbaste y niveles	36
Tabla 7 Parámetros de corte del Semi-acabado (Z level y Contour area) y nivele	es. 36
Tabla 8 Parámetros de corte del Acabado (Contour area) y niveles	37
Tabla 9 Parámetros de corte del Acabado (Flowcut ref. tool) y sus niveles	37
Tabla 10 Resumen de operaciones para cada placa	37
Tabla 11 Distribución de operaciones y sub-operaciones	38
Tabla 12 Factores de la operación Desbaste	39
Tabla 13 Factores de la operación Semi-acabado (Z level y Contour area)	39
Tabla 14 Factores de la operación: Acabado (Contour area)	40
Tabla 15 Factores de la operación Acabado (Flowcut ref. tool)	40
Tabla 16 Asignación de herramientas por operación y sub-operaciones	41
Tabla 17. Energía consumida durante el maquinado de las 3 operaciones	50
Tabla 18. Tiempo de maquinado de las 3 operaciones	51
Tabla 19. Desgaste de las herramientas de corte empleadas	51

Tabla 20. Rugosidad superficial Ra final de las placas
Tabla 21. Resumen de niveles sugeridos en cada operación y placa maquinada 92
Tabla 22. Confirmación de corridas, predicciones recomendadas Minitab97
Tabla 23. Porcentajes bajos del indicador R-cuadrado-ajustado
Tabla 24. Contribuciones de los factores en los experimentos por cada respuesta.
Tabla 25. Comparación de resultados Minitab vs NX
Tabla 26. Energía consumida durante el maquinado de las operaciones (kWh)100
Tabla 27. Equivalencia de energía consumida a emisiones CO2 (Ton métricas). 100
Tabla 28 Otras equivalencias del consumo de 1 kWh de electricidad101
Tabla 29. Ahorro en energía consumida expresada en porcentaje102
Tabla 30. Ahorro en tiempo de maquinado expresado en porcentaje102
Tabla 31. Ahorro en desgaste de herramienta expresada en porcentaje103
Tabla 32. Ahorro en rugosidad superficial expresada en porcentaje 104
Tabla 33. B1. Cálculo de RPM para los niveles de los parámetros de corte de la operación desbaste
Tabla 34. B2. Cálculo de RPM para los niveles de los parámetros de corte de la operación semi-acabado
Tabla 35. B3. Cálculo de RPM para los niveles de los parámetros de corte de la operación acabado (Contour area)
Tabla 36. B4. Cálculo de RPM para los niveles de los parámetros de corte de la operación acabado (Flowcut ref tool)119
Tabla 37. B5. Cálculo de Feed rate para los niveles de los parámetros de corte de laoperación desbaste.120
Tabla 38. B6. Cálculo de Feed rate para los niveles de los parámetros de corte de la operación semi-acabado

Tabla 39. B7. Cálculo de Feed rate para los niveles de los parámetros de corte de laoperación acabado (Contour area).122
Tabla 40. B8. Cálculo de Feed rate para los niveles de los parámetros de corte de la operación acabado (Flowcut ref tool)123
Tabla 41. C1.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa corazón en desbaste
Tabla 42. C1.2. Análisis de varianza para medias y S/N de tiempo de maquinado para placa corazón en desbaste125
Tabla 43. C1.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa corazón en desbaste126
Tabla 44. C2.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa cavidad en desbaste127
Tabla 45. C2.2. Análisis de varianza para medias y S/N de tiempo de maquinado para placa cavidad en desbaste128
Tabla 46. C2.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa cavidad en desbaste129
Tabla 47. C3.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa corazón en semi-acabado130
Tabla 48. C3.2. Análisis de varianza para medias y S/N de tiempo de maquinado para placa corazón en semi-acabado131
Tabla 49. C3.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa corazón en semi-acabado132
Tabla 50. C4.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa cavidad en semi-acabado133
Tabla 51. C4.2. Análisis de varianza para medias y S/N de tiempo de maquinado para placa cavidad en semi-acabado134
Tabla 52. C4.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa cavidad en semi-acabado135
Tabla 53. C4.4. Análisis de varianza para medias y S/N de rugosidad superficial para placa cavidad en semi-acabado

Tabla 54. C5.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa corazón en acabado(Contour area)
Tabla 55. C5.2. Análisis de varianza para medias y S/N de tiempo de maquinado para placa corazón en acabado(Contour area)138
Tabla 56. C5.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa corazón en acabado (Contour area)139
Tabla 57. C6.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa corazón en acabado(Flowcut ref tool)
Tabla 59. C6.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa corazón en acabado (Flowcut ref tool)
Tabla 60. C6.4. Análisis de varianza para medias y S/N de rugosidad superficial para placa corazón en acabado

Alcance del proyecto

Este proyecto de investigación, consistió en optimizar el proceso de manufactura de placas inserto para molde, siendo aptas para la formación de un componente plástico automotriz, perteneciente al ensamble del sistema de apertura y cierre de las puertas principales de un vehículo MINI Cooper s 2006, el cual es posible de moldear por inyección de plástico.

Se analizó el consumo energético de la máquina CNC durante cada corrida de maquinado de las operaciones de desbaste, semi-acabado y acabado en ambas placas inserto, las cuales son conocidas como corazón y cavidad. Para posteriormente proponer mejoras al proceso, permitiendo por cada pieza a fabricar, la disminución del consumo de energía eléctrica, tiempo de mecanizado, desgaste de herramienta y rugosidad superficial.

Por lo anteriormente expuesto, esta investigación se concentró en medir la energía consumida durante el maquinado en las fases de desbaste, semi-acabado y acabado para los experimentos planteados, ya que durante estos procesos una gran cantidad de material es removido de la pieza de trabajo, con el objetivo de conducir la apariencia de cada placa inserto a su geometría final correspondiente, esto conforme al avance de cada operación subsecuente ejecutada.

Este tema de tesis, tuvo el propósito de optimizar los parámetros de maquinado CNC de las placas corazón y cavidad mediante el diseño de experimentos, considerando diversas trayectorias de corte de material para las operaciones involucradas en el proceso de fresado del material aluminio 7075 para la manufactura de placas inserto para moldes.

Usando la metodología de Taguchi, se construyeron matrices de diseño experimental fraccionadas que pertenecen al diseño robusto con respuestas estáticas, es decir matrices con un número reducido de experimentos a fabricar, estas acciones fueron tomadas dado el presupuesto disponible para este proyecto y justificando la cantidad limitada de experimentos mediante la utilización de una herramienta de corte nueva por cada corrida experimental.

Mediante el Diseño de Experimentos, se determinaron los factores y niveles más relevantes, aquellos que causaron un impacto significativo para reducir notoriamente cuatro variables de respuesta: el consumo energético de la máquina, el tiempo de maquinado de cada corrida, el desgaste de la herramienta empleada y la rugosidad superficial en las geometrías de las placas inserto al final de las operaciones de mecanizado llevadas a cabo.

Objetivo general

• Lograr una reducción del consumo energético de la máquina herramienta durante el proceso de fresado, para disminuir el impacto de las emisiones de gases contaminantes derivadas del uso excesivo de combustibles fósiles, los cuales contribuyen al deterioro ambiental.

Objetivos específicos

- Estudiar y analizar el efecto que tienen los parámetros de corte y la estrategia de maquinado a utilizar en la fresadora CNC con respecto a múltiples variables de respuesta en los procesos de las operaciones: desbaste, semi-acabado y acabado al fabricar las placas inserto corazón y cavidad de un molde de aluminio 7075 con el cual es posible fabricar un componente automotriz plástico mediante procesos posteriores.
- Minimizar las cuatro variables de respuesta, las cuales son: el consumo de energía eléctrica, el tiempo de maquinado, la rugosidad superficial y el desgaste de herramienta derivado del proceso de fresado de ambas placas inserto, mediante la obtención de parámetros óptimos de maquinado encargados de disminuir las variables implicadas y a su vez la variabilidad del proceso.
- Sugerir medidas de implementación de los resultados obtenidos, para minimizar el impacto de las emisiones de CO₂ producidas cuando la máquina fresadora se encuentre en servicio consumiendo energía eléctrica durante el proceso de fresado de las placas inserto que fueron diseñadas.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1. Manufactura sustentable

Según la encuesta de energía de la Administración de Información Energética de EE. UU., las fuentes de energía no renovables, por ejemplo, petróleo, gas y carbón, siguen siendo las principales fuentes de energía consumidas en la manufactura de los EE. UU. Estas fuentes de energía inevitablemente producen contaminación ambiental. Bajo la presión de los crecientes costos de energía y las crecientes preocupaciones por la protección del medio ambiente, los fabricantes deben buscar soluciones energéticamente eficientes y de bajo consumo de carbono [1].

Hoy en día, las personas son cada vez más conscientes del deterioro ambiental. Algunas palabras clave como el agotamiento de los recursos, el calentamiento global y las emisiones de efecto invernadero aparecen con más frecuencia en los titulares de las noticias y los principales temas de disputas políticas o económicas [2].

Para ahorrar costos y estar comprometidos con el medio ambiente, reducir el consumo de energía de las instalaciones de producción es un nuevo objetivo para las empresas manufactureras modernas, es una rutina razonable y significativa para promover la sustentabilidad de la manufactura y aliviar la crisis energética [3].

Los sistemas de manufactura actuales requieren ir adquiriendo varias características nuevas. Estas incluyen, por nombrar algunas, alta inteligencia para la autonomía, adaptabilidad para un entorno que cambia dinámicamente, reconfigurabilidad para una colaboración ágil y sustentable para el beneficio ambiental. Se han propuesto diferentes paradigmas de manufactura con diferentes énfasis, como la manufactura flexible, la manufactura esbelta, la manufactura sustentable y manufactura en la nube [4].

La energía renovable generalmente se define como la energía que proviene de recursos que se reponen naturalmente, como la luz solar, el viento, la lluvia, las mareas, las olas y el calor geotérmico. Ejemplos de tecnologías de energía renovable son los molinos de viento generadores de energía y la energía solar. Una fuente de energía no renovable, por otro lado, es un recurso que no se renueva a un ritmo suficiente para una extracción económica sustentable en plazos humanos significativos. Un ejemplo de esto es el combustible fósil derivado orgánicamente a base de carbono [5].

Máquinas herramientas más eficientes sobrevivirán en los mercados de la industria, como resultado de las presiones de las preocupaciones energéticas y medio ambientales. Tras el desarrollo de la tecnología de medición y la legislación de etiquetado, se espera que el consumo de energía de las máquinas herramienta se modele y controle con mayor precisión de acuerdo con el propósito de sustentabilidad y que las estructuras de máquinas herramienta y sus componentes se diseñen para ser más compactos y livianos [6].

1.2. Manufactura verde

La manufactura verde o fabricación ecológica, es un enfoque sustentable para las actividades de diseño e ingeniería involucradas en el desarrollo de productos y / o la operación del sistema para minimizar el impacto ambiental. El método de manufactura verde puede ser utilizado eficientemente por la tecnología y ahorrar consumo de energía en la industria. La implementación junto con la automatización de modificaciones tecnológicas generará ahorros de eficiencia en costos [7].

Muchos países del mundo han hecho de la manufactura ecológica una política nacional. La "Aceleración de la industria manufacturera avanzada en los Estados Unidos" lanzada por los Estados Unidos enumera la manufactura sustentable como una tecnología clave para revitalizar la industria manufacturera, con el fin de ayudar al desarrollo de la industria verde. Países como Alemania, Japón, Reino Unido y China buscan lograr los mismos objetivos y han lanzado sus propias políticas nacionales en beneficio al desarrollo verde [8].

En el trabajo de investigación de Belhadi, se define el desempeño ambiental como "el resultado de las actividades estratégicas de una empresa que gestionan (o no) su impacto en el medio ambiente natural". Estos resultados incluyen el desempeño organizacional en varios aspectos, como la reducción del consumo de energía, las emisiones de gases o sólidos, la contaminación, el desperdicio de recursos y otros efectos nocivos para el medio ambiente [9].

Adoptar la sustentabilidad y la manufactura ecológica es mucho más que "un buen producto para producir" o "buena fabricación". La manufactura verde no es lo mismo que la sustentabilidad aunque ambas están relacionadas y a menudo se usan indistintamente. El término verde se asocia comúnmente con productos o prácticas o ambos, incluidos los procesos que no dañan el medio ambiente. La sustentabilidad se asocia principalmente con el enfoque holístico de la empresa y considera todo el negocio, incluida la fabricación y la gestión de la cadena de suministro [10].

La innovación tecnológica verde es la estrategia adoptada por la industria manufacturera para implementar la innovación verde. Elegir el camino correcto de innovación tecnológica verde es crucial para el desarrollo de la innovación verde en la industria manufacturera. La comisión europea define la innovación en tecnología verde como un término general para tecnologías, procesos y productos que siguen principios ecológicos y leyes económicas ecológicas, ahorran recursos y energía, evitan, eliminan o mitigan la contaminación y el daño ambiental ecológico y minimizan los efectos negativos ecológicos [11].

La literatura existente ha utilizado la manufactura esbelta y verde como sinónimos de manufactura sustentable. Sin embargo, estos términos tienen ciertas similitudes y contrastes. La manufactura esbelta y ecológica reduce y optimiza el desperdicio y el tiempo de procesamiento del proceso. Mientras que la manufactura esbelta se enfoca no solo en la manufactura amigable con el medio ambiente sino que también incluye la responsabilidad social en su horizonte más amplio. Además, la manufactura sustentable insiste en la atención simultánea a las tres dimensiones de la sustentabilidad (personas, planeta y ganancias) [12].

1.3. Consumo de energía eléctrica

Entre mayor crecimiento adquiere la demanda del cliente, mayores esfuerzos realizan las empresas para poder cumplir con todas las expectativas de estos, incrementar el número de máquinas herramienta por ejemplo, puede ayudar a incrementar el flujo de la producción de componentes, sin embargo, es una decisión que no solo incrementará los costos relacionados a la producción, sino que también elevará los consumos de energía por parte de los equipos de manufactura CNC con los que cuenta la industria.

El uso de electricidad en la manufactura, es uno de los principales impulsores del aumento de las emisiones de carbono. Este es el caso porque las fuentes de energía ricas en carbono y los combustibles fósiles dominan la generación de energía eléctrica. Por lo tanto, la industria necesita ser más inteligente para aumentar la producción y la productividad, al mismo tiempo que se reduce la intensidad energética de los productos fabricados y el costo de su manufactura [13].

La energía consumida por el sector manufacturero, es utilizada en procesos productivos, los cuales se llevan a cabo por maquinaria y equipo de producción. Las máquinas herramienta son un típico ejemplo de equipo de producción ampliamente utilizados en la industria. La energía utilizada por el sector industrial se ha más que duplicado en los últimos 50 años y la industria actualmente consume aproximadamente la mitad de la energía mundial [14].

En la era moderna de hoy, la eficiencia energética de las máquinas herramienta es un tema de actualidad para los usuarios y fabricantes de máquinas herramienta, ya que el consumo eléctrico industrial contribuye al 42,6% del consumo universal de electricidad [15].

Las máquinas herramientas son incomparablemente más complejas y versátiles en su uso que los artículos para el hogar, como refrigeradores, lavavajillas o televisores. Schudeleit, destaca la correlación entre la creciente complejidad del producto y la creciente dificultad para definir una referencia como desafío hacia una etiqueta de eficiencia energética. Su investigación se concentra en encontrar el método de prueba más factible para la estandarización, se describen cuatro métodos de prueba de eficiencia energética general y se comparan en una revisión de vanguardia [16].

China tiene aproximadamente 7 millones de máquinas herramienta. Suponiendo que la potencia promedio instalada de una sola máquina herramienta es de 10 kW, se estimó que el consumo total de energía por año alcanzaría el doble de la capacidad instalada total de la central hidroeléctrica 'Three Gorges Dam', que es la mayor central hidroeléctrica del

mundo, que cuenta con 32 generadores rotativos distribuidos en 3 almacenes que generan suficiente electricidad para abastecer a 42 millones de hogares al año aproximadamente [17].

Lograr ahorros de energía eléctrica con procesos que utilizan motores eléctricos se ha convertido cada vez más en un tema importante en los últimos años. Además, la energía eléctrica se ha vuelto más costosa, y las aplicaciones que utilizan motores eléctricos deben cumplir con estándares de eficiencia energética más estrictos. De acuerdo con investigaciones previas, más del 60% de la electricidad mundial se utiliza para hacer funcionar máquinas eléctricas [18].

1.4. Consumo de energía de máquinas fresadoras

El consumo de energía de una herramienta de corte de máquina CNC está determinado en gran medida por el patrón de la herramienta que depende de la longitud de los movimientos inactivos y de trabajo, así como del número de puntos de inserción. Para reducir el nivel de consumo, generalmente es necesario minimizar todos estos parámetros. Sin embargo, las rutas resultantes no siempre son tecnológicamente aceptables, lo que puede conducir a productos defectuosos y dañar el equipo [19].

Las unidades de máquina, es decir, motores eléctricos, bombas y ventiladores que se utilizan en procesos de manufactura, como el mecanizado, representan más de la mitad del uso de electricidad de la industria manufacturera de acuerdo con la EIA (Energy Information Administration). Dependiendo de la máquina, la energía real utilizada para la eliminación de material puede variar del 15% al 70%. El resto lo consumen las bombas, el refrigerante, las centrífugas y otros equipos periféricos [20].

Varios estudios han demostrado cálculos teóricos para estimar los requisitos de energía de los procesos de mecanizado. Sin embargo, el consumo de energía real es significativamente mayor que los valores calculados debido a diversas pérdidas en forma de calor, fricción y deformación del material [21].

1.5. Relación de emisiones CO₂

De acuerdo con la EIA,US se prevé que el consumo mundial de energía alcance un aumento del 56% desde el año 2010-2040; Se estima que las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía aumentarán aproximadamente un 46% en 30 años [22].

Zhou señaló que las emisiones de CO₂ de una máquina herramienta de control numérico con potencia del eje principal en 22 kW que funcionaba durante un año era equivalente a las emisiones de 61 automóviles SUV. Las máquinas herramienta han sido consideradas como una de las categorías de prioridad regulatoria en la Directiva de Eco-diseño de la Unión Europea. Eso ejerce presión sobre el fabricante para que la máquina cumpla con la directiva de diseño ecológico y el estándar de emisión de carbono [23].

Se consume una enorme cantidad de energía anualmente en todo el mundo con un aumento estimado de 1.4% por año, y se esperaba que las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con la energía aumentaran de 32 mil millones de toneladas métricas en 2012 a 36 mil millones de toneladas métricas en 2020. Una gran proporción (aproximadamente el 25%) es atribuible a la manufactura [24].

En Sudáfrica, el rápido aumento en el crecimiento económico, la producción industrial y la distribución de energía a comunidades anteriormente desfavorecidas ha llevado a un gran aumento en el consumo de electricidad desde 1993. La mayor parte de la electricidad se genera al quemar carbón, lo que convierte a Sudáfrica en el séptimo mayor emisor de emisiones de gases de efecto invernadero per cápita en el mundo [25].

1.6. Aluminio 7075

El aluminio 7075 una de las aleaciones de aluminio más duras, tiene mejor maquinabilidad y buena resistencia a la fatiga. Además de eso, tiene una mejor resistencia a la corrosión en comparación con cualquier otra serie de aleación de aluminio. Se ha utilizado ampliamente como material estructural en sectores como la aviación, el transporte y el sector automotriz. Es difícil mecanizar este material utilizando métodos convencionales [26].

En las condiciones mencionadas anteriormente, la temperatura es un factor crucial. Cuando la temperatura es superior a 100 ° C, la resistencia a la tracción de la aleación de aluminio 7075 cae bruscamente [27].

Este material fue seleccionado para este trabajo de tesis debido a sus buenas propiedades de maquinabilidad. En particular, el mecanizado de materiales muy duros y frágiles, como algunos materiales compuestos, conducirán a tasas de eliminación de material más bajas y tiempos de mecanizado más largos. Se consume más energía debido a la pobre maquinabilidad del material. En adición el aluminio en general es utilizado para la fabricación de moldes para corridas de producción bajas, dado que producir moldes de otro material como el acero para el mismo tipo de corridas incrementa los costos de la manufactura [28].

Sin embargo, la serie 7000, a pesar de tener alta dureza en comparación con otras aleaciones de aluminio, su buena maquinabilidad contribuirá a la minimización de la respuesta de Rugosidad superficial Ra, resultado esencial en este trabajo de investigación. La composición del material Aluminio 7075 se puede observar en la <u>Tabla Aluminio 1</u> y sus propiedades mecánicas se reflejan en la <u>Tabla Aluminio 2</u>.

Elemento	Contenido [%]
Aluminio	90
Zinc	5.6
Magnesio	2.5
Cobre	1.6
Cromo	0.233

Tabla Aluminio 1 Composición del material Aluminio 7075.

Tabla Aluminio 2 Propiedades mecánicas de la aleación 7075.

Propiedad mecánica	Contenido [%]
Fuerza de tensión [MPa]	541
Límite elástico [MPa]	476
Elongación [%]	8

Capítulo 2. Revisión del Estado del Arte

La siguiente recopilación de trabajos de investigaciones previas, comparten implementaciones de modelos de predicción de resultados y sugerencias por parte de diversos autores en términos de manufactura, específicamente se habla sobre el proceso de fresado en diversos materiales, de los cuales se destacan distintas aleaciones de aluminio, acero y titanio, utilizadas comúnmente para el desarrollo de aplicaciones en la industria automotriz y aeroespacial

Con cada autor mencionado, se enfatizan las acciones que condujeron sus investigaciones a obtener resultados confirmados, en relación con múltiples variables de respuesta, de las cuales se destaca: la energía consumida por el maquinado, el tiempo de mecanizado implicado, el desgaste de la herramienta de corte generado por la máquina herramienta y la rugosidad superficial de las piezas manufacturadas en diversos experimentos.

Algunas de las metodologías que abundan en este contenido son los métodos de Taguchi, análisis de varianza (ANOVA), métodos de respuesta de Superficie, entre otros modelos de regresión utilizados para la predicción de los resultados óptimos de cada proceso. Finalmente se comparten las sugerencias más significativas de las conclusiones del trabajo demostrado de cada autor. Las concordancias de su experiencia, se verán constatadas en el capítulo 4, el cual corresponde a los resultados obtenidos de este tema en particular.

2.1. Moldes

Madrilles, presentó una metodología de análisis robusto de optimización para la rugosidad superficial obtenida mediante la operación de acabado en el fresado de un Acero AISI H13, utilizando cortadores de punta de bola y evaluando diversos factores de los cuales se destaca el avance por diente, la profundidad de corte y la velocidad de corte. Concluye Madrilles, que para la variable de respuesta buscada, la velocidad de corte, profundidad de corte y el avance por diente son factores de alta influencia y es posible verificar que el fresado del acabado en el Acero endurecido AISI H13, utilizando herramientas con punta de bola, proporciona valores de rugosidad de superficie adecuados para la fabricación de moldes y matrices, este proceso puede garantizar valores de 0.208–3.013µm de rugosidad superficial Ra [29].

Guan, investigó la relación entre la rugosidad superficial Ra de un inserto de molde de Aluminio 7075 y un componente PMMA (Polimetilmetacrilato) moldeado por inyección de plástico, se empelaron dos tipos de herramientas de corte de punta de bola de 4 dientes y un cortador recto de 2 dientes ambas de carburo, parámetros de corte de los cuales destacan la tasa de alimentación, profundidad de corte y el stepover para poder establecer un rango que determinara un buen acabado superficial. Guan concluye que el tipo de herramienta de corte y el stepover demostraron ser parámetros significativos para determinar el acabado de la superficie. La rugosidad óptima de la superficie del inserto del molde, se logró utilizando un cortador de punta de bola de 0,8 mm con un valor de 1 μ m en stepover, esto sin requerir un largo tiempo de fresado, este estudio demuestra estrategias de fresado adecuadas para la fabricación de moldes de mayor rendimiento con insertos de moldes de Aluminio 7075 [30].

Galizia, desarrollo una investigación acerca de la evolución de los moldes en la manufactura, en la cual hace una comparación de antiguos especímenes rígidos y como el paso de los años ha ido modificando las características de estos para volver flexible su fabricación. Recalca que la tendencia moderna presenta un verdadero desafío para los procesos de manufactura, como lo es el moldeo por inyección de plástico, el cual es comúnmente caracterizado por una tasa de cambios muy alta, se sugiere que se deben de evadir las corridas pequeñas de producción con el objetivo de poder disminuir los costos de manufactura. En adición menciona que una ventaja de seleccionar bien el material para la fabricación de un molde, es que se pueden utilizar materiales que disminuyan el costo de las corridas bajas de producción de ciertos componentes solicitados, como lo sería el caso de los moldes de aleaciones no ferrosas como el aluminio, en lugar de emplear acero o el titanio [31].

Klink, realizó un estudio para fabricar placas cavidad de molde, manufacturó una placa cavidad en el material Acero templado en frío (45NiCrMo16) mediante distintas máquinas herramienta existentes, entre los cuales se destaca el proceso de fresado, electroerosión por corte de hilo (EDM), cortador laser y rectificado, el objetivo propuesto era lograr una profundidad específica en la placa con un valor de rugosidad superficial Ra límite aceptable en la industria de moldes y dados. Demostró que de las 4 opciones presentadas desde un inicio, las mejores dos fueron EDM y fresado, el proceso de EDM en la contienda tecnológica se le atribuye la gran exactitud de la geometría establecida, sin embargo, el proceso de fresado es seleccionado como la opción más viable para la manufactura de moldes debido a que representa un nivel alto de productividad reduciendo los costos de la manufactura, en adición su valor de rugosidad Ra final ha sido 0.14 µm, el rango aceptable suele ser entre $0.1 - 2.5 \mu m$ [32].

2.2. Fresado: respuesta en Energía consumida

Kiswanto, calculó el consumo de energía de las operaciones de desbaste en los procesos de micro fresado y macro fresado, utilizando tres estrategias de corte: Seguimiento de parte, Seguimiento de periferia y Zigzag y comprobó que de las tres mencionadas, el Seguimiento de periferia obtuvo el menor consumo de energía utilizando específicamente ciertos parámetros de corte, donde se destaca el Feed rate, velocidad del husillo, profundidad de corte y stepover. Finaliza su aportación sugiriendo la importancia de la selección de la estrategia de corte a utilizar tanto en micro fresado como en macro fresado, dado que demostró su influencia en el consumo final de energía de la máquina herramienta [33].

Lingling Li, estudió la influencia de los factores y estrategias de corte que intervienen en la mejora del consumo energético del fresado CNC. Utiliza varias estrategias de corte, de las cuales se destaca Zigzag, espiral, contorno paralelo y dirección a 45 grados, concluye de múltiples experimentos analizados que la estrategia de corte tiene gran influencia en el consumo energético y que existe una selección óptima de estrategia de corte dependiendo el conjunto de parámetros que se estén evaluando. A su vez, dentro de los parámetros que mayor influencia tienen para la reducción de consumo energético, se destaca la tasa de alimentación, la velocidad de corte y la profundidad de corte con valores específicos de stepover [34].

Park demostró, que mantener velocidades de avance iguales (Feed rate) en un proceso de fresado, condujeron a un largo tiempo de mecanizado que redujo aún más la productividad del proceso de maquinado incrementando el consumo de energía. En consecuencia, el ajuste de avance es un enfoque efectivo para aumentar el potencial de maquinado eficiente [35].

Xuewei, demostró mediante una optimización de parámetros de corte de un proceso de micro fresado, el cual considera el desgaste de herramienta y una herramienta sin desgaste para reducir el consumo energético del maquinado, que los parámetros de corte del avance por diente, la velocidad del husillo y la profundidad de corte ayudan a minimizar el consumo energético utilizando la herramienta sin desgaste, con valores intermedios de velocidad de husillo, valores más bajos de profundidad de corte y valores intermedios de avance por diente. Consiguió un ahorro del 7.89% comparando el mejor experimento ejecutado con el experimento óptimo de acuerdo con su modelo de predicción [36].

2.3. Fresado: respuesta en Tiempo de mecanizado

La investigación de Wirtz, propone un modelo de simulación de fresado el cual construye una base de datos para evaluar el desempeño del proceso en maquinado real y el maquinado simulado, efectivamente demostró que aun simulando el proceso con todos los requerimientos de energía que consume una máquina herramienta, las variaciones de consumo energético se dictaminan por acciones extra en el maquinado real, como lo es la modificación de la velocidad de avances rápidos de la herramienta, por lo que sugiere constatar las cifras simuladas con la experimentación física [37].

Wiederkehr, realizó estudios para analizar experimentos de corte en fresado desde el punto de vista de procesos geométricos de simulación propuestos por el mismo autor, para mecanizados simulados y para las confirmaciones en físico, trabajó con el material Aluminio 7075 debido a sus altas propiedades mecánicas demandadas en la industria automotriz y aeroespacial, ejecutó las operaciones de desbaste y acabado con parámetros de corte a dos diferentes niveles, dentro de los cuales utilizó la velocidad de corte (vf), profundidad de corte (a_p) y utilizó una estrategia de corte periférica, concluye en su experimento que su modelo propuesto puede utilizarse como una referencia para evitar las corridas de confirmación en físico de mecanizado [38].

Zhaohui, optimizó parámetros de corte desde el punto de vista de la eficiencia de energía de corte en fresado, utilizó un diseño de experimento factorial fraccionado con el método de Taguchi, un arreglo ortogonal L25 (5^{4-2}) con cuatro factores y cinco niveles, de los cuales se destaca la velocidad del husillo, la tasa de alimentación y la profundidad de corte, sus conclusiones fueron que el consumo exclusivo de la energía de corte incrementa cuando lo hace la velocidad del husillo, pero decrece mientras incremente la velocidad de corte y la profundidad de corte, para la variable de respuesta del tiempo de mecanizado, la velocidad del husillo no tiene un impacto significativo, mientras que la velocidad y profundidad de corte, son esenciales en un nivel mayor. Por lo tanto a menor tiempo de mecanizado, menor consumo de energía de corte [39].

Mersni, generó una investigación, donde se estudió la influencia de tres parámetros de fresado, de los cuales se destaca la velocidad de corte, el avance por diente y la profundidad de corte, en respuesta al tiempo de mecanizado y la rugosidad de la superficie utilizando el método de Taguchi y ANOVA. El proceso de mecanizado se optimizó en el fresado con herramientas punta de bola de la aleación de Titanio (Ti-6Al-4V). Se utilizó una matriz ortogonal L9 y luego los resultados experimentales se analizaron mediante la relación señal ruido S / N. Ambos métodos dieron los mismos resultados, el factor más influyente en el tiempo de mecanizado (T) es la velocidad de corte Vc, de acuerdo a las gráficas S/N el autor sugiere que valores altos de los parámetros de corte, ayudarán a reducir la variabilidad del proceso de fresado y con base en la gráfica de efectos principales, el nivel alto de cada uno de los parámetros conducirán a minimizar el tiempo de maquinado [40].

Leo Kumar, propuso un modelo empírico para optimizar la rugosidad superficial y el tiempo de maquinado de un proceso de micro fresado en una aleación de cobre C360 proponiendo el uso de un algoritmo genético, los parámetros de corte fueron la velocidad del husillo y la tasa de alimentación. Dos tipos de herramientas de corte de carburo con diámetros de 700 y 900 µm de diámetro, fueron probados en ambos escenarios de las herramientas de corte, se demostró que para minimizar el tiempo de mecanizado, se logra cuando la velocidad del husillo y la tasa de alimentación se encuentran en sus máximos niveles, sin embargo, eso implica un aumento del valor de la rugosidad superficial de las piezas maquinadas, los resultados del análisis de varianza (ANOVA), muestran que el factor más significativo en las respuestas de rugosidad superficial Ra y tiempo de mecanizado, es la tasa de alimentación [41].

2.4. Fresado: respuesta en Desgaste de la herramienta de corte

De acuerdo con los hallazgos de Antsev, este autor construyó un modelo de predicción de la vida útil de la herramienta considerando únicamente fallas mediante el desprendimiento de porciones de la hoja de corte en un proceso de fresado, el cual es un escenario típico en las operaciones de desbaste, concluye mediante su modelo que la vida útil de la herramienta depende de la disponibilidad de su uso y la variedad de piezas maquinadas en distintos materiales, sugiere que el incremento de la velocidad de corte y la velocidad del husillo contribuirán a un consumo acelerado de las hojas de corte presentes en la herramienta [42].

Dadgari, realizó una investigación en desgaste de la herramienta de corte y vida útil de la misma, propuso un modelo de predicción de la vida útil para micro fresado en Titanio (Ti-6AL-4V), los factores que interactúan entre sus pruebas, se destaca la tasa de alimentación y la velocidad del husillo, los cuales reflejan un impacto significativo en el deterioro de las herramientas de corte. Durante este experimento, se utilizó el criterio de deshecho de herramientas propuesto por la norma ISO 8688-2, enfocado al proceso de micro fresado de Titanio de acuerdo con la experimentación observada para definir factores clave que afectan la remoción de dicho material. Dadgari sugiere que velocidades de corte altas y una tasa baja de alimentación optimizan la vida útil de la herramienta durante el micro fresado. La adhesión del material de la pieza de trabajo con la cara de corte de la herramienta reduce la dureza de la herramienta de corte, lo cual disminuye significativamente la vida útil de la herramienta y conduce a una falla prematura. [43].

Qaiser, empleó la velocidad de corte, el avance por diente y la profundidad de corte como factores a estudiar para evaluar el rendimiento de un proceso de fresado en el material Inconel 625 en términos de cuatro respuestas: la vida útil de la herramienta de corte, desgaste de la herramienta, material eliminado y la rugosidad superficial Ra, diseñó un arreglo ortogonal L8 de Taguchi para la fase de experimentación. El autor demostró, que para la vida útil de la herramienta, la profundidad de corte es el factor más significativo, los valores máximos de vida útil de la herramienta durante el mecanizado, se definieron al

emplear valores más bajos del avance por diente y la profundidad de corte, con un mayor valor de la velocidad de corte. Para el caso de la rugosidad superficial, sugiere que el avance por diente es el factor con mayor contribución. En adición, probó que sus resultados se correlacionan bien con las temperaturas de corte generadas durante el proceso. Los experimentos con la profundidad de corte mínima, dieron como resultado temperaturas menores [44].

Monkova, se adentró en las oportunidades de optimización de la vida útil de la herramienta de corte durante el fresado en Acero AISI 304 o también conocido como DIN 1.4301, utilizando cortadores recubiertos por AlTin (nitruro de aluminio-titanio) sin utilizar fluido de corte, para poder obtener pruebas del desgaste de herramienta generado. Se evaluó el desgaste en distintos puntos de las hojas de corte, dónde se pudo identificar diferentes tipos de desgaste conocidos por vincular la norma ISO_8688-2 de desgaste de cortadores en fresado. Se estudiaron los efectos de una combinación variable de velocidad de corte y profundidad de corte según el desgaste de la herramienta y la rugosidad de la superficie del material de corte. Con base en los resultados obtenidos, pudo concluir que la combinación de velocidad de corte $v_c = 13.82 \text{ m/min y}$ la profundidad de corte $a_p = 12 \text{ mm}$ ha demostrado ser la mejor en términos de durabilidad de la herramienta [45].

Hai Li, propuso un novedoso método de predicción de vida útil restante de la herramienta de corte dado un conjunto experimental limitado de corridas de fresado en piezas de acero inoxidable. Los parámetros de corte que interactuaron para la vida útil de la herramienta como variable de respuesta, fueron: la tasa de alimentación, la profundidad de corte y la velocidad de corte. Se recalca que cuanto más duro sea el material de la herramienta, mejor será su resistencia al desgaste y dureza. Considerando 3 procesos de la herramienta de corte (entrada de la herramienta, fresado y salida de la herramienta) y con la representación de varios casos, se concluye que los casos dónde se tienen valores más bajos de la velocidad de corte y un valor de la profundidad de corte más alto, la vida útil remanente de la herramienta de corte será mucho menor, en otras palabras acelerarán el deterioro del material del cortador y por lo tanto alcanzará a cortar una menor cantidad de piezas [46].

2.5. Fresado: respuesta en Rugosidad superficial

Xuefeng Wu, presenta una investigación de un análisis de rugosidad superficial y optimización del proceso de fresado en moldes de acero de la fabricación plástica de una cubierta automotriz, para ello realizó corridas experimentales con herramientas de corte con punta recta y punta de bola para fresado plano y curvo, demostró mediante arreglos ortogonales fraccionados L16 (4^{4-2}) de la metodología de Taguchi que para los dos tipos de fresado, la tasa de alimentación y la velocidad del husillo fueron los factores de mayor impacto, por lo tanto prueba que una velocidad de husillo óptima con mayores valores en la tasa de alimentación contribuyen a reducir la rugosidad superficial en el proceso de fresado [47].

Sharma, investigó los efectos de los parámetros de corte de fresado en Aluminio 6062 desde el punto de vista del acabado superficial, utilizó un arreglo ortogonal de Taguchi L16 para llevar a cabo sus pruebas experimentales, en las que probó la tasa de alimentación, profundidad de corte y velocidad del husillo como sus tres factores de estudio y finalizó midiendo la rugosidad superficial Ra con el fin de su optimización. De sus resultados, sugiere que para la rugosidad superficial se le atribuye la tasa de alimentación, seguido de la velocidad del husillo y la profundidad de corte, además de notar una alta influencia de la profundidad de corte como factor mayoritario. Los valores óptimos se obtuvieron cuando la tasa de alimentación se ajustó a 0.01 mm/seg (nivel bajo), la velocidad de husillo en 1600 RPM (nivel intermedio) y la profundidad de corte a 1.0 (niveles altos) [48].

Peña-Parás, optimizó parámetros de corte de fresado en un Acero 1018, incluyendo nanopartículas de Montmorillonita en el fluido de corte siendo este una opción de sustentabilidad, sus variables de respuesta fueron la rugosidad superficial Ra, consumo energético y desgaste de herramienta, empleando factores de los cuales se destacan la profundidad de corte, la velocidad del husillo y la tasa de alimentación, utilizando un arreglo ortogonal de Taguchi L27 (3^{4-1}). Sugiere que a menor velocidad del husillo traducido también en velocidad de corte, una profundidad de corte moderada y una tasa de alimentación intermedia, es posible optimizar energía consumida por el husillo y la rugosidad superficial Ra [49].

Ravikumar, trabajó en un diseño de experimentos del proceso de fresado en Acero AISI D2 empleando la metodología de superficie de respuesta, con el objetivo de optimizar los parámetros de corte (velocidad de corte, tasa de alimentación, profundidad de corte y stepover) para dos respuestas (fuerza de corte y rugosidad superficial Ra). Demuestra que un nivel medio en la velocidad de corte, en el stepover y en la tasa de alimentación, con el nivel más bajo de la profundidad de corte, se reducen significativamente las fuerzas de corte, mientras que para optimizar la rugosidad superficial Ra, el orden de contribución de los factores comienza con la tasa de alimentación, seguido de la profundidad de corte y velocidad de corte, los resultados detallan que el stepover no es un factor significativo para la rugosidad superficial como respuesta [50].

Una investigación detallada por Holmberg, compara los esfuerzos residuales que refleja el proceso de fresado en el material Inconel 718, utilizando dos tipos de herramienta de corte, una que presenta ya un desgaste previo y una herramienta completamente nueva, se observó que el desgaste de la herramienta de corte tiene una gran influencia sobre la rugosidad superficial Sa. Mediante una topografía de superficies, comprueba que las herramientas nuevas (traducido en un menor desgaste), conducen a disminuir la rugosidad superficial, en adición recomienda valores más bajos en parámetros de corte como la profundidad de corte y la tasa de alimentación para poder reducir la respuesta a la rugosidad superficial [51].

Aslantas, investigó los efectos de los parámetros de corte sobre la calidad de la superficie y el ancho de las rebabas en el micro fresado de la aleación Titanio (Ti-6Al-4V). La velocidad del husillo, el avance por diente y la profundidad de corte se seleccionaron como factores de control, se optimizaron los parámetros de corte en términos de un ancho de rebaba mínimo y una rugosidad superficial mínima como variables de respuesta. Determinó que el valor de la velocidad de alimentación para la mejor calidad de rugosidad superficial Ra era de 0.25 μ m / diente, con valores de velocidad de alimentación más bajos. La combinación óptima de parámetros que minimizan tanto el ancho de rababa como la rugosidad superficial Ra, se determinó como A3-B2-C1, cuando la velocidad del husillo opera a un mayor nivel, la alimentación por diente en un nivel medio y la profundidad de corte está en un nivel más bajo [52].

Con base en la búsqueda de información relevante mostrada, donde distintos materiales son utilizados en la experimentación y múltiples variables de respuesta son optimizadas mediante diversas metodologías de investigación y análisis de resultados, dada la limitada existencia de material actualizado que trate de enfocar su trabajo de investigación específicamente, sobre el maquinado de moldes de Aluminio 7075, desde el punto de vista de la eficiencia energética como su principal objetivo y optimizando las cuatro variables de respuesta mencionadas para este caso en particular, se propone este tema de Tesis con la finalidad de explorar con mayor profundidad las oportunidades de optimización para el proceso de fresado respectivamente para el campo de la manufactura.

Capítulo 3. Análisis experimental: proceso de fresado

3.1. Metodología de Investigación empleada

El trabajo de investigación realizado, comienza con la planeación de selección de la máquina herramienta a utilizar, seguido del material a mecanizar, parámetros de corte y herramientas de corte. Posteriormente, se selecciona el diseño de la metodología de análisis a seguir, se ejecutan los experimentos diseñados, se registra la información recaudada y enseguida se lleva a cabo el procesamiento de los datos.

Se realizó el análisis de resultados mediante el método de Taguchi y se generaron las gráficas de efectos principales (Main Effects) y relación señal ruido (S/N). Se establecieron los modelos de predicción de Taguchi y se determinó la influencia de los factores del experimento. Finalmente, se optimizaron las variables respuesta con la predicción de niveles sugeridos y finalmente los resultados se confirmaron mediante las estimaciones de ahorro por variable (Figura 1).



Figura 1. Metodología de investigación empleada.

3.2. Componente analizado

Para este caso de estudio, se analizó una cubierta de plástico con una geometría semi elíptica como se puede apreciar en la <u>Figura 2</u> y <u>Figura 3</u>, perteneciente al ensamble que cubre la manija de apertura y cierre de las puertas principales de un automóvil MINI Cooper s año 2006, como se observa en la <u>Figura 4</u>.

El análisis, se limita a componentes pequeños con perfiles de complejidad media, como lo es la geometría interior de la cubierta de plástico del ensamble del sistema de apertura y cierre de puertas escogido, es catalogado como categoría media, debido a que su estructura se encuentra definida por una semi esfera con un panel hexagonal interno, diseñado para brindarle soporte a la estructura del componente plástico, disminuyendo el volumen de material requerido.

La estructura en particular del componente seleccionado, se tomó como punto de partida para generar una pieza plástica automotriz funcional que se obtiene mediante ambas placas inserto a manufacturar por medio del proceso de fresado. Dadas las limitantes que se tienen, éstas dificultan el haber podido enfocarse en componentes plásticos automotrices de mayor tamaño y con complejidad de nivel alto, como lo son los paneles negros inferiores de un vehículo por ejemplo, los cuales se enfocan en el desempeño aerodinámico de este, y fabricar insertos de placa para moldes capaces de moldear por inyección de plástico componentes de esas dimensiones, se requeriría equipo de mayor especialización y de mayor tiempo para su análisis y construcción del que se dispone para la culminación de este programa de posgrado.



Figura 2. Cubierta de plástico perteneciente al ensamble de apertura y cierre de puerta.


Figura 3. Cubierta de plástico sustraída para su análisis.



Figura 4. Automóvil MINI Cooper s año 2006.

3.3. Simulación de componente y módulos CAD/CAM

Los programas de diseño computarizados pueden crear o modificar el modelo geométrico de piezas. Estas entradas luego van a programas de fabricación asistida por computadora (CAM) que tienen en cuenta el tamaño de la herramienta, la interferencia con los obstáculos y la eliminación de detalles innecesarios para producir las rutas de la herramienta. Muchos de los programas CAM utilizan sistemas expertos. Por ejemplo, el operador puede conocer el material de la pieza de trabajo y la herramienta a utilizar, pero no la mejor velocidad. El programa puede sugerir una velocidad basada en otras condiciones de operación [53].

En este proyecto de tesis, se utilizó el software de diseño mecánico 3D SolidWorks de Systèmes, para crear y simular las partes correspondientes a: la geometría del componente plástico (Figura 5) y posteriormente el corazón y la cavidad de molde para la formación de la pieza automotriz, como se puede apreciar en la Figura 6 y Figura 7, a su vez se requirió del módulo CAM del software Siemens NX versión 12 para emplear la simulación de las herramientas y operaciones a utilizar para generar los códigos necesarios de cada experimento a mecanizar, los códigos de cada corrida experimental forman parte del anexo digital.



Figura 5. Componente automotriz virtual, fabricado en SolidWorks.



Figura 6. Placas del molde del componente automotriz, fabricado en SolidWorks



Figura 7. Vista lateral de placa corazón, vista superior de placa cavidad, vistas isométricas de placa corazón y cavidad respectivamente.

La interfaz del software NX, muestra la creación de los parámetros necesarios y de todas aquellas acciones a simularse en las placas (Figura 8), se observa la placa corazón mostrando la geometría del componente, en ella se puede distinguir el eje coordinado del punto de origen, junto con ventanas emergentes del acceso a la creación de herramientas de corte virtuales, selección del área a cortar, tipo de operación y sub-operaciones con las acciones necesarias, parámetros de corte, y reproductor multimedia para vistas previas en la simulación.



Figura 8. Interfaz CAM en NX, selección de parámetros.

La <u>Figura 9</u> muestra el inicio de la reproducción multimedia de la simulación en NX, donde se tiene un bloque del material de la pieza de trabajo y una herramienta de corte virtual de las dimensiones exactas del bloque físico. En la <u>Figura 10</u> se aprecia un instante intermedio de dicha simulación y como se ejerce la operación de maquinado. Por último, la <u>Figura 11</u> muestra el final de la reproducción de esta simulación.



Figura 9. Simulación experimental de placa corazón en NX, etapa inicial de desbaste.



Figura 10. Simulación experimental de placa corazón en NX, etapa intermedia de desbaste.



Figura 11. Simulación experimental de placa corazón en NX, etapa final de desbaste.

3.4. Confirmación del componente fabricado virtualmente

Después de obtener la simulación de la geometría del componente automotriz, se generó un ejemplar de esta pieza utilizando manufactura aditiva en un equipo Stratasys F270, utilizando el material ASA como se muestra en la <u>Figura 12</u>. La razón de utilizar la manufactura aditiva para obtener el componente físico en 3D, es para corroborar que el diseño de la pieza en el módulo CAM haya sido correctamente establecido, de este modo se aseguran las dimensiones de la pieza al ensamblar ambas placas inserto del molde.



Figura 12. Confirmación del componente en material plástico ASA.

3.5. Material de la pieza de trabajo y especificaciones de la máquina herramienta

Los experimentos de fresado, fueron ejecutados en bloques sólidos de aluminio 7075 de 4 x 4 pulgadas x 2 pulgadas de espesor (<u>Figura 13</u>).



Figura 13. Piezas de trabajo.

Este proyecto de investigación se llevó a cabo en una fresadora Mini HAAS de 7.5 hp (Figura 14), con una velocidad máxima de husillo de 6000 RPM.



Figura 14. Fresadora Mini HAAS

3.6. Parámetros relacionados con la herramienta de corte

Las herramientas de corte utilizadas fueron de carburo de tungsteno, manufacturadas por Cleveland y MasterCut. La condición de corte fue la lubricación por inundación convencional utilizada exclusivamente en las operaciones del semi-acabado y acabado.

Se utilizaron 4 tipos de herramientas de corte en los experimentos, una herramienta para el desbaste, una herramienta para el semi-acabado y dos tipos de herramientas para el acabado (una por cada sub-operación) en orden consecutivo.

Las herramientas #1, #2, #3 y #4 se pueden apreciar en la <u>Figura 15</u>, <u>Figura 16</u>, <u>Figura 17</u> y <u>Figura 18</u>, junto a sus especificaciones en la <u>Tabla 1</u>, <u>Tabla 2</u>, <u>Tabla 3</u> y <u>Tabla 4</u>, respectivamente.



Figura 15. Herramienta #1 para desbaste.

Fabricante	CLEVELAND
Número de serie	CEM-SE4, C61894
Tipo de cortador	Vertical punta recta
Diámetro de corte	1/2 "
Largo de corte	1"
N° de gavilanes	4
Diámetro de zanco	1/2"
Largo total de la herramienta	3"
Material de corte	Carburo solido
Acabado de la herramienta	Brillante

Tabla 1. Especificaciones de la herramienta de corte utilizada para el desbaste.

_

-



Figura 16. Herramienta #2 para semi-acabado.

Fabricante	MasterCut
Número de serie	206-016
Tipo de cortador	Punta de bola
Diámetro de corte	1/4 "
Largo de corte	1"
N° de gavilanes	4
Diámetro de zanco	1/4"
Largo total de la herramienta	4"
Material de corte	Carburo solido
Acabado de la herramienta	-

Tabla 2. Especificaciones de la herramienta de corte utilizada para el semi-acabado.

_

-



Figura 17. Herramienta #3 para acabado (Contour area).

Fabricante	CLEVELAND
Número de serie	CEM-SE4B
Tipo de cortador	Punta de bola
Diámetro de corte	1/8 "
Largo de corte	1/2"
N° de gavilanes	4
Diámetro de zanco	1/8"
Largo total de la herramienta	1-1/2"
Material de corte	Carburo solido
Acabado de la herramienta	TiAIN (Nitruro de aluminio
	de titanio)

Tabla 3 Especificaciones de la herramienta de corte utilizada para el acabado (Contour area).

-

-



Figura 18. Herramienta #4 para acabado (Flowcut ref. tool).

Tabla 4 Especificaciones de la herramienta de corte utilizada pa	ra el
acabado (Flowcut ref. tool).	

Fabricante	MasterCut
Número de serie	211-006
Tipo de cortador	Punta de bola
Diámetro de corte	1/16 "
Largo de corte	1/4"
N° de gavilanes	4
Diámetro de zanco	1/8"
Largo total de la herramienta	1-1/2"
Material de corte	Carburo solido
Acabado de la herramienta	-

3.7. Metodología de Taguchi

El método de ingeniería de calidad conocido como método de Taguchi o enfoque de Taguchi, es una estrategia experimental en la que se utiliza una forma modificada y estandarizada de Diseño de Experimento (DOE). Taguchi creó una serie de arreglos ortogonales especiales y para analizar los resultados introdujo el uso de la señal ruido (S/N ratio) para asegurar un diseño que sea inmune a la influencia de factores incontrolables. Taguchi analizó los resultados basados en la desviación del objetivo. En consecuencia, se permite la selección de la condición de diseño que conduzca a una mejor calidad [54].

3.8. Diseño robusto: Relación señal ruido y gráficas S/N

El diseño robusto, es una técnica ingenieril imprescindible para mejorar el proceso de fabricación o el diseño del producto al hacer que la respuesta de salida sea insensible (robusta) a variaciones difíciles de controlar (ruido). El método Taguchi utilizado, es una técnica dominante para un diseño robusto y puede mejorar la ejecución del proceso con el menor número de pruebas. En este método, las herramientas más utilizadas son la matriz ortogonal y la relación S/N (señal-ruido). En comparación con el diseño experimental convencional, el sistema Taguchi utiliza un diseño especial de matriz ortogonal para inspeccionar las características de calidad. Los resultados de la prueba a la luz de dicha matriz se cambian a una relación S/N para evaluar las características de rendimiento [55].

Hay algunos tipos de características de calidad, como: cuanto-menor-mejor (the smallerthe-better), cuanto-mayor-mejor (the higher-the-better) y nominal-mejor (the nominal-thebetter). La característica cuanto-menor-mejor, es utilizada cuando se busca que el valor de la variable de respuesta sea mínimo, cuanto-mayor-mejor es una característica que se utiliza cuando el valor de la variable de respuesta se desea obtener al máximo y nominal-mejor es la característica requerida para obtener un valor objetivo en la variable de respuesta [56].

En el presente trabajo de investigación, dado que se busca encontrar los valores que minimizan la energía consumida por la máquina herramienta en el maquinado junto con su tiempo, el desgaste de herramienta y el acabado superficial de las piezas de ambas placas inserto trabajadas (corazón y cavidad); el tipo de característica de calidad elegida es el de cuanto-menor-mejor (the smaller-the-better) de la relación S/N y se muestra en la Ecuación (1).

La fórmula para la relación señal ruido (S/N) cuanto-menor-mejor, usando el registro base 10 es la siguiente:

$$S/_{N} = -10 * \log[\Sigma(y^{2})/n]$$
 (1)

Donde Y es igual a los datos observados y n es el número de observaciones. En el presente trabajo de investigación, las relaciones S/N se procesaron utilizando la <u>Ecuación (1)</u> para cada uno de los 9 conjuntos de experimentos por cada matriz de diseño generada para las diferentes operaciones de maquinado estudiadas.

El valor más alto de la relación S/N, se utiliza para corroborar cuales son los factores en cada experimento que mayormente favorecen a disminuir la variabilidad del proceso, utilizando las gráficas S/N de forma visual se determinan los niveles que mantienen el proceso en su valor objetivo [57].

3.9. Diseño de experimentos

En el diseño de experimentos para ingeniería de calidad, los pasos incluyen: selección de características, diseño del experimento y análisis de datos. La selección de las características utilizadas para el análisis es el paso más importante y también el más difícil. Una vez que se determinan las características que se utilizarán, el siguiente paso es el diseño del experimento. De muchos factores con diferentes niveles, seleccionamos las combinaciones de niveles de factores para que se puedan obtener conclusiones confiables de manera eficiente. Después de que se realiza el experimento y se recopilan los datos, se analizarán los datos y se extraerán conclusiones. El análisis incluye la descomposición de la variación, el cálculo de los efectos factoriales, la estimación de la condición óptima, entre otros [58].

3.9.1. Arreglo ortogonal

Taguchi demostró que si las ejecuciones experimentales se eligen adecuadamente, no hay necesidad de realizar experimentos factoriales completos. Las bases del método de Taguchi son las matrices ortogonales, las cuales muestran qué niveles de factores deben seleccionarse cada vez para hacer la menor cantidad de ejecuciones posibles. La idea principal es concentrarse solo en esas pocas ejecuciones que son vitales para el análisis [59].

En este proyecto de investigación, se utilizó un diseño factorial para identificar los efectos principales de tres factores (parámetros de corte) diferentes para cada operación de maquinado estudiada en cuatro respuestas: energía consumida durante el ciclo de mecanizado, tiempo de mecanizado, rugosidad de la superficie Ra y desgaste de las herramientas de corte empleadas.

El diseño factorial fraccional seleccionado fue una matriz ortogonal L9, con tres factores ("A", "B", "C") y tres niveles para cada factor (3^{3-1}) . En la matriz que se muestra en la <u>Tabla 5</u>, los tres niveles están representados por "1", "2" y "3", donde "1" es el nivel más bajo y "3" es el más alto. Para cada experimento, se realizaron 9 ensayos de mecanizado, utilizando una herramienta de corte nueva por cada ensayo.

No. Experimento	А	В	С
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Tabla 5 Matriz de diseño L9 ortogonal.

3.9.2. Parámetros de corte y sus niveles

Los parámetros del proceso que afectan las características de las piezas fresadas son los parámetros de la herramienta de corte (geometría de la herramienta y el material de la herramienta) y los parámetros de corte (estrategia de corte, velocidad de corte, avance por diente, profundidad de corte, stepover). Estos parámetros dependen del material de la pieza de trabajo y la máquina herramienta elegida para realizar la operación de fresado [60].

Los niveles de los parámetros de corte se eligieron para las 3 operaciones de maquinado ejecutadas de acuerdo con las herramientas de corte empleadas y las especificaciones de la fresadora CNC, a continuación se puede observar los parámetros y los niveles asignados para la operación desbaste en la <u>Tabla 6</u>, posteriormente la <u>Tabla 7</u> muestra los parámetros correspondientes al semi-acabado y por último los parámetros y niveles de la operación acabado (diferentes para sus sub-operaciones) se ilustra en la <u>Tabla 8</u> y <u>Tabla 9</u>.

Para esta sección, se generaron cálculos de RPM y alimentación (Feed rate) necesarios para poder definir los niveles de los factores (parámetros de corte), de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes y sin exceder la capacidad límite de RPM del husillo de la máquina herramienta y éstos se encuentran dentro del <u>Anexo B.</u>

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
vc [m/min]	61	122	183
fz [mm/diente]	0.0127	0.03175	0.0508
Estrategia [P, T, Z]	Periferia	Trocoidal	Zigzag

Tabla 6 Parámetros de corte del Desbaste y niveles.

Tabla 7 Parámetros de corte del Semi-acabado (Z level y Contour area) y niveles.

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
vc [m/min]	30	40	50
ap [mm]	0.4	0.6	0.8
fz [mm/diente]	0.05	0.075	0.1

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
vc [m/min]	15	20	25
fz [mm/diente]	0.051	0.059	0.068
Stepover [%]	5	10	15

Tabla 8 Parámetros de corte del Acabado (Contour area) y niveles.

Tabla 9 Parámetros de corte del Acabado (Flowcut ref. tool) y sus niveles

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
vc [m/min]	5	7.5	10
fz [mm/diente]	0.029	0.032	0.034
Stepover [%]	5	10	15

3.9.3. Operaciones y sub-operaciones

A continuación se muestra el resumen de las operaciones ejecutadas en cada placa mecanizada (<u>Tabla 10</u>). Las 3 operaciones trabajadas en cada placa fueron el desbaste, semiacabado y acabado en orden consecutivo.

Algunas de las operaciones se trabajaron con sub-operaciones y más de un tipo de herramienta, como es el caso del Semi-acabado que le corresponde; Z level y Contour area, mientras que en el Acabado le corresponde; Contour area y Flowcut ref. tool, utilizando una herramienta distinta para cada sub-operación, a diferencia de las operaciones anteriores que utilizan un solo tipo de herramienta por operación/sub-operación. La distribución de operaciones y sub-operaciones por placa mecanizada, se puede apreciar en la <u>Tabla 11</u>.

Tabla 10 Resumen de operaciones para cada placa.

Placa	Desbaste	Semi-acabado	Acabado
Corazón	~	~	~
Cavidad	~	~	-

Placa	Desbaste	Semi-acabado	Acabado
Corazón	-	Z level	Contour area
	-	Contour area	Flowcut ref tool
Cavidad	-	Z level	-
	-	Contour area	-

Tabla 11 Distribución de operaciones y suboperaciones.

3.9.4. Factores y niveles de las matrices de diseño L9

La matriz de diseño L9, sustituyendo la nomenclatura ("A", "B", "C") por los factores y los valores reales de sus niveles respectivos, dado que se trabajaron las operaciones con parámetros de corte distintos, se generaron cuatro matrices de diseño L9 donde los factores y niveles presentes varían dependiendo las especificaciones de las herramientas utilizadas y el requerimiento del tipo de operación/sub-operación.

La matriz de diseño de la operación Desbaste, utilizó como factores; v_z , f_z , y la estrategia de corte (Periferia, Trocoidal y Zigzag), su acomodo dentro de la matriz se refleja en la <u>Tabla 12</u>. En la matriz de la operación Semi-acabado, sus factores fueron; v_c , a_p y f_z (<u>Tabla 13</u>). Por último para la matrices de la operación Acabado, los factores usados fueron; v_c , f_z y Stepover, mismos factores en ambas sub-operaciones correspondientes, pero con distintos valores dado la herramienta distinta utilizada por cada sub-operación, justo como se muestra en la <u>Tabla 14</u> y <u>Tabla 15</u>.

Se puede observar que el orden establecido en dichas matrices debe coincidir siempre con la combinación de la <u>Tabla 5</u> al sustituir valores codificados con valores reales en las secciones de los factores.

No. Experimento	A vc [m/min]	B fz [mm/diente]	C Estrategia de corte
1	61	0.0127	Periphery
2	61	0.03175	Trochoidal
3	61	0.0508	Zigzag
4	122	0.0127	Trochoidal
5	122	0.03175	Zigzag
6	122	0.0508	Periphery
7	183	0.0127	Zigzag
8	183	0.03175	Periphery
9	183	0.0508	Trochoidal

Tabla 12 Factores de la operación Desbaste.

Tabla 13 Factores de la operación Semiacabado (Z level y Contour area).

No. Experimento	A vc [m/min]	B a p [mm]	C fz [mm/diente]
1	30	0.4	0.05
2	30	0.6	0.075
3	30	0.8	0.1
4	40	0.4	0.075
5	40	0.6	0.1
6	40	0.8	0.05
7	50	0.4	0.1
8	50	0.6	0.05
9	50	0.8	0.075

No. Experimento	A vc [m/min]	B fz [mm/diente]	C stepover [%]
1	15	0.051	5
2	15	0.059	10
3	15	0.068	15
4	20	0.051	10
5	20	0.059	15
6	20	0.068	5
7	25	0.051	15
8	25	0.059	5
9	25	0.068	10

Tabla 14 Factores de la operación: Acabado (Contour area).

Tabla 15 Factores de la operación Acabado (Flowcut ref. tool).

No. Experimento	A vc [m/min]	B fz [mm/diente]	C stepover [%]
1	5	0.029	5
2	5	0.032	10
3	5	0.034	15
4	7.5	0.029	10
5	7.5	0.032	15
6	7.5	0.034	5
7	10	0.029	15
8	10	0.032	5
9	10	0.034	10

3.9.5. Asignación de herramientas por operación

Como se menciona anteriormente, se utilizó más de un tipo de herramienta para algunas de las operaciones de maquinado en los experimentos, la asignación de estas herramientas descritas se puede apreciar en la Tabla 16.

Placa	Desbaste	# Herr	Semi-acabado	# Herr	Acabado	# Herr
Corazón	-	1	Z level	2	Contour area	3
	-	-	Contour area	2	Flowcut ref tool	4
Cavidad	-	1	Z level	2	-	-
	-	-	Contour area	2	-	-

Tabla 16. Asignación de herramientas por operación y sub-operaciones.

3.9.6. Sistemas de medición de energía, rugosidad, dureza y desgaste

Es ampliamente aceptado que antes de que se pueda reducir el consumo de energía en una instalación de manufactura, es necesario cuantificar la cantidad de energía necesaria para determinar los grados de libertad para una optimización [61].

La medición física utiliza sensores para adquirir datos reales, asegurando la realidad de los datos. En la medición física, la medición directa se usa comúnmente para medir directamente las señales objetivo utilizando los sensores externos conectados adicionalmente a una máquina; sin embargo, es costoso o difícil de colocar en una máquina herramienta [62]. Es ampliamente aceptable construir una base de datos de consumo de energía basada en los datos experimentales y utilizar esta para la planificación del proceso [63].

La energía requerida de la red durante el proceso de fresado, se midió a través del equipo de adquisición de datos DEWESoft Sirius de 8 canales (Figura 20), conectado a la red trifásica de la máquina herramienta mediante una configuración delta trifásica (Figura 21), utilizando la interfaz del software DEWESoft X3 SP6 (64-bit), y se registró cada 0.1 s dejando pasar 10 s previos a la ejecución del interruptor principal de la fresadora. Esta medida se realizó una vez para cada fila de la matriz de diseño ortogonal L9, que se aprecia en la Tabla 5. La Figura 22, muestra la estación de trabajo de las mediciones de cada corrida experimental.



Figura 20. DEWESoft Sirius 8 canales.



Figura 21. Configuración delta trifásica.



Figura 22. Estación de trabajo del equipo de medición.

La rugosidad de la superficie se midió con el medidor de rugosidad de superficie Mitutoyo modelo SJ-201 (Figura 23). Este dispositivo permite la medición de la rugosidad de Ra (promedio aritmético de valores absolutos del perfil de rugosidad), que es el más utilizado [64].

Los valores de Ra se midieron 4 veces en cada superficie fresada y se obtuvo el valor promedio de estas mediciones por experimento realizado. Para la placa cavidad se midió la cara superior inicial del bloque, para la placa corazón se midió la misma superficie (Figura 24) junto a la cara de la circunferencia superior de la geometría (Figura 25).

Las mediciones de rugosidad, se hicieron sobre la operación final de cada placa inserto, debido a que las operaciones son consecutivas y los relieves finales de cada operación previa fueron sustituidos por el relieve final de los experimentos, siendo para la placa corazón la operación final el acabado y para la placa cavidad la operación final el semiacabado. Llenando cada fila de la matriz de diseño ortogonal L9 (Tabla 5), con el promedio obtenido de las 4 mediciones.



Figura 23. Mitutoyo modelo SJ-201.



Figura 24. Medición de rugosidad en superficie inferior de placa corazón.



Figura 25. Medición de rugosidad en superficie superior de placa corazón.

La prueba de dureza, mide la resistencia a la penetración de la superficie de un material por un objeto duro. La dureza, que como término no puede definirse de manera precisa pues depende del contexto, representa la resistencia a los rayones o a la indentación y una medida cualitativa de la resistencia del material [65].

Se utilizó el equipo de medición de dureza MACROMET 1 Hardness Tester (Figura 26), se puede apreciar en la Figura 27 las mediciones de dureza sobre el material, se trabajó con la dureza Rockwell escala HRB.

Después de realizar las pruebas de dureza al material y obtener 10 mediciones, se obtuvo un valor promedio de 83 HRB, mientras que en comparación con el valor de este material por la ASM es de 87 HRB.



Figura 26. MACROMET 1 Hardness Tester.



Figura 27. Prueba de dureza midiendo la resistencia a la penetración de la superficie.

En situaciones prácticas de operación, el momento en que una herramienta deja de producir piezas de trabajo del tamaño deseado o la calidad de la superficie generalmente determina el final de la vida útil de la herramienta. El período hasta el instante en que la herramienta es incapaz de realizar más cortes también puede considerarse como la vida útil de la herramienta. Sin embargo, las razones por las cuales se puede considerar que las herramientas han llegado al final de su vida útil, serán diferentes en cada caso dependiendo de las condiciones de corte.

De los tipos de desgastes de herramienta registrados de acuerdo con la norma ISO 8688-2 [66], existen los siguientes escenarios:

- Desgaste del cráter: desarrollo progresivo de un cráter orientado aproximadamente paralelo al filo principal y con una profundidad máxima a cierta distancia del filo principal.
- Desgaste de la cara en forma de escalera: forma de desgaste de la cara en la que la profundidad máxima de la cicatriz de desgaste, medida perpendicular a la cara de la herramienta, se produce en la intersección de la cicatriz de desgaste con el flanco principal de la herramienta.
- Astillado uniforme: pérdida de fragmentos de herramienta de aproximadamente el mismo tamaño a lo largo de los bordes de corte, lo que influye significativamente en la uniformidad del ancho del terreno de desgaste del flanco.
- Astillado no uniforme: Astillado que ocurre principalmente en conexión con Grietas en un pequeño número de posiciones a lo largo de los bordes de corte activos pero sin consistencia de un borde de corte a otro.
- Descamación: pérdida de fragmentos de herramienta en forma de escamas de las superficies de la herramienta. Este fenómeno se observa con mayor frecuencia cuando se utilizan herramientas recubiertas, pero también se puede observar con otros materiales de herramientas.

Los casos vistos durante la medición del desgaste de las herramientas utilizadas en el conjunto experimental varían dependiendo el tipo de cortador (recto o bola), sin embargo, tienen similitud con los siguientes escenarios: Desgaste del cráter, Astillado uniforme y Descamación. Esta información se desarrolló idealmente para cortadores rectos y brocas principalmente, pero dicho criterio de medición ha sido tomado en cuenta para adaptar los hallazgos de las mediciones en los cortadores de bola utilizados. Aunque cabe destacar, que debido a la utilización de una herramienta nueva por cada corrida de mecanizado y en relación con los escenarios de desgaste presentados, la mayoría de las herramientas alcanzaron desgastes poco significativos.

Para poder analizar el desgaste de herramienta de este experimento, se utilizó el microscopio electrónico ZEISS Stemi 2000-C con aumento 4x (Stemi) (Figura 28). El criterio de medición utilizado en la medición de herramientas, se realizó con base en la orientación del filo de corte de cada diente, las herramientas de corte de desbaste han sido cortadores rectos por lo que se midieron en la vista superior a la cara de los filos, el resto de las herramientas han sido de punta de bola y fueron medidas con una inclinación aproximada de 120 grados con respecto al eje horizontal, como se aprecia en la Figura 29.

De acuerdo con la norma mencionada, el desgaste máximo aceptable del filo de los dientes de los cortadores es de 300 μ m, pasando este límite la herramienta deja de considerarse ideal para obtener resultados de calidad aceptables en comparación con remociones de material previas. Las imágenes respectivas a cada medición de desgaste estudiada, forman parte del <u>Anexo A</u>.



Figura 28. Medición de desgaste de herramienta en micrómetros para cortadores rectos.



Figura 29. Medición de desgaste de herramienta en micrómetros para cortadores punta de bola.

Capítulo 4. Resultados y análisis de datos

En este trabajo de investigación se buscó la optimización en función a 4 respuestas; la energía consumida por experimento, el tiempo de mecanizado, la rugosidad superficial y el desgaste de herramienta para ambas placas inserto del molde (corazón y cavidad).

Los resultados obtenidos de las corridas experimentales ejecutadas, de acuerdo con los arreglos ortogonales de la <u>Tabla 12</u>, <u>Tabla 13</u>, <u>Tabla 14</u> y <u>Tabla 15</u>, se presentan en esta sección, toda la información del análisis se obtuvo mediante el software Minitab 2020.

La <u>Tabla 17</u>, muestra los datos obtenidos de la energía consumida durante cada experimento, ésta se reporta en watts hora En la <u>Tabla 18</u> se aprecian los datos obtenidos respectivos al tiempo de maquinado, éstos se reportan en segundos. La <u>Tabla 19</u> contiene los datos obtenidos de rugosidad superficial Ra, reportados en micrómetros y por último los datos obtenidos del desgaste de herramientas reportados en micrómetros se muestran en la <u>Tabla 20</u>.

No				Dest	oaste	Semi-a	cabado	Acabado	(Corazón)
Experimento	А	В	С	Corazón	Cavidad	Corazón	Cavidad	Contour	Flowcut
				[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	area [Wh]	[Wh]
1	1	1	1	4921.836	1544.307	1324.234	772.995	1096.735	629.494
2	1	2	2	1519.147	602.33	798.487	621.723	465.637	574.553
3	1	3	3	1118.405	390.715	595.934	463.525	283.167	541.903
4	2	1	2	1188.374	921.887	725.473	560.193	431.048	463.605
5	2	2	3	1148.853	398.772	515.807	406.221	303.947	351.636
6	2	3	1	859.225	443.818	819.268	550.053	728.998	419.499
7	3	1	3	2151.092	1335.411	520.018	383.416	249.004	362.067
8	3	2	1	1059.077	648.423	820.355	636.074	704.863	323.984
9	3	3	2	606.762	492.902	574.142	346.646	314.518	311.994

Tabla 17. Energía consumida durante el maquinado de las 3 operaciones.

				Dest	oaste	Semi-a	cabado	Acabado (Corazón)	
No. Experimento	А	В	С	Corazón	Cavidad	Corazón	Cavidad	Contour area	Flowcut ref tool
				[Seg]	[Seg]	[Seg]	[Seg]	[Seg]	[Seg]
1	1	1	1	46873	14282	10917	8148	9124	5897
2	1	2	2	13156	5337	6697	5141	3811	5342
3	1	3	3	10095	3391	4867	3765	3138	5025
4	2	1	2	16359	6674	5711	4246	3353	3927
5	2	2	3	8109	2724	3962	3053	2400	3014
6	2	3	1	5909	1815	6533	5488	5465	3332
7	3	1	3	13444	2897	3688	2738	1752	2932
8	3	2	1	6303	1936	6077	4660	5104	2659
9	3	3	2	3085	1130	4004	3088	2176	2504

Tabla 18. Tiempo de maquinado de las 3 operaciones

.

Tabla 19. Desgaste de las herramientas de corte empleadas.

				Dest	oaste	Semi-a	cabado	Acabado	(Corazón)
No.	А	в	C	Corazón	Cavidad	Corazón	Cavidad	Contour	Flowcut
Experimento	11	D	C					area	ref tool
				Herr 1	Herr 1	Herr 2	Herr 2	Herr 3	Herr 4
				[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]
1	1	1	1	6.75	5.8	52.63	11.16	15.08	3.67
2	1	2	2	74.74	32.82	26.98	7.34	19.21	8.21
3	1	3	3	40.53	20.18	41.76	508.27	9.88	4.1
4	2	1	2	236.86	56.73	22.27	16.93	14.74	5.8
5	2	2	3	9.27	182.83	16.93	41.66	13.36	6.62
6	2	3	1	48.27	37.83	15.13	5.57	20.92	32.82
7	3	1	3	16.41	47.03	21.33	8.8	10.7	14.79
8	3	2	1	55.92	89.47	7.34	31.32	17.31	10.38
9	3	3	2	182.1	161.1	19.16	9.17	9.36	4.1

No. Experimento	А	В	С	Cavidad [μm]	Corazón [μm]
1	1	1	1	0.576	0.259
2	1	2	2	0.817	0.461
3	1	3	3	1.024	0.973
4	2	1	2	0.603	0.335
5	2	2	3	0.63	0.615
6	2	3	1	0.974	0.551
7	3	1	3	0.633	0.298
8	3	2	1	0.538	0.762
9	3	3	2	0.328	0.671

Tabla 20. Rugosidad superficial Ra final de las placas.

4.1. Resultados de placas corazón y cavidad

La Figura 30 y Figura 31 muestran el resultado final de lo que se ha nombrado placa corazón y placa cavidad. El total de placas inserto maquinadas mediante las 3 operaciones, da un total de 9 placas corazón y 9 placas cavidad y se pueden apreciar en la Figura 32 y Figura 33. Un mayor número de recopilaciones de la apariencia de las placas durante sus etapas de mecanizado, se puede encontrar en el <u>Anexo D</u>.



Figura 30. Fotografía de placas inserto en ángulo isométrico.



Figura 31. Fotografía del ensamble de ambas placas inserto.



Figura 32. Fotografía del total de placas corazón.



Figura 33. Fotografía del total de placas cavidad.

4.2. Análisis de Desbaste para placa Corazón

4.2.1. Respuesta a la Energía consumida

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la Figura 34 se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de desbaste (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-estrategia de corte) frente al consumo promedio de energía. Según la gráfica de efectos principales, la energía promedio consumida por proceso de mecanizado es la más baja en los niveles A2, B3 y C2.

La energía consumida por proceso de mecanizado en la placa corazón, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel medio (122 m/min), el avance por diente en el nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel medio (trocoidal).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 35. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A2, B3 y C2.

Dado que los niveles que logran disminuir el consumo de energía (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A2, B3 y C2.

Los resultados obtenidos de este análisis, coinciden con la demostración del <u>Capítulo 2</u> en la sección de respuesta a la <u>Energía</u>, donde Kiswanto y Lingling Li prueban la influencia de la selección de estrategia de corte en el consumo final de energía de la máquina herramienta, donde al igual que en esta experimentación, ellos utilizaron más de una de las estrategias de corte que aparecen en esta operación de desbaste.



Figura 34. Gráfica de efectos para el consumo promedio de energía en placa corazón.



Figura 35. Gráfica de efectos S/N para el consumo promedio de energía en placa corazón.
4.2.2. Respuesta al Tiempo de maquinado

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 36</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de desbaste (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-estrategia de corte) frente al tiempo promedio de maquinado. Según la gráfica de efectos principales, el tiempo promedio por proceso de mecanizado es el más bajo en los niveles A3, B3 y C3.

El tiempo por proceso de mecanizado en la placa corazón, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (183 m/min), el avance por diente en el nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel alto (zigzag).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 37. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B3 y C2.

Dado que los niveles que logran disminuir el tiempo de maquinado (Main Effects), no coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B3 y C2 (S/N).

Los resultados obtenidos de este análisis, coinciden con la demostración del <u>Capítulo 2</u> en la sección de respuesta al <u>Tiempo</u>, donde Mersni demostró que mantener estos factores en un nivel alto, favorecen a disminuir el tiempo de mecanizado, especialmente cuando la velocidad de corte y el avance por diente son parámetros involucrados en el proceso.



Figura 36. Gráfica de efectos para el tiempo promedio en placa corazón.



Figura 37. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio en placa corazón.

4.2.3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la Figura 38 se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de desbaste (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-estrategia de corte) frente al desgaste promedio de herramienta utilizada. Según la gráfica de efectos principales, el desgaste promedio por proceso de mecanizado es el más bajo en los niveles A1, B2 y C3.

El desgaste de herramienta por proceso de mecanizado en la placa corazón, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel bajo (61 m/min), el avance por diente en el nivel medio (0.03175 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel alto (zigzag).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 39. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A1, B1 y C3.

Dado que los niveles que logran disminuir el desgaste de herramienta (Main Effects), no coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A1, B1 y C3 (S/N).

Los resultados obtenidos de este análisis, coinciden con la demostración del <u>Capítulo 2</u> en la sección de respuesta al <u>Desgaste</u>, donde Antsev demuestra que una manera de preservar la vida útil de la herramienta de corte es mantener los factores de la velocidad de corte y avance por diente en niveles menores, justo como se observa en la combinación de niveles.



Figura 38. Gráfica de efectos para el desgaste promedio en placa corazón.



Figura 39. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio en placa corazón.

4.3. Análisis de Desbaste para placa Cavidad

4.3.1. Respuesta a la Energía consumida

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la Figura 40 se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de desbaste (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-estrategia de corte) frente al consumo promedio de energía. Según la gráfica de efectos principales, la energía promedio consumida por proceso de mecanizado es la más baja en los niveles A2, B3 y C2.

La energía consumida por proceso de mecanizado en la placa cavidad, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel medio (122 m/min), el avance por diente en el nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel medio (trocoidal).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 41. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A2, B3 y C3.

Dado que los niveles que logran disminuir el consumo de energía (Main Effects), no coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A2, B3 y C3 (S/N).

Los resultados obtenidos de este análisis, concuerdan con las confirmaciones de los autores mencionados en la <u>Sección 4.2.1</u> para la variable de respuesta de Energía consumida.



Figura 40. Gráfica de efectos para el consumo promedio de energía en placa cavidad.



Figura 41. Gráfica de efectos S/N para el consumo promedio de energía en placa cavidad.

4.3.2. Respuesta al Tiempo de maquinado

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 42</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de desbaste (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-estrategia de corte) frente al tiempo promedio de maquinado. Según la gráfica de efectos principales, el tiempo promedio por proceso de mecanizado es el más bajo en los niveles A3, B3 y C3.

El tiempo por proceso de mecanizado en la placa cavidad, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (183 m/min), el avance por diente en el nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel alto (zigzag).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 43. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B3 y C3.

Dado que los niveles que logran disminuir el tiempo de maquinado (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B3 y C3.

Los resultados obtenidos de este análisis, coinciden con la demostración del <u>Capítulo 2</u> en la sección de respuesta al <u>Tiempo</u>, dónde Wiederkehr, de igual forma utilizó dos de los factores asociados a este experimento junto con una estrategia de corte periférica para su experimentación.



Figura 42. Gráfica de efectos para el tiempo promedio en placa cavidad.



Figura 43. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio en placa cavidad.

4.3.3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 44</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de desbaste (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-estrategia de corte) frente al desgaste promedio de herramienta utilizada. Según la gráfica de efectos principales, el desgaste promedio por proceso de maquinado es el más bajo en los niveles A1, B1 y C1.

El desgaste de herramienta por proceso de mecanizado en la placa cavidad, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel bajo (61 m/min), el avance por diente en el nivel bajo (0.0127 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel bajo (periferia).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la <u>Figura 45</u>. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A1, B1 y C1.

Dado que los niveles que logran disminuir el desgaste de herramienta (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A1, B1 y C1.

Los resultados obtenidos de este análisis, concuerdan con las confirmaciones de los autores mencionados en la <u>Sección 4.2.3</u> para la variable de respuesta de Desgaste de la herramienta.



Figura 44. Gráfica de efectos para el desgaste promedio en placa cavidad.



Figura 45. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio en placa cavidad.

4.4. Análisis de Semi-acabado para placa Corazón

4.4.1. Respuesta a la Energía consumida

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 46</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de semi-acabado (A-velocidad de corte, B-profundidad de corte y C-avance por diente) frente al consumo promedio de energía. Según la gráfica de efectos principales, la energía promedio consumida por proceso de mecanizado es la más baja en los niveles A3, B3 y C3.

La energía consumida por proceso de mecanizado en la placa corazón, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte en el nivel alto (0.8 mm) y el avance por diente en el nivel alto (0.1 mm/diente)

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 47. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B3 y C3.

Dado que los niveles que logran disminuir el consumo de energía (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B3 y C3.

Los resultados obtenidos de este análisis, coinciden con la demostración del <u>Capítulo 2</u> en la sección de respuesta a la <u>Energía</u>, donde Park comprobó que valores bajos de velocidades de corte implicadas en el experimento, favorecen a un consumo mayor de energía, justamente se puede apreciar por los niveles altos que el aumento de velocidades y profundidad de corte disminuirán el tiempo de maquinado y por ende el consumo de energía será menor.



Figura 46. Gráfica de efectos para el consumo promedio de energía en placa corazón.



Figura 47. Gráfica de efectos S/N para el consumo promedio de energía en placa corazón.

4.4.2. Respuesta al Tiempo de maquinado

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 48</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de semi-acabado (A-velocidad de corte, B-profundidad de corte y C-avance por diente) frente al tiempo de mecanizado. Según la gráfica de efectos principales, el tiempo promedio por proceso de maquinado es el más bajo en los niveles A3, B3 y C3.

El tiempo por proceso de mecanizado en la placa corazón, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte en el nivel alto (0.8 mm) y el avance por diente en el nivel alto (0.1 mm/diente)

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 49. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B3 y C3.

Dado que los niveles que logran disminuir el tiempo de maquinado (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B3 y C3.

Los resultados obtenidos de este análisis, concuerdan con las confirmaciones de los autores mencionados en la <u>Sección 4.2.2</u> para la variable de respuesta de Tiempo de maquinado.



Figura 48. Gráfica de efectos para el tiempo promedio en placa corazón.



Figura 49. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio en placa corazón.

4.4.3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 50</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de semi-acabado (A-velocidad de corte, B-profundidad de corte y C-avance por diente) frente al desgaste de herramienta. Según la gráfica de efectos principales, el desgaste promedio por proceso de maquinado es el más bajo en los niveles A3, B2 y C2.

El desgaste de herramienta por proceso de mecanizado en la placa corazón, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte en el nivel medio (0.6 mm) y el avance por diente en el nivel medio (0.075 mm/diente)

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 51. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B2 y C1.

Dado que los niveles que logran disminuir el desgaste de herramienta (Main Effects), no coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B2 y C1 (S/N).

Los resultados obtenidos de este análisis, coinciden con la demostración del <u>Capítulo 2</u> en la sección de respuesta al <u>Desgaste</u>, donde Qaiser utilizó en su investigación los mismos 3 factores de control de esta matriz y demostró que la profundidad de corte es el factor más significativo en términos de preservar la vida útil de la herramienta de corte, sugiere que la minimización del desgaste se alcanza con menores valores de la profundidad de corte y el avance por diente, mientras se ajustan valores más altos en la velocidad de corte, justamente como se puede apreciar en la combinación de estos niveles.



Figura 50. Gráfica de efectos para el desgaste promedio en placa corazón.



Figura 51. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio en placa corazón.

4.5. Análisis de Semi-acabado para placa cavidad

4.5.1. Respuesta a la Energía consumida

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 52</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de semi-acabado (A-velocidad de corte, B-profundidad de corte y C-avance por diente) frente al consumo promedio de energía. Según la gráfica de efectos principales, la energía promedio consumida por proceso de mecanizado es la más baja en los niveles A3, B3 y C3.

La energía consumida por proceso de mecanizado en la placa cavidad, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte en el nivel alto (0.8 mm) y el avance por diente en el nivel alto (0.1 mm/diente)

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 53. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B3 y C3.

Dado que los niveles que logran disminuir el consumo de energía (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B3 y C3.

Los resultados obtenidos de este análisis, concuerdan con las confirmaciones de los autores mencionados en la <u>Sección 4.4.1</u> para la variable de respuesta de Energía consumida.



Figura 52. Gráfica de efectos para el consumo promedio de energía en placa cavidad.



Figura 53. Gráfica de efectos S/N para el consumo promedio de energía en placa cavidad.

4.5.2. Respuesta al Tiempo de maquinado

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 54</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de semi-acabado (A-velocidad de corte, B-profundidad de corte y C-avance por diente) frente al tiempo de mecanizado. Según la gráfica de efectos principales, el tiempo promedio por proceso de maquinado es el más bajo en los niveles A3, B3 y C3.

El tiempo por proceso de mecanizado en la placa cavidad, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte en el nivel alto (0.8 mm) y el avance por diente en el nivel alto (0.1 mm/diente)

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 55. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B3 y C3.

Dado que los niveles que logran disminuir el tiempo de maquinado (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B3 y C3.

En adición a lo mencionado en la <u>Sección 4.2.2</u>, Mersni demostró que utilizando el análisis de las gráficas S/N, los factores con niveles más altos favorecerán a disminuir la variabilidad del proceso, al igual que como se puede observar en la gráfica S/N de esta variable de respuesta.



Figura 54. Gráfica de efectos para el tiempo promedio en placa cavidad.



Figura 55. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio en placa cavidad.

4.5.3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 56</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de semi-acabado (A-velocidad de corte, B-profundidad de corte y C-avance por diente) frente al desgaste de herramienta. Según la gráfica de efectos principales, el desgaste promedio por proceso de maquinado es el más bajo en los niveles A3, B1 y C2.

El desgaste de herramienta por proceso de mecanizado en la placa cavidad, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte en el nivel medio (0.6 mm) y el avance por diente en el nivel medio (0.075 mm/diente)

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 57. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B2 y C1.

Dado que los niveles que logran disminuir el desgaste de herramienta (Main Effects), no coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B2 y C1 (S/N).

Los resultados obtenidos de este análisis, concuerdan con las confirmaciones de los autores mencionados en la <u>Sección 4.4.3</u> para la variable de respuesta de Desgaste de la herramienta.



Figura 56. Gráfica de efectos para el desgaste promedio en placa cavidad.



Figura 57. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio en placa cavidad.

4.5.4. Respuesta a la Rugosidad superficial

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 58</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de semi-acabado (A-velocidad de corte, B-profundidad de corte y C-avance por diente) frente a la rugosidad superficial. Según la gráfica de efectos principales, la rugosidad promedio por proceso de maquinado es la más baja en los niveles A3, B1 y C2.

La rugosidad superficial por proceso de mecanizado en la placa cavidad, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte en el nivel medio (0.4 mm) y el avance por diente en el nivel medio (0.075 mm/diente)

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 59. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B1 y C2.

Dado que los niveles que logran disminuir la rugosidad superficial (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B1 y C2.

Los resultados obtenidos de este análisis, coinciden con la demostración del <u>Capítulo 2</u> en la sección de respuesta a la <u>Rugosidad</u>, donde Ravikumar utilizó de igual manera la velocidad de corte y la profundidad de corte dentro de su selección de factores, el demostró que sus valores óptimos los alcanzó especialmente, cuando la profundidad de corte de ajustó en el nivel más bajo, al igual que en los resultados que se aprecian en esta sección.

Al igual que coincide la sugerencia de Sharma, la profundidad de corte es el factor más significativo y a su vez, la sugerencia de Holmberg, quien observó que a menor valor de la profundidad de corte, se alcanza la optimización en la rugosidad superficial Ra. Finalizando con la demostración de Aslantas, quien sugiere que valores altos de la profundidad de corte contribuyen a una mayor tasa de desgaste de la herramienta de corte y por lo tanto mayor rugosidad superficial Ra.



Figura 58. Gráfica de efectos para la rugosidad superficial promedio en placa cavidad.



Figura 59. Gráfica de efectos S/N para la rugosidad superficial promedio en placa cavidad.

4.6. Análisis de Acabado para placa Corazón

4.6.1. Respuesta a la Energía consumida

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 60</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de acabado para la sub-operación Contour area (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-stepover) frente al consumo promedio de energía. Mientras que para la segunda sub-operación (Flowcut ref tool) los tres factores considerados fueron los mismos pero con diferentes niveles en la matriz y se muestra en la <u>Figura 61</u>.

Según la gráfica de efectos principales de la primer sub-operación (Contour area), la energía promedio consumida por proceso de mecanizado es la más baja en los niveles A3, B3 y C3, mientras que para la segunda sub-operación (Flowcut ref tool) es la más baja en los niveles A3, B2 y C3.

La energía consumida por proceso de mecanizado en la placa corazón para Contour area, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (25 m/min), el avance por diente en el nivel alto (0.068 mm/diente) y el stepover en el nivel alto (15%), mientras que para Flowcut ref tool, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (10 m/min), el avance por diente en el nivel medio (0.032 mm/diente) y el stepover en el nivel alto (15%).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores de Contour area se muestra en la <u>Figura 62</u> y la gráfica para los tres factores de Flowcut ref tool se muestra en la <u>Figura 63</u>. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B3 y C3 para Contour area y para Flowcut ref tool con los niveles A3, B2 y C3.

Dado que los niveles que logran disminuir el consumo de energía (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B3 y C3 (Contour area) y A3, B2 y C3 (Flowcut ref tool).

Los resultados obtenidos de este análisis, concuerdan con las confirmaciones de los autores mencionados en la <u>Sección 4.4.1</u> para la variable de respuesta de Energía consumida.



Figura 60. Gráfica de efectos para el consumo de energía promedio (Contour area).



Figura 61. Gráfica de efectos para el consumo de energía promedio (Flowcut ref tool).



Figura 62. Gráfica de efectos S/N para el consumo de energía promedio (Contour area).



Figura 63. Gráfica de efectos S/N para el consumo de energía promedio (Flowcut ref tool).

4.6.2. Respuesta al Tiempo de maquinado

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la Figura 64 se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de acabado para la sub-operación Contour area (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-stepover) frente al tiempo de mecanizado. Mientras que para la segunda sub-operación (Flowcut ref tool) los tres factores considerados fueron los mismos pero con diferentes niveles en la matriz y se muestra en la Figura 65.

Según la gráfica de efectos principales de la primer sub-operación (Contour area), el tiempo promedio por proceso de mecanizado es el más bajo en los niveles A3, B3 y C3, mientras que para la segunda sub-operación (Flowcut ref tool) es el más bajo en los niveles A3, B3 y C3.

El tiempo por proceso de mecanizado en la placa corazón para Contour area, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (25 m/min), el avance por diente en el nivel alto (0.068 mm/diente) y el stepover en el nivel alto (15%), mientras que para Flowcut ref tool, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (10 m/min), el avance por diente en el nivel alto (0.034 mm/diente) y el stepover en el nivel alto (15%).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores de Contour area se muestra en la Figura 66 y la gráfica para los tres factores de Flowcut ref tool se muestra en la Figura 67. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B3 y C3 para Contour area y para Flowcut ref tool con los niveles A3, B3 y C3.

Dado que los niveles que logran disminuir el tiempo de maquinado (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B3 y C3 (Contour area) y A3, B3 y C3 (Flowcut ref tool).

Los resultados obtenidos de este análisis, concuerdan con las confirmaciones de los autores mencionados en la <u>Sección 4.2.2</u> para la variable de respuesta de Tiempo de maquinado.



Figura 64. Gráfica de efectos para el tiempo promedio (Contour area).



Figura 65. Gráfica de efectos para el tiempo promedio (Flowcut ref tool).



Figura 66. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio (Contour area).



Figura 67. Gráfica de efectos S/N para el tiempo promedio (Flowcut ref tool).

4.6.3. Respuesta al Desgaste de la herramienta de corte

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la Figura 68 se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de acabado para la sub-operación Contour area (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-stepover) frente al tiempo de mecanizado. Mientras que para la segunda sub-operación (Flowcut ref tool) los tres factores considerados fueron los mismos pero con diferentes niveles en la matriz y se muestra en la Figura 69.

Según la gráfica de efectos principales de la primer sub-operación (Contour area), el desgaste de la herramienta #3 por proceso de mecanizado es el más bajo en los niveles A3, B3 y C3, mientras que para la segunda sub-operación (Flowcut ref tool) el desgaste de la herramienta #4 es el más bajo en los niveles A1, B1 y C2.

El desgaste de herramienta por proceso de mecanizado en la placa corazón para Contour area, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel alto (25 m/min), el avance por diente en el nivel alto (0.068 mm/diente) y el stepover en el nivel alto (15%), mientras que para Flowcut ref tool, es menor cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel bajo (5 m/min), el avance por diente en el nivel bajo (0.029 mm/diente) y el stepover en el nivel medio (10%).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores de Contour area se muestra en la Figura 70 y la gráfica para los tres factores de Flowcut ref tool se muestra en la Figura 71. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B3 y C3 para Contour area y para Flowcut ref tool con los niveles A1, B1 y C2.

Dado que los niveles que logran disminuir el desgaste de herramienta (Main Effects), coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B3 y C3 (Contour area) y A1, B1 y C2 (Flowcut ref tool).

Los resultados obtenidos de este análisis, concuerdan con las confirmaciones de los autores mencionados en la <u>Sección 4.4.3</u> para la variable de respuesta de Desgaste de la herramienta.



Figura 68. Gráfica de efectos para el desgaste promedio (Contour area).



Figura 69. Gráfica de efectos para el desgaste promedio (Flowcut ref tool).



Figura 70. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio (Contour area).



Figura 71. Gráfica de efectos S/N para el desgaste promedio (Flowcut ref tool).

4.6.4. Respuesta a la Rugosidad superficial

El análisis de efectos principales (Main Effects), se utilizó para estudiar la tendencia de los efectos de cada uno de los factores. En la <u>Figura 72</u> se muestran los efectos principales para los tres factores considerados en la operación de acabado (A-velocidad de corte, B-avance por diente y C-stepover) frente a la rugosidad superficial. Según la gráfica de efectos principales, la rugosidad promedio por proceso de maquinado es la más baja en los niveles A2, B1 y C2.

La rugosidad superficial por proceso de mecanizado en la placa corazón, es menor con la herramienta #3 cuando los valores de velocidad de corte están en el nivel medio (20 m/min), el avance por diente en el nivel bajo (0.051 mm/diente) y el stepover en el nivel medio (10%) y es menor con la herramienta #4 cuando la velocidad de corte está en el nivel medio (7.5 m/min), el avance por diente en el nivel bajo (0.029 mm/diente) y el stepover en el nivel stepover en el nivel medio (10%).

El S/N (señal ruido) mide las características de rendimiento del proceso y ayuda a reducir su variación y evitar su desviación del valor objetivo. La gráfica S/N para los tres factores se muestra en la Figura 73. De acuerdo con la gráfica S/N, la variabilidad del proceso se logra disminuir con los niveles A3, B1 y C2.

Dado que los niveles que logran disminuir la rugosidad superficial (Main Effects), no coinciden con los niveles que favorecen a reducir la variabilidad del experimento (S/N), la combinación de niveles sugerida para esta variable de respuesta es: A3, B1 y C2.

Los resultados obtenidos de este análisis, concuerdan con las confirmaciones de los autores mencionados en la <u>Sección 4.5.4</u> para la variable de respuesta de Rugosidad superficial.



Figura 72. Gráfica de efectos para la rugosidad superficial promedio en placa corazón.



Figura 73. Gráfica de efectos S/N para la rugosidad superficial promedio en placa corazón.

4.7. Resumen de resultados

Como se ha mostrado con anterioridad, los resultados obtenidos mediante las gráficas de efectos principales y las gráficas S/N, el resumen de las combinaciones que ayudan a minimizar: la energía consumida, el tiempo de mecanizado, el desgaste de herramienta y la rugosidad superficial dentro del proceso de fresado de ambas placas inserto para moldes, se muestra a continuación en la Tabla 21.

De esta misma tabla, se pueden observar los resultados de los niveles recomendados por cada factor para la minimización de cada respuesta, esto con base a las gráficas de efectos principales y S/N, se puede apreciar también que en la operación de acabado, debido a que se trabajaron dos sub-operaciones (Contour area y Flowcut ref tool) con herramientas distintas (#3 y #4), se tienen tres respuestas por cada sub-operación utilizada en la placa corazón, en esta misma operación la respuesta a la rugosidad superficial Ra se midió al finalizar el trabajo de las dos sub-operaciones de la operación acabado, por esta razón solo hay una respuesta general de rugosidad en la placa corazón.

Operación	Placa	Respuesta	Niveles
Desbaste	Corazón	Energía consumida	A2-B3-C2
		Tiempo de maquinado	A3-B3-C2
		Desgaste de herramienta	A1-B1-C3
	Cavidad	Energía consumida	A2-B3-C3
		Tiempo de maquinado	A3-B3-C3
		Desgaste de herramienta	A1-B1-C1
Semi-acabado	Corazón	Energía consumida	A3-B3-C3
		Tiempo de maquinado	A3-B3-C3
		Desgaste de herramienta	A3-B2-C1
	Cavidad	Energía consumida	A3-B3-C3
		Tiempo de maquinado	A3-B3-C3
		Desgaste de herramienta	A3-B2-C1
		Rugosidad superficial	A3-B1-C2
Acabado	Corazón (Contour area)	Energía consumida	A3-B3-C3
		Tiempo de maquinado	A3-B2-C3
		Desgaste de herramienta	A3-B3-C3
	Corazón (Flowcut ref tool)	Energía consumida	A3-B3-C3
		Tiempo de maquinado	A3-B3-C3
		Desgaste de herramienta	A1-B1-C2
	Corazón	Rugosidad superficial	A3-B1-C2

Tabla 21. Resumen de niveles sugeridos en cada operación y placa maquinada.
4.8. Combinaciones de los niveles sugeridos

Para minimizar la energía consumida por la operación de desbaste en el mecanizado de las placas corazón y cavidad, el avance por diente es el factor más significativo (43.63% en el corazón y 83.34% en la cavidad) seguido de la velocidad de corte (26.96% y 8.51%) y la estrategia de corte (15.74% y 5.04%). Los resultados óptimos para el consumo de energía se observaron cuando el avance por diente se ajustó a 0.0528 mm/diente, la velocidad de corte a 122 m/min, se utilizó la estrategia de corte trocoidal y el avance por diente se ajustó a 0.0508 mm/diente, la velocidad de corte a 122 m/min y se utilizó la estrategia de corte Zigzag. Un avance por diente más alto, una velocidad intermedia de corte y las rutas Trocoidal y Zigzag como estrategia de mecanizado conducen a un consumo mínimo de energía y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

El menor tiempo de maquinado en las 3 operaciones y en ambas placas inserto, los resultados óptimos para esta variable de respuesta se obtuvieron cuando la velocidad de corte se ajustó a 122 m/min, el avance por diente a 0.0508 mm/diente y las estrategias de corte utilizadas fueron Trocoidal y Zigzag respectivamente en la operación desbaste, cuando la velocidad de corte se ajustó a 50 m/min, la profundidad de corte a 0.8 mm y el avance por diente a 0.1 mm/diente en la operación semi-acabado, cuando la velocidad de corte, el avance por diente y el stepover de las sub-operaciones Contour area y Flowcut ref tool de la operación acabado se ajustaron a 25 m/min, 0.059 mm/diente, 15% y 10 m/min, 0.034 mm/diente, 15% respectivamente.

Y de acuerdo a la influencia de cada factor en el tiempo de maquinado, para la operación desbaste de placas corazón y cavidad, el avance por diente es el factor más significativo con 46.69% y 42.73% respectivamente, mientras que para la operación semi-acabado de ambas placas es igualmente el avance por diente con 52.56% y 58.63% respectivamente y en la operación acabado para las sub-operaciones: Contour area y Flowcut ref tool los factores más significativos son stepover (70.59%) y la velocidad de corte (92.89%) respectivamente.

La minimización de la energía consumida en la operación de semi-acabado del mecanizado de las placas corazón y cavidad, el avance por diente es el factor más significativo (60.38% en el corazón y 54.53% en la cavidad) seguido de la velocidad de corte (24.25% y 27.39%) y la profundidad de corte (12.05% y 15.49%). Los resultados óptimos para el consumo de energía se observaron cuando el avance por diente se ajustó a 0.1 mm/diente, la velocidad de corte a 50 m/min y la profundidad de corte a 0.8 mm. Un avance por diente más alto, una velocidad de corte más alta y una profundidad de corte mayor, conducen a un consumo mínimo de energía y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

El stepover es el factor más significativo (82.69%) seguido de la velocidad de corte (8.99%) y el avance por diente (5.50%) en la energía consumida de la operación de acabado (Contour area) del mecanizado de solo la placa corazón. Los resultados óptimos para el

consumo de energía se observaron cuando el stepover se ajustó a 15%, la velocidad de corte a 25 m/min y el avance por diente a 0.068 mm/diente. Un porcentaje de stepover mayor, una velocidad de corte más alta y un avance por diente más alto, conducen a un consumo mínimo de energía y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

La velocidad de corte es el factor más significativo (89.32%) seguido del avance por diente (7.70%) y el stepover (2.37%) en la energía consumida de la operación de acabado (Flowcut ref tool) del mecanizado de solo la placa corazón. Los resultados óptimos para el consumo de energía se observaron cuando la velocidad de corte se ajustó a 10 m/min, el avance por diente a 0.034 mm/diente y el stepover a 15%. Una velocidad de corte alta, un avance por diente alto y un porcentaje de stepover mayor, conducen a un consumo mínimo de energía y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

Para reducir el desgaste de herramienta en la operación desbaste del mecanizado de la placa corazón, la estrategia de corte es el factor más significativo (70.31%) seguido de la velocidad de corte (10.37%) y el avance por diente (6.73%). Los resultados óptimos para el desgaste de herramienta se observaron cuando se seleccionó Zigzag como estrategia de corte, se ajustó la velocidad de corte a 61 m/min y el avance por diente a 0.0508 mm/diente. Utilizar la estrategia de corte en el nivel alto, una velocidad de corte más baja y un avance por diente alto, conducen a un desgaste de herramienta menor y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

Disminuyendo el desgaste de herramienta en la operación desbaste del mecanizado de la placa cavidad, la velocidad de corte es el factor más significativo (37.55%) seguido del avance por diente (20.57%) y la estrategia de corte (9.81%). Los resultados óptimos para el desgaste de herramienta se observaron cuando se ajustó la velocidad de corte a 61 m/min, el avance por diente a 0.0127 mm/diente y se utilizó periferia como la estrategia de corte. Una velocidad de corte más baja, un avance por diente menor y seleccionar la estrategia de corte al nivel bajo, conducen a un desgaste de herramienta menor y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

De acuerdo con el desgaste de herramienta en la operación semi-acabado del mecanizado de la placa corazón, la velocidad de corte es el factor más significativo (70.05%) seguido de la profundidad de corte (21.45%) y el avance por diente (1.44%). Los resultados óptimos para el desgaste de herramienta se observaron cuando se ajustó la velocidad de corte a 50 m/min, la profundidad de corte a 0.6 mm y el avance por diente a 0.05 mm/diente. Una velocidad de corte más alta, una profundidad de corte intermedia y un avance por diente menor, conducen a un desgaste de herramienta menor y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

El avance por diente es el factor más significativo (27.60%) seguido de la velocidad de corte (22.73%) y la profundidad de corte (22.32%) para el desgaste de herramienta en la operación semi-acabado del mecanizado de la placa cavidad. Los resultados óptimos para el desgaste de herramienta se observaron cuando se ajustó el avance por diente a 0.05

mm/diente, la velocidad de corte a 50 m/min y la profundidad de corte a 0.6 mm. Un avance por diente bajo, con una velocidad de corte más alta y una profundidad de corte moderada, conducen a un desgaste de herramienta menor y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

Con el stepover siendo el factor más significativo (46.27%) seguido de la velocidad de corte (16.89%) y el avance por diente (14.98%) para el desgaste de herramienta en la operación acabado del mecanizado de la placa corazón (Contour area). Los resultados óptimos para el desgaste de herramienta se observaron cuando se ajustó el stepover a 15%, la velocidad de corte a 25 m/min y el avance por diente a 0.068 mm/diente. Un porcentaje de stepover más alto, con una velocidad de corte más alta y un avance por diente mayor, conducen a un desgaste de herramienta menor y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

Para poder optimizar el desgaste de herramienta en la operación acabado del mecanizado de la placa corazón (Flowcut ref tool), el stepover es el factor más significativo (21.68%) seguido de la velocidad de corte (20.87%) y el avance por diente (8.62%). Los resultados óptimos para el desgaste de herramienta se observaron cuando se ajustó el stepover a 10%, la velocidad de corte a 5 m/min y el avance por diente a 0.029 mm/diente. Un porcentaje de stepover moderado, con una velocidad de corte más baja y un avance por diente menor, conducen a un desgaste de herramienta menor y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

Teniendo la velocidad de corte como el factor más significativo (39.64%) seguido del avance por diente (12.73%) y la profundidad de corte (11.72%) para la rugosidad superficial Ra en la operación semi-acabado del mecanizado de la placa cavidad. Los resultados óptimos para la rugosidad superficial Ra se observaron cuando se ajustó la velocidad de corte a 50 m/min, el avance por diente a 0.075 mm/diente y la profundidad de corte a 0.4 mm. Una velocidad de corte más alta, con un avance por diente moderado y una profundidad de corte menor, conducen a un valor de rugosidad menor y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

Y tomando el avance por diente como el factor más significativo (67.92%) seguido del stepover (7.12%) y la velocidad de corte (2.28%) para la rugosidad superficial Ra en la operación acabado del mecanizado de la placa corazón(Contour area y Flowcut ref tool). Los resultados óptimos para la rugosidad superficial Ra se observaron cuando se ajustó el avance por diente a (0.051 y 0.029 mm/diente), el stepover a (10% y 10%) y la velocidad de corte a (25 y 10 m/min). Un avance por diente más bajo, con un porcentaje de stepover moderado y una velocidad de corte alta, conducen a un valor de rugosidad menor y a una menor variación del proceso de fresado respecto del valor objetivo.

4.9. Confirmación de resultados obtenidos

Para validar las conclusiones obtenidas en esta sección, se realizaron predicciones de los experimentos sugeridos que minimizan las 20 respuestas de la <u>Tabla 21</u>, esta predicción se llevó a cabo con base en los valores de R-cuadrado y R-cuadrado-ajustado expuestos en cada análisis.

El valor (%) de R-cuadrado, indica la precisión del modelo y el valor (%) de R-cuadradoajustado, indica la compatibilidad del modelo con los datos experimentales calculados [67], con la herramienta de predecir resultados de Taguchi encontrada en el software Minitab, se predice la respuesta de las combinaciones de los parámetros de corte (factores) óptimos de acuerdo con las gráficas de efectos principales y el análisis de la relación S/N para cada una de las respuestas. Los indicadores R-cuadrado y R-cuadrado-ajustado se encuentran en los análisis de varianza del <u>Anexo C</u>.

Los resultados obtenidos son reflejados a continuación en la <u>Tabla 22</u>. Estos 20 resultados mencionados, se derivan de la obtención de respuestas predichas con respecto al: consumo de energía, el tiempo de maquinado, el desgaste de herramienta y la rugosidad Ra en las operaciones de desbaste, semi-acabado y acabado tanto de la placa corazón como de la placa cavidad, los cuales sugieren dichas combinaciones para minimizar las variables de respuestas buscadas. Aquellas combinaciones marcadas con un * no fueron predicciones hechas por Minitab, debido a que el orden de niveles coincide con algunos experimentos ya hechos de los cuales ya se tenía una respuesta registrada por la experimentación.

Dado que los datos de muchos experimentos ejecutados tienen un alto nivel de variabilidad en el proceso de fresado, los indicadores R-cuadrado y R-cuadrado-ajustado reportan un porcentaje relativamente bajo. Lo que significa, que el modelo obtenido no sirve para predecir la variable de respuesta en cuestión, por lo tanto las predicciones obtenidas por Minitab de aquellos experimentos cuyos modelos R-cuadrado-ajustado hayan sido menores al 80% éstas no serán certeras. Los experimentos que obtuvieron indicadores R-cuadrado-ajustado bajos, se pueden apreciar en la Tabla 23.

Las fallas presentadas por dichos modelos se deben a diversos factores ruido que pudieron intervenir durante el proceso de fresado en cada experimento, uno de ellos principalmente identificado ha sido la viruta irregular generada por la operación desbaste exclusivamente en algunas corridas de la placa cavidad.

Durante la remoción de material de dicha operación en la placa cavidad, se produjo un efecto de falla de disipación de calor en la superficie mecanizada por la herramienta #1 al no ejecutar las corridas de desbaste con fluido de corte, las apariencias físicas de los experimentos irregulares de desbaste en dicha placa, fueron observados en las corridas 5-9, las cuales presentaban las combinaciones más altas de velocidad de corte y avances por diente (Tabla 13), con las cuales el valor de RPM del husillo se incrementaba. Este tipo de efectos irregulares se puede apreciar y comparar dentro de las evidencias del <u>Anexo D2</u>.

Tabla 22. Confirmac	ción de corridas,	predicciones	recomendadas	Minitab.
---------------------	-------------------	--------------	--------------	----------

Orenneián	Dl	٨	D	C	Energía	Tiempo	Desgaste	Rugosidad
Operacion	Placa	А	В	C	[Wh]	[Seg]	[µm]	: Rugosidad [μm] - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
		2	3	2	206.685	-	-	-
	Corazón	3	3	2	-	3085*	-	-
Dochasto		1	1	3	-	-	0.338	-
Desbaste		2	3	3	232.589	-	-	-
	Cavidad	3	3	3	-	1826.56	-	-
		1	1	1	-	_	5.8*	-
		3	3	3	357.713	-	-	-
	Corazón	3	3	3	-	2239.78	-	-
		3	2	1	-	-	7.34 *	-
Semi-acabado		3 3	3	3	272.986	-	-	-
	Carridad	3	3	3	-	1832.78	-	Rugosidad [μm] - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
	Cavidad	3	2	1	-	-	31.32*	
		3	1	2	-	-	-	0.325
		3	3	3	126.414	-	-	-
	Corazón	3	2	3	-	1140.56	-	-
	Contour area)	3	3	3	-	-	8.143	-
Acabado	Corazón	3	3	3	291.519	-	-	-
	(Flowcut ref	3	3	3	-	2279.67	-	-
	tool)	1	1	2		-	0.658	
	Corazón	3	1	2	-	-	-	0.268

Tabla 23. Porcentajes bajos del indicador R-cuadrado-ajustado.

Operación	Placa	Energía [%]	Tiempo [%]	Desgaste [%]	Rugosidad [%]
Dashaata	Corazón	45.36	58.34	49.34	-
Desbaste	Cavidad	-	64.35	0	-
Carris a sub-sub-sub-sub-sub-sub-sub-sub-sub-sub-	Corazón	-	-	71.74	-
Senn-acabado	Cavidad	-	-	0	0
	Corazón (Contour area)	-	-	12.54	-
Acabado	Corazón (Flowcut ref tool)	-	-	0	-
	Corazón	-	-	-	9.27

Para verificar la contribución o influencia de todos los factores presentes en los experimentos (<u>Tabla 24</u>), se obtuvo un modelo ANOVA (Análisis de varianza). En el <u>Anexo C</u>, se muestra un resumen de los resultados de ANOVA para cada uno de los modelos presentados por cada tipo de respuesta donde se encuentran los porcentajes de influencia de cada factor y los indicadores R-cuadrado-ajustados.

Tabla 24. Contribuciones de los factores en los experimentos por cada respuesta.

Operación	Dlaga	Factores		Respuestas Tiempo Desgaste Rugo 31.18% 10.37% - 46.69% 6.73% -			
Operación	Placa	Factores	Energía	Tiempo	Desgaste	Rugosidad	
		А	26.96%	31.18%	10.37%	-	
	Corazón	В	43.63%	46.69%	6.73%	-	
Dosbasto		С	15.74%	11.71%	70.31%	-	
DesDaste		А	8.51%	38.15%	37.55%	-	
	Cavidad	В	83.34%	42.73%	20.57%	-	
		С	5.04%	10.21%	9.81%	-	
		А	24.25%	34.06%	70.05%	-	
	Corazón	В	12.05%	10.88%	21.45%	-	
Somi acabada		С	60.38%	52.56%	1.44%	-	
Senn-acabado		А	27.39%	32.89%	22.73%	39.64%	
	Cavidad	В	15.49%	6.54%	22.32%	11.72%	
		С	54.53%	58.63%	27.60%	12.73%	
		А	8.99%	20.74%	16.89%	-	
	Corazón	В	5.50%	5.50%	14.98%	-	
Acabado	(Contour area)	С	82.69%	70.59%	46.27%	-	
	Corazón	А	89.32%	92.89%	20.87%	2.28%	
	(Flowcut ref	В	7.70%	5.75%	8.62%	67.92%	
	tool)	С	2.37%	1.30%	21.68%	7.12%	

4.9.1. Confirmación de tiempos de maquinado en módulo CAM

Debido a que la sección de confirmación de los resultados dados por los niveles de recomendación para la optimización, han sido valores de predicción utilizando los indicadores R-cuadrado y R-cuadrado-ajustado, para poder tener una estimación del tiempo que haga similitud con las variables de respuesta del tiempo de maquinado, se utilizó el software NX para poder obtener los tiempos de mecanizado de los experimentos sugeridos, dado que la combinaciones de factores sugeridos no forman parte de los experimentos ejecutados inicialmente en las matrices de diseño.

Se puede observar en la <u>Tabla 25</u>, la comparación de la variable de respuesta del tiempo de maquinado utilizando el tiempo calculado por NX y comparándolo con los valores de tiempo que se lograron predecir en Minitab. Se puede apreciar que dado que los indicadores mencionados con anterioridad de dicho modelo se encuentran en porcentajes más altos en la mayoría de los casos por encima el 90% para R-cuadrada y R-cuadrada-ajustado, como se muestra junto al análisis de varianza (ANOVA) dentro del <u>Anexo C.</u>

Sin embargo, una de las principales razones de diferencia entre la comparación es debida a que el software CAM simula todos los componentes del maquinado interactuando a una velocidad del 100%, mientras que en la ejecución experimental esto no ocurrió de la misma forma, los avances rápidos de la herramienta de corte y la mesa de trabajo operaron al 50% de su velocidad, esto con el propósito de alerta frente a una posible colisión.

			Tier	Tiempos de maquinadoCAM (NX)MinitabDiferencia[S][S][%]22542884.3328%11361826.5660%29412239.78-24%24461832.78-25%1770961.88-46%17212279.6732%	
Operación	Placa	Niveles	CAM (NX) [S]	Minitab [S]	Diferencia [%]
Dashasta	Corazón	A3-B3-C2	2254	2884.33	28%
Desbaste	Cavidad	A3-B3-C3	1136	1826.56	60%
Construction da	Corazón	A3-B3-C3	2941	2239.78	-24%
Semi-acadado	Cavidad	A3-B3-C3	2446	1832.78	-25%
Acabado	Contour area	A3-B2-C3	1770	961.88	-46%
	Flowcut ref tool	A3-B3-C3	1721	2279.67	32%

Tabla 25. Comparación de resultados Minitab vs NX.

4.10. Equivalencia de la energía consumida a emisiones CO₂

Se ha sugerido, que el sector industrial representa una gran parte del consumo de energía. Según las estadísticas de la EIA, la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero ha seguido aumentando, superando los 36.400 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2016, y dichas emisiones tienen el potencial de dañar la salud ambiental mundial; Estas emisiones de dióxido de carbono están directamente relacionadas con el consumo de energía [68].

En similitud con la <u>Tabla 17</u>, los valores en respuesta al consumo de energía reportados con anterioridad en Wh, ahora se presentan a continuación en kWh en la <u>Tabla 26</u>, esto con la finalidad de poder expresar la equivalencia de toda esa energía consumida a emisiones CO₂ mostrando las siguientes cifras expresadas en Toneladas métricas de emisiones (<u>Tabla 27</u>). Para la obtención de estos valores, se consultó la calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero de la EPA [69].

No				Dest	oaste	Semi-a	cabado	Acabado	(Corazón)
Experimento	А	В	С	Corazón	Cavidad	Corazón	Cavidad	Contour	Flowcut
-	11	D	0	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	Area [kWh]	ref tool [kWh]
1	1	1	1	4.9218	1.5443	1.3242	0.7729	1.0967	0.6294
2	1	2	2	1.5191	0.6023	0.7984	0.6217	0.4656	0.5745
3	1	3	3	1.1184	0.3907	0.5959	0.4635	0.2831	0.5419
4	2	1	2	1.1883	0.9218	0.7254	0.5601	0.4310	0.4636
5	2	2	3	1.1488	0.3987	0.5158	0.4062	0.3039	0.3516
6	2	3	1	0.8592	0.4438	0.8192	0.5500	0.7289	0.4194
7	3	1	3	2.1510	1.3354	0.5200	0.3834	0.2490	0.3620
8	3	2	1	1.0590	0.6484	0.8203	0.6360	0.7048	0.3239
9	3	3	2	0.6067	0.4929	0.5741	0.3466	0.3145	0.3119

Tabla 26. Energía consumida durante el maquinado de las operaciones (kWh).

Tabla 27. Equivalencia de energía consumida a emisiones CO2 (Ton métricas).

No				Dest	oaste	Semi-a	cabado	Acabado	(Corazón)
Experimento	А	В	С	Corazón	Cavidad	Corazón	Cavidad	Contour	Flowcut
-		2	9	[Ton]	[Ton]	[Ton]	[Ton]	Area [Ton]	ref tool [Ton]
1	1	1	1	0.003	0.001	0.0009	0.0005	0.0008	0.0004
2	1	2	2	0.001	0.0004	0.0006	0.0004	0.0003	0.0004
3	1	3	3	0.0008	0.0003	0.0004	0.0003	0.0002	0.0004
4	2	1	2	0.0008	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003
5	2	2	3	0.0008	0.0003	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002
6	2	3	1	0.0006	0.0003	0.0006	0.0004	0.0005	0.0003
7	3	1	3	0.002	0.0009	0.0004	0.0003	0.0002	0.0003
8	3	2	1	0.0007	0.0005	0.0006	0.0004	0.0005	0.0002
9	3	3	2	0.0004	0.0003	0.0004	0.0002	0.0002	0.0002

Para obtener una noción de lo que implica el consumo energético de la máquina herramienta fresadora CNC, en el maquinado de las placas inserto de moldes de este trabajo de investigación, la calculadora de la EPA calcula la siguiente información mostrando las equivalencias por cada 1 kWh de energía eléctrica que se consume (Tabla 28).

Unidades equivalentes	Cantidad
Vehículos de pasajeros liberando emisiones de efecto invernadero durante un año	0.0002
Millas conducidas por un vehículo de pasajeros promedio	1.8
Galones de gasolina consumidos	0.08
Galones de diesel consumidos	0.069
Libras de carbón consumidas	0.779
Barriles de petróleo consumidos	0.002
Cilindros de gas propano para cocción de alimentos en casa	0.029
Smartphones cargados al nivel 100%	90

Tabla 28 Otras equivalencias del consumo de 1 kWh de electricidad.

4.11. Ahorro en energía eléctrica consumida

Para representar los porcentajes de ahorro en la energía consumida gracias a este proyecto de investigación, se realizó una comparación entre el caso experimental menos favorable obtenido (<u>Tabla 17</u>) vs el experimento con la combinación de niveles sugeridos (existente o predicción) de mayor eficiencia reportados en la <u>Tabla 22</u>.

Después de observar la comparación entre valores de la <u>Tabla 29</u>, es posible obtener el porcentaje de ahorro en energía eléctrica consumida por la máquina herramienta durante una corrida óptima por operación (Desbaste, Semi-acabado, Acabado) en las placas inserto (Corazón y Cavidad) junto a los niveles que corresponden al escenario más favorable para conseguir dicho resultado.

Tabla 29. Ahorro en energía consumida expresada en porcentaje.

		Energía Ahorro			
Operación	Placa	Deficiente	Eficiente	[0/0]	Niveles
		[Wh]	[Wh]	[70]	
Dochasto	Corazón	4921.836	206.685	95.8	A2-B3-C2
DesDaste	Cavidad	1544.307	232.589	85	A2-B3-C3
Semi acabado	Corazón	1324.234	357.713	73	A3-B3-C3
Semi-acabado	Cavidad	772.995	272.986	64.6	A3-B3-C3
Acabado	(Contour area)	1096.735	126.414	88.4	A3-B3-C3
	(Flowcut ref tool)	629.494	291.519	53.6	A3-B3-C3

4.12. Ahorro en tiempo de maquinado

Para representar los porcentajes de ahorro en tiempo de maquinado gracias a este proyecto de investigación, se realizó una comparación entre el caso experimental menos favorable obtenido (<u>Tabla 18</u>) vs el experimento con la combinación de niveles sugeridos (existente o predicción) de mayor eficiencia reportados en la <u>Tabla 22</u>.

Después de observar la comparación entre valores de la <u>Tabla 30</u>, es posible obtener el porcentaje de ahorro en tiempo de mecanizado por la máquina herramienta durante una corrida óptima por operación (Desbaste, Semi-acabado, Acabado) en las placas inserto (Corazón y Cavidad) junto a los niveles que corresponden al escenario más favorable para conseguir dicho resultado.

		Tiempo Ahorro			
Operación	Placa	Deficiente	Eficiente	10/1	Niveles
		[Seg]	[Seg]	[70]	
Desbaste	Corazón	46873	3085	93.4	A3-B3-C2
	Cavidad	14282	1826.56	87.2	A3-B3-C3
Sami agabada	Corazón	10917	2239.78	79.5	A3-B3-C3
Semi-acabado	Cavidad	8148	1832.78	77.5	A3-B3-C3
Acabado	(Contour area)	9124	1140.56	87.5	A3-B2-C3
	(Flowcut ref tool)	5897	2279.67	61.3	A3-B3-C3

Tabla 30. Ahorro en tiempo de maquinado expresado en porcentaje.

4.13. Ahorro en desgaste de la herramienta

Para representar los porcentajes de ahorro en desgaste de herramienta gracias a este proyecto de investigación, se realizó una comparación entre el caso experimental menos favorable obtenido (Tabla 19) vs el experimento con la combinación de niveles sugeridos (existente o predicción) de mayor eficiencia reportados en la Tabla 22.

Después de observar la comparación entre valores de la <u>Tabla 31</u>, es posible obtener el porcentaje de ahorro en desgaste de herramienta por la máquina herramienta durante una corrida óptima por operación (Desbaste, Semi-acabado, Acabado) en las placas inserto (Corazón y Cavidad) junto a los niveles que corresponden al escenario más favorable para conseguir dicho resultado.

		Desgaste Ahorro			
Operación	Placa	Deficiente	Eficiente	107.1	Niveles
		[µm]	[µm]	[/0]	Niveles A1-B1-C3 A1-B1-C1 A3-B2-C1 A3-B2-C1
Dochasto	Corazón	236.86	0.338	99.8	A1-B1-C3
DesDaste	Cavidad	182.83	5.8	96.8	A1-B1-C1
Somi agabada	Corazón	52.63	7.34	86	A3-B2-C1
Semi-acadado	Cavidad	508.27	31.32	93.8	A3-B2-C1
Acabado	(Contour area)	20.92	8.143	61	A3-B3-C3
	(Flowcut ref tool)	32.82	0.658	98	A1-B1-C2

Tabla 31. Ahorro en desgaste de herramienta expresada en porcentaje.

4.14. Ahorro en rugosidad superficial Ra

Para representar los porcentajes de ahorro en desgaste de herramienta gracias a este proyecto de investigación, se realizó una comparación entre el caso experimental menos favorable obtenido (<u>Tabla 20</u>) vs el experimento con la combinación de niveles sugeridos (existente o predicción) de mayor eficiencia reportados en la <u>Tabla 22</u>.

Después de observar la comparación entre valores de la <u>Tabla 32</u>, es posible obtener el porcentaje de ahorro en desgaste de herramienta por la máquina herramienta durante una corrida óptima por operación (Desbaste, Semi-acabado, Acabado) en las placas inserto (Corazón y Cavidad) junto a los niveles que corresponden al escenario más favorable para conseguir dicho resultado.

		Rugosidad Ahor			
Operación	Placa	Deficiente	Eficiente	F07.1	Niveles
		[µm]	[µm]	[70]	
Desheate	Corazón	-	-	-	-
Desbaste	Cavidad	-	-	-	-
Somi acabada	Corazón	-	-	-	-
Senn-acabado	Cavidad	1.024	0.325	68.2	A3-B1-C2
Acabado	(Contour area)	-	-	-	-
	(Flowcut ref tool)	0.973	0.268	72.4	A3-B1-C2

Tabla 32. Ahorro en rugosidad superficial expresada en porcentaje.

4.15. Resumen de ahorros por variable de respuesta

Para la obtención de un ahorro del 95.8% y 85% en energía eléctrica consumida por la máquina herramienta, al mecanizar las placas inserto: corazón y cavidad respectivamente, mediante la operación de desbaste, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A2-B3-C2, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel intermedio (122 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel medio (122 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la velocidad de corte (vc) al nivel intermedio (122 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la velocidad de corte (vc) al nivel intermedio (122 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte (vc) al nivel intermedio (122 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte (vc) al nivel intermedio (122 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel intermedio (122 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel intermedio (122 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel

Obtener un ahorro del 73% y 64.6% en energía eléctrica consumida por la máquina herramienta, al mecanizar las placas inserto: corazón y cavidad respectivamente, mediante la operación de semi-acabado, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A3-B3-C3, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte (a_P) al nivel alto (0.8 mm) y el avance por diente (fz) al nivel alto (0.1 mm/diente).

Lograr el ahorro del 88.4% y 53.6% en energía eléctrica consumida por la máquina herramienta, al mecanizar la placa inserto: corazón (Contour area y Flowcut ref tool) respectivamente, mediante la operación de acabado, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A3-B3-C3, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel alto (25 y 10 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.068 y 0.034 mm/diente) y el stepover (%) al nivel alto (15%).

Conseguir un ahorro del 93.4% y 87.2% en tiempo de mecanizado por la máquina herramienta, al maquinar las placas inserto: corazón y cavidad respectivamente, mediante la operación de desbaste, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A3-B3-C2, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel alto (183 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte (vc) al nivel alto (183 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (183 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte (vc) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte (vc) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte (vc) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte (vc) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte (vc) al nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel alto (0.0508 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel alto (Zigzag).

Generar un ahorro del 79.5% y 77.5% en tiempo de mecanizado por la máquina herramienta, al mecanizar las placas inserto: corazón y cavidad respectivamente, mediante la operación de semi-acabado, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A3-B3-C3, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte (a_p) al nivel alto (0.8 mm) y el avance por diente (fz) al nivel alto (0.1 mm/diente).

Establecer un ahorro del 87.5% y 61.3% en tiempo de mecanizado por la máquina herramienta, al maquinar la placa inserto: corazón (Contour area y Flowcut ref tool) respectivamente, mediante la operación de acabado, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A3-B2-C3, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel alto (25 m/min), el avance por diente (fz) al nivel medio (0.059 mm/diente) y el stepover (%) al nivel alto (10 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (10 m/min), el avance por diente (fz) al nivel al nivel alto (0.034 mm/diente) y el stepover (%) al nivel alto (15%).

Alcanzar un ahorro del 99.8% y 96.8% en desgaste de herramienta por la máquina fresadora, al maquinar las placas inserto: corazón y cavidad respectivamente, mediante la operación de desbaste, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A1-B1-C3, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel bajo (61 m/min), el avance por diente (fz) al nivel bajo (0.0127 mm/diente) y se utiliza la velocidad de corte (vc) al nivel bajo (0.0127 mm/diente) y se utiliza la velocidad de corte (vc) al nivel bajo (0.0127 mm/diente) y se utiliza la velocidad de corte (vc) al nivel bajo (0.0127 mm/diente) y se utiliza la velocidad de corte (vc) al nivel bajo (0.0127 mm/diente) y se utiliza la velocidad de corte (vc) al nivel bajo (0.0127 mm/diente) y se utiliza la estrategia de corte en el nivel bajo (0.0127 mm/diente).

Optimizar al 86% y 93.8% el desgaste de herramienta por la máquina fresadora, al mecanizar las placas inserto: corazón y cavidad respectivamente, mediante la operación de semi-acabado, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A3-B2-C1, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte (ap) al nivel medio (0.6 mm) y el avance por diente (fz) al nivel bajo (0.05 mm/diente).

Para reflejar un ahorro del 61% y 98% en desgaste de herramienta por la máquina fresadora, al maquinar la placa inserto: corazón (Contour area y Flowcut ref tool) respectivamente, mediante la operación de acabado, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A3-B3-C3, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel alto (25 m/min), el avance por diente (fz) al nivel alto (0.068 mm/diente) y el stepover (%) al nivel alto (15%) y los niveles A1-B1-C2, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel bajo (5 m/min), el avance por diente (fz) al nivel bajo (0.029 mm/diente) y el stepover (%) al nivel medio (10%).

Dictaminar un ahorro del 68.2% en rugosidad superficial por la máquina herramienta, al mecanizar la placa inserto: corazón, mediante la operación de acabado (Flowcut ref tool), tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A3-B1-C2, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel alto (10 m/min), el avance por diente (fz) al nivel bajo (0.029 mm/diente) y el stepover (%) al nivel intermedio (10%).

Finalmente, implementar un ahorro del 72.4% en rugosidad superficial por la máquina herramienta, al mecanizar la placa inserto: cavidad, mediante la operación de semi-acabado, tomando en cuenta la comparación del escenario más eficiente contra el caso menos favorable demostrado de cada experimentación, se logra mediante la combinación de los niveles A3-B1-C2, dónde se ajusta la velocidad de corte (vc) al nivel alto (50 m/min), la profundidad de corte (ap) al nivel bajo (0.4 mm) y el avance por diente (fz) al nivel medio (0.075 mm/diente)

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro

5.1. Conclusiones

Con el diseño de experimentos, se estudió el efecto que tienen los parámetros de corte y los patrones de la herramienta de corte seleccionados, se optimizaron las cuatro variables de respuesta, las cuales son: el consumo de energía eléctrica, el tiempo de maquinado, el desgaste de la herramienta de corte empleada y la rugosidad superficial de las placas inserto.

Se sugirieron las combinaciones óptimas de los factores y niveles que minimizan dichas variables de respuesta, se logró la mejora con base en los criterios de eficiencia y variabilidad del proceso. Comprobando que la decisión de la estrategia de corte si contribuye significativamente al consumo energético, altos niveles de la tasa de alimentación lograron disminuir la energía consumida y el tiempo de mecanizado mientras que niveles moderados de la tasa de alimentación redujeron el desgaste de la herramienta de corte y la rugosidad superficial.

Este proyecto de investigación logró reducir notoriamente el consumo energético de la máquina herramienta fresadora CNC, durante el proceso de fresado de un aluminio 7075 de placas inserto para el molde del componente automotriz analizado, por lo tanto se disminuyó a su vez el impacto de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía eléctrica generada a través del consumo de combustibles fósiles, promoviendo el compromiso con el medio ambiente.

5.2. Trabajo a futuro

Se sugiere explorar las oportunidades del moldeo por inyección de plástico para la producción de la cubierta plástica automotriz, mediante las placas inserto de molde diseñadas y manufacturadas en aluminio 7075 para corridas de producción cortas y analizar la calidad obtenida del componente inyectado y comprobar si los valores de rugosidad superficial de dichas placas son aceptables para producir componentes funcionales y con buenas características de estética en la pieza.

Anexo A. Mediciones de desgaste de herramienta

Anexo A1. Herramientas de desbaste en placa corazón



Figura A1.1. 6.75 µm de desgaste | Corrida 1 de desbaste en placa corazón.



Figura A1.3. 40.53 µm de desgaste | Corrida 3 de desbaste en placa corazón.



Figura A1.5. 9.27 µm de desgaste | Corrida 5 de desbaste en placa corazón.



Figura A1.2. 74.74 µm de desgaste | Corrida 2 de desbaste en placa corazón



Figura A1.4. 236.86 µm de desgaste | Corrida 4 de desbaste en placa corazón.



Figura A1.6. 48.27 μm de desgaste | Corrida 6 de desbaste en placa corazón.



Figura A1.7. 16.41 μm de desgaste | Corrida 7 de desbaste en placa corazón.



Figura A1.8. 55.92 µm de desgaste | Corrida 8 de desbaste en placa corazón.



Figura A1.9. 182.1 µm de desgaste | Corrida 9 de desbaste en placa corazón.

Anexo A2. Herramientas de desbaste en placa cavidad



Figura A2.1. 5.8 µm de desgaste | Corrida 1 de desbaste en placa cavidad.



Figura A2.2. 32.82 µm de desgaste | Corrida 2 de desbaste en placa cavidad.



Figura A2.3. 20.18 µm de desgaste | Corrida 3 de desbaste en placa cavidad.



Figura A2.5. 182.83 µm de desgaste | Corrida 5 de desbaste en placa cavidad.



Figura A2.7. 47.03 µm de desgaste | Corrida 7 de desbaste en placa cavidad.



Figura A2.4. 56.73 µm de desgaste | Corrida 4 de desbaste en placa cavidad.



Figura A2.6. 37.83 µm de desgaste | Corrida 6 de desbaste en placa cavidad.



Figura A2.8. 89.47 µm de desgaste | Corrida 8 de desbaste en placa cavidad.



Figura A2.9. 161.1 µm de desgaste | Corrida 9 de desbaste en placa cavidad.

Anexo A3. Herramientas de semi-acabado en placa corazón



Figura A3.1. 52.63 µm de desgaste | Corrida 1 de semi-acabado en placa corazón.



Figura A3.3. 41.76 µm de desgaste | Corrida 3 de semi-acabado en placa corazón.



Figura A3.2. 26.98 µm de desgaste | Corrida 2 de semi-acabado en placa corazón.



Figura A3.4. 22.27 µm de desgaste | Corrida 4 de semi-acabado en placa corazón.



Figura A3.5. 16.93 µm de desgaste | Corrida 5 de semi-acabado en placa corazón.



Figura A3.7. 21.33 µm de desgaste | Corrida 7 de semi-acabado en placa corazón.



Figura A3.9. 19.16 µm de desgaste | Corrida 9 de semi-acabado en placa corazón.



Figura A3.6. 15.13 µm de desgaste | Corrida 6 de semi-acabado en placa corazón.



Figura A3.8. 7.34 µm de desgaste | Corrida 8 de semi-acabado en placa corazón.

Anexo A4. Herramientas de semi-acabado en placa cavidad



Figura A4.1. 11.16 µm de desgaste | Corrida 1 de semi-acabado en placa cavidad.



Figura A4.3. 508.27 μm de desgaste | Corrida 3 de semi-acabado en placa cavidad.



Figura A4.5. 41.66 μm de desgaste | Corrida 5 de semi-acabado en placa cavidad.



Figura A4.2. 7.34 µm de desgaste | Corrida 2 de semi-acabado en placa cavidad.



Figura A4.4. 16.93 µm de desgaste | Corrida 4 de semi-acabado en placa cavidad.



Figura A4.6. 5.57 µm de desgaste | Corrida 6 de semi-acabado en placa cavidad.



Figura A4.7. 8.8 µm de desgaste | Corrida 7 de semi-acabado en placa cavidad.



Figura A4.8. 31.32 μm de desgaste | Corrida 8 de semi-acabado en placa cavidad.



Figura A4.9. 9.17 µm de desgaste | Corrida 9 de semi-acabado en placa cavidad.

Anexo A5. Herramientas de acabado (Contour area) en placa corazón



Figura A5.1. 15.08 µm de desgaste | Corrida 1 de acabado (Contour area) en placa corazón.



Figura A5.2. 19.21 μm de desgaste | Corrida 2 de acabado (Contour area) en placa corazón.



Figura A5.3. 9.88 µm de desgaste | Corrida 3 de acabado (Contour area) en placa corazón.



Figura A5.5. 13.36 µm de desgaste | Corrida 5 de acabado (Contour area) en placa corazón.



Figura A5.7. 10.7 µm de desgaste | Corrida 7 de acabado (Contour area) en placa corazón.



Figura A5.4. 14.79 µm de desgaste | Corrida 4 de acabado (Contour area) en placa corazón.



Figura A5.6. 20.92 µm de desgaste | Corrida 6 de acabado (Contour area) en placa corazón.



Figura A5.8. 17.31 µm de desgaste | Corrida 8 de acabado (Contour area) en placa corazón.



Figura A5.9. 9.36 µm de desgaste | Corrida 9 de acabado (Contour area) en placa corazón.

Anexo A6. Herramientas de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón



Figura A6.1. 3.67 µm de desgaste | Corrida 1 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón.



Figura A6.3. 4.1 µm de desgaste | Corrida 3 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón



Figura A6.2. 8.21 µm de desgaste | Corrida 2 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón.



Figura A6.4. 5.8 µm de desgaste | Corrida 4 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón.



Figura A6.5. 6.62 µm de desgaste | Corrida 5 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón.



Figura A6.7. 14.79 µm de desgaste | Corrida 7 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón.



Figura A6.9. 4.1 µm de desgaste | Corrida 9 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón.



Figura A6.6. 32.82 µm de desgaste | Corrida 6 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón.



Figura A6.8. 10.38 µm de desgaste | Corrida 8 de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón.

Anexo B. Cálculos de RPM y Feed rate para establecer niveles

Tabla 33. B1. Cálculo de RPM para los niveles de los parámetros de corte de la operación desbaste.

$$RPMS = \frac{Vc(m/min) * 1000}{\pi * \emptyset \, de \, cortador(fresa)}$$

$$1 SFM = 0.3048 \\ \therefore \\ 200 SFM \approx 61 \frac{m}{min} \\ RPMS = \frac{61 (m/min) * 1000}{3.14159265 * 12.7mm} \\ RPMS = \frac{61 (m/min) * 1000}{3.14159265 * 12.7mm} \\ RPMS \approx 3058 \\ RPMS \approx 4587$$

Tabla 34. B2. Cálculo de RPM para los niveles de los parámetros de corte de la operación semi-acabado.

$$RPMS = \frac{Vc(m/_{min}) * 1000}{\pi * \emptyset \ de \ cortador(fresa)}$$

$$1 \ SFM = 0.3048 \\ \therefore \\ 99 \ SFM \approx 30 \frac{m}{min} \\ RPMS = \frac{30 \ (m/_{min}) * 1000}{3.14159265 * 6.35mm} \qquad \begin{vmatrix} 1 \ SFM = 0.3048 \\ \vdots \\ 132 \ SFM \approx 40 \frac{m}{min} \\ RPMS = \frac{40 \ (m/_{min}) * 1000}{3.14159265 * 6.35mm} \\ RPMS = \frac{40 \ (m/_{min}) * 1000}{3.14159265 * 6.35mm} \\ RPMS \approx 2005 \\ RPMS \approx 2506 \end{aligned}$$



Tabla 35. B3. Cálculo de RPM para los niveles de los parámetros de corte de la operación acabado (Contour area).

Tabla 36. B4. Cálculo de RPM para los niveles de los parámetros de corte de la operación acabado (Flowcut ref tool).

$$RPMS = \frac{Vc(m/min) * 1000}{\pi * \emptyset \ de \ cortador(fresa)}$$

$$1 \ SFM = 0.3048 \qquad \therefore \\ 17 \ SFM \approx 5 \frac{m}{min} \\ RPMS = \frac{5(m/min) * 1000}{3.14159265 * 1.587mm} \begin{vmatrix} 1 \ SFM = 0.3048 \\ \vdots \\ 25 \ SFM \approx 7.5 \frac{m}{min} \\ RPMS = \frac{7.5(m/min) * 1000}{3.14159265 * 1.587mm} \\ RPMS = \frac{7.5(m/min) * 1000}{3.14159265 * 1.587mm} \\ RPMS \approx 1003 \\ RPMS \approx 1504 \\ RPMS \approx 2005 \end{vmatrix}$$

Tabla 37. B5. Cálculo de Feed rate para los niveles de los parámetros de corte de la operación desbaste.

Recomendación del fabricante:	
fz = [0.0005 - 0]	.0020] in/diente
fz = [0.0127 - 0.00127 - 0.0	0508]mm/diente
Vf = RPM * Zn * fz Vf = 1529 * 4 * 0.0127 $Vf \approx 78 mm/min$	Vf = RPM * Zn * fz Vf = 1529 * 4 * 0.03175 $Vf \approx 194 mm/min$
Vf = RPM * Zn * fz Vf = 1529 * 4 * 0.05080 $Vf \approx 311 mm/min$	$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 3058 * 4 * 0.0127$ $Vf \approx 155 mm/min$
$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 3058 * 4 * 0.03175$ $Vf \approx 388 mm/min$	$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 3058 * 4 * 0.05080$ $Vf \approx 621 mm/min$
$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 4587 * 4 * 0.0127$ $Vf \approx 233 mm/min$	$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 4587 * 4 * 0.03175$ $Vf \approx 582 mm/min$
$Vf = RPN$ $Vf = 4587 \times$ $Vf \approx 932$	M * Zn * fz * 4 * 0.05080 mm/min

Tabla 38. B6. Cálculo de Feed rate para los niveles de los parámetros de corte de la operación semi-acabado.

A partir de la recomendación del fabricante y por exp	periencia:
fz = [0.00196 - 0]).00393] in/diente
fz = [0.05 - 0]	∴ .1]mm/diente
Vf = RPM * Zn * fz	Vf = RPM * Zn * fz
Vf = 1504 * 4 * 0.05	Vf = 1504 * 4 * 0.075
$Vf \approx 300.8 mm/min$	$Vf \approx 451.2 mm/min$
Vf = RPM * Zn * fz	Vf = RPM * Zn * fz
Vf = 1504 * 4 * 0.1	Vf = 2005 * 4 * 0.075
$Vf \approx 601.6 mm/min$	$Vf \approx 601.5 mm/min$
$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 2005 * 4 * 0.1$ $Vf \approx 802 mm/min$	$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 2005 * 4 * 0.05$ $Vf \approx 401 mm/min$
Vf = RPM * Zn * fz	Vf = RPM * Zn * fz
Vf = 2506 * 4 * 0.1	Vf = 2506 * 4 * 0.05
$Vf \approx 1002.4 mm/min$	$Vf \approx 501.2 mm/min$
Vf = RPN	<i>M</i> * Zn * fz
Vf = 2506	5 * 4 * 0.075
$Vf \approx 751.5$	8 mm/min

Tabla 39. B7. Cálculo de Feed rate para los niveles de los parámetros de corte de la operación acabado (Contour area).

A partir de la recomendación del fabricante y por exp	periencia:
fz = [0.00200 - 0]	0.00267] in/diente
fz = [0.051 - 0.	∴ 068] <i>mm/diente</i>
Vf = RPM * Zn * fz Vf = 1504 * 4 * 0.051 $Vf \approx 306.8 mm/min$	Vf = RPM * Zn * fz Vf = 1504 * 4 * 0.059 $Vf \approx 354.9 mm/min$
Vf = RPM * Zn * fz Vf = 1504 * 4 * 0.068 $Vf \approx 409 mm/min$	$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 2005 * 4 * 0.051$ $Vf \approx 409 mm/min$
$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 2005 * 4 * 0.059$ $Vf \approx 473 mm/min$	Vf = RPM * Zn * fz Vf = 2005 * 4 * 0.068 $Vf \approx 545.3 mm/min$
$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 2506 * 4 * 0.051$ $Vf \approx 511.2 mm/min$	Vf = RPM * Zn * fz Vf = 2506 * 4 * 0.059 $Vf \approx 591.4 mm/min$
Vf = RPI Vf = 2506 $Vf \approx 681.$	M * Zn * fz 5 * 4 * 0.068 6 mm/min

Tabla 40. B8. Cálculo de Feed rate para los niveles de los parámetros de corte de la operación acabado (Flowcut ref tool).

A partir de la recomendación del fabricante y por exp	periencia:
fz = [0.00114 - 0]	0.00133] in/diente
fz = [0.029 - 0.029	∴ 034] <i>mm/diente</i>
Vf = RPM * Zn * fz	Vf = RPM * Zn * fz
Vf = 1003 * 4 * 0.029	Vf = 1003 * 4 * 0.032
$Vf \approx 116.3 mm/min$	$Vf \approx 128.3 mm/min$
Vf = RPM * Zn * fz	Vf = RPM * Zn * fz
Vf = 1003 * 4 * 0.034	Vf = 1504 * 4 * 0.029
$Vf \approx 136.4 mm/min$	$Vf \approx 174.4 mm/min$
Vf = RPM * Zn * fz	Vf = RPM * Zn * fz
Vf = 1504 * 4 * 0.032	Vf = 1504 * 4 * 0.034
$Vf \approx 192.5 mm/min$	$Vf \approx 204.5 mm/min$
$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 2005 * 4 * 0.029$ $Vf \approx 232.5 mm/min$	$Vf = RPM * Zn * fz$ $Vf = 2005 * 4 * 0.032$ $Vf \approx 256.6 mm/min$
Vf = RPI	M * Zn * fz
Vf = 2005	5 * 4 * 0.034
$Vf \approx 272.$	6 mm/min

Anexo C. Análisis de varianza (ANOVA) para medias y S/N

Anexo C1. Respuestas de desbaste en placa corazón

Tabla 41. C1.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa corazón en desbaste.

Linear Mod	el Analys	sis: Means	versus A	., B, C		Linear M	odel Anal	ysis: SN	ratios	versus A	A, B, C
Estimated N	Model Co	efficients f	or Mean	18		Estimated	d Model (Coefficie	ents for	SN ratio	08
Term	Coef	SE Coef	Т	Р		Term	С	oef SE	Coef	Т	Р
Constant	1619.2	323.3	5.008	0.038		Consta	nt -62.5	161 0.	.7813	-80.016	0.000
A 1	900.6	457.2	1.970	0.188		A 1	-3.63	327 1.	1049	-3.288	0.081
A 2	-553.7	457.2	-1.211	0.350		A 2	2.03	540 1.	.1049	1.859	0.204
B 1	1134.6	457.2	2.481	0.131		B 1	-4.8	155 1.	1049	-4.358	0.049
B 2	-376.8	457.2	-0.824	0.496		B 2	0.73	375 1.	1049	0.667	0.573
C 1	660.8	457.2	1.445	0.285		C 1	-1.82	250 1.	1049	-1.652	0.240
C 2	-514.4	457.2	-1.125	0.377		C 2	2.25	523 1.	.1049	2.038	0.178
Model Sum	mary					Model Su	mmary				
S	R-Sa F	R-Sq(adi)				S	R-Sa R	-Sa(adi))		
969.9511	86.34%	45.36%				2.3439	94.95%	79.80%	<u>,</u> D		
Analysis of	Variance					Analysis o	of Varianc	e for SN	I ratios	i	
					F- P-	Source	DF	Seq SS	Adj S	S Adj M	S F P
Source D	F Seq	SS Contrib	ution A	dj SS Adj MS	Value Value	А	2	59.72	59.72	2 29.86	5.44 0.155
А	2 37140	21 26	5.96% 37	14021 1857011	1.97 0.336	В	2	121.09	121.0	9 60.54	4 11.02 0.083
В	2 60102	48 43	3.63% 6 0	10248 3005124	3.19 0.238	С	2	25.76	25.7	6 12.87	9 2.34 0.299
С	2 21684	-08 15	5.74% 21	68408 1084204	1.15 0.465	Residua	al 2	10.99	10.9	9 5.49	4
Error	2 18816	10 13	3.66% 18	81610 940805		Error					
Total	8 137742	.88 100	0.00%			Total	8	217.56			
Response T	able for l	Means				Response	Table for	r Signal	to Noi	se Ratio	s
Level	A	B C				Smaller is	better				
1 251	19.8 2753.	.8 2280.0				Level	Α	В	C		
2 100	65.5 1242	.4 1104.8				1	-66.15	-67.33	-64.34		
3 127	72.3 861.	.5 1472.8				2	-60.46	-61.78	-60.26		
Delta 145	54.3 1892.	.3 1175.3				3	-60.94	-58.44	-62.94		
Rank	2	1 3				Delta	5.69	8.89	4.08		
						Rank	2	1	3		

Tabla 42. C1.2. Análisis de varianza para medias y S/N de tiempo de maquinado para placa corazón en desbaste.

inear Mode	el Analys	is: Means v	versus A	, B, C		Linear Mod	el Analysis	: SN ratio	s versus A	A, B, C
stimated M	lodel Co	efficients f	or Mean	s		Estimated M	Aodel Coef	ficients fo	or SN ratio	os
Term	Coef	SE Coef	Т	Р		Term	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	13704	2826	4.849	0.040		Constant	-80.2349	0.1131	-709.631	0.000
A 1	9671	3997	2.420	0.137		A 1	-5.0594	0.1599	-31.641	0.001
A 2	-3578	3997	-0.895	0.465		A 2	0.9400	0.1599	5.879	0.028
B 1	11855	3997	2.966	0.097		B 1	-6.5198	0.1599	-40.774	0.001
B 2	-4514	3997	-1.130	0.376		B 2	1.3840	0.1599	8.656	0.013
C 1	5991	3997	1.499	0.273		C 1	-1.3783	0.1599	-8.620	0.013
C 2	-2837	3997	-0.710	0.551		C 2	1.4207	0.1599	8.885	0.012
Iodel Sumr	nary					Model Sum	mary			
S	R-Sq	R-Sq(adj)				<u>S</u>]	<u>R-Sq R-Sq</u>	<u>(adj)</u>		
nalysis of V	ariance					Analysis of	Variance fo	or SN ratio	08	
	-				F- P-				Adj	-
Source D	$\frac{\mathbf{F}}{2}$ $\frac{\mathbf{S}}{4202}$	eq SS Cor	tribu	Adj SS Adj N	AS Value Value	Source I	DF Seq SS	Adj 88	<u>MS</u>	F
A D	2 45050	04922 31 (952 4)	1.18%0 43 ((00/ (4	0364922 2151824 4416952 20004	61 2.99 0.250	A	2 130.352	130.352	05.1/0 500	3.480.00
D	2 04441	.0855 40 2220 11).09%004 ⊨710/_17	4410855 5222084	4.48 0.182	Б	2 212.398	212.398 1	E 000 E	5.05 0.00 1 10 0 01
Eanon	2 10100	2210 1(1./17010 1./20/14	2762210 719916	94 1.12 0.4/1 00	Bosidual	2 11.700	0.220	0.115	1.10 0.01
Total	8 138022	98382 100).427014	5/05219 /18810	09	Error	2 0.230	0.230	0.115	
Total	0 130022	.0502 100	.0070			Total	8 354.739			
esponse T	able for M	Means				Response T	able for Sig	gnal to No	oise Ratio	s
						Smaller is be	tter			
Level	A B	<u>C</u>				Level	Α	В	С	
1 233	0/5 25559	19695				1 -	-85.29 -86	.75 -81.0	51	
2 101	26 9189	10867				2 -	79.29 -78	.85 -78.8	81	
5 76 Dalta 157	011 6363	10549				3 -	76.12 -75	.10 -80.2	28	
Delta 15/	04 19196	9140				Delta	9.18 11	.66 2.8	30	
Kank	2 1	3				Rank	2	1	3	

Tabla 43. C1.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa corazón en desbaste.

Estimated N	Iodel Coef	ficients fo	or Mear	18		Estimated	Model C	oefficier	its for SN	N ratios	
Term	Coef S	E Coef	Т	Р		Term	Coef	SE Co	f ,	Г Б	
Constant	74.54	19.13	3.895	0.060		Constant	-32.353	3.23	1 -10.01	3 0.010)
A 1	-33.87	27.06 -	-1.251	0.337		A 1	3.615	4.57	0 0.79	0.512	2
A 2	23.59	27.06	0.872	0.475		A 2	-1.149	4.57	0 -0.25	0.825	5
B 1	12.13	27.06	0.448	0.698		B 1	2.894	4.57	0 0.63	3 0.591	[
B 2	-27.90	27.06 -	-1.031	0.411		B 2	1.765	4.57	0 0.38	6 0.737	7
C 1	-37.56	27.06 -	-1.388	0.300		C 1	3.949	4.57	0 0.86	0.479)
C 2	90.03	27.06	3.327	0.080		C 2	-11.036	4.57	-2.41	5 0.137	7
Aodel Sumr	nary					Model Sum	mary				
S	R-Sq R-S	q(adj)				S	R-Sa R-	-Sq(adi)			
57,4047.87	7 41% 4	<u>1()</u>					1 - 4	- 1(***))			
		9.64%				9.6935 79).39%	17.55%			
		9.64%				9.6935 79	0.39%	17.55%			
Analysis of V	Variance	9.64%	۸d	; Adi	E D	9.6935 79 Analysis of	Variance	17.55% e for SN	ratios		F D
Analysis of V	Variance Seq F SS Co	9.64%	Ad	j Adj	F- P- Value Value	9.6935 79 Analysis of Source	0.39% Variance DF 2	17.55% e for SN Seq SS 61 43	ratios Adj SS 4	Adj MS	<u>F</u>P 0 33 0 754
Analysis of V Source D	Variance Seq F SS Co 2 5427	9.64% ontributio 10.37%	Ad n SS % 5427	j Adj 5 MS 7 2714	F- P- Value Value 0.82 0.548	9.6935 79 Analysis of Source A B	0.39% Variance <u>DF</u> 2 2	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99 58	ratios Adj SS 4 61.43 99.58	Adj MS 30.71 (49 79 (FP 0.33 0.754
Analysis of V Source D A B	Variance Seq F SS Co 2 5427 2 3521	9.64% ontributio: 10.37% 6.73%	Ad <u>n SS</u> % 5427 % 3521	j Adj 5 MS 7 7 2714 1761	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652	9.6935 79 Analysis of Source A B C	Variance DF 2 2 2	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42)	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2 99 0 250
Analysis of V Source D A B C	Variance Seq F SS Co 2 5427 2 3521 2 36806	ontribution 10.37% 6.73% 70.31%	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36806	j Adj 5 MS 7 7 2714 1 1761 5 18403	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual	Variance DF 2 2 2 2 2 2	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 2 93.96	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V Source D A B C Error	Variance Seq F SS Co 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591	ontribution 10.37% 6.73% 70.31% 12.59%	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591	j Adj 5 MS 7 2714 1 1761 5 18403 1 3295	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual Error	Variance DF 2 2 2 2 2 2	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 2 93.96	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V <u>Source D</u> A B C Error Total	Variance Seq F SS Cc 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591 8 52345	ontribution 10.37% 6.73% 70.31% 12.59% 100.00%	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591	j Adj 3 MS 7 2714 1 1761 5 18403 1 3295	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual Error Total	Variance DF 2 2 2 2 2 8	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93 911.77	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 : 93.96	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V Source D A B C Error Total Response T	Variance Seq F SS Co 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591 8 52345 able for M	ontribution 10.37% 6.73% 70.31% 12.59% 100.00% eans	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591	j Adj MS 7 2714 1 1761 5 18403 1 3295	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of <u>Source</u> A B C Residual Error Total Response 7	Variance DF 2 2 2 2 8 5 6	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93 911.77 Signal t	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93 o Noise	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 2 93.96 Ratios	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V Source Di A B C Error Total Response Ta Level	Variance Seq F SS Co 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591 8 52345 able for Ma A B	ontributio 10.37% 6.73% 70.31% 12.59% 100.00% eans C	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591 %	j Adj MS 7 2714 1 761 5 18403 1 3295	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bu	Variance DF 2 2 2 2 8 5 6 6 7 8 6 7 8 7 8	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93 911.77 Signal t	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93 o Noise	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 : 93.96 Ratios	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V Source D A B C Error Total Response T Level 1 40.0	Variance Seq F SS Co 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591 8 52345 able for Mo A B 67 86.67 3	ontributio 10.37% 6.73% 70.31% 12.59% 100.00% cans <u>C</u> 6.98	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591 %	j Adj 5 MS 7 2714 1 761 5 18403 1 3295	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual Error Total Response 7 Smaller is ba	Variance DF 2 2 2 2 8 Fable for etter	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93 911.77 Signal t	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93 o Noise	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 2 93.96 Ratios	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V <u>Source D</u> A B C Error Total Response T <u>Level</u> 1 40.4 2 98.	Variance Seq F SS Co 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591 8 52345 able for Mo A B 67 86.67 3 13 46.64 16	eans <u>C</u> <u>C</u> <u>6.73</u> <u>C</u> <u>C</u> <u>6.98</u> <u>4.57</u>	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591 %	j Adj 5 MS 7 2714 1 761 5 18403 1 3295	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual Error Total Response 7 Smaller is ba Level 1	Variance DF 2 2 2 2 8 Fable for etter A -28 74	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93 911.77 Signal t B 29.46	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93 o Noise C -28.40	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 2 93.96 Ratios	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V <u>Source D</u> A B C Error Total Response T: <u>Level</u> 1 40. 2 98. 3 84.	Variance Seq F SS Cc 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591 8 52345 able for Me A B 67 86.67 3 13 46.64 16 81 90.30 2	eans C 6.73 10.379 6.739 70.319 12.599 100.009 cans <u>C</u> 6.98 4.57 2.07	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591 %	j Adj 5 MS 7 2714 1 1761 5 18403 1 3295	F- P- 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual Error Total Response 7 Smaller is be Level 1 2	Variance DF 2 2 2 2 8 Cable for etter A -28.74 -33.50	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93 911.77 Signal t B -29.46 -30.59	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93 o Noise C -28.40 -43.39	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 2 93.96 Ratios	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V Analysis of V A B C Error Total Response T: <u>Level</u> 1 40. 2 98. 3 84. Delta 57.4	Variance Seq F SS Ca 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591 8 52345 able for Ma A B 67 86.67 3 13 46.64 16 81 90.30 2 46 43.66 14	eans C 6.73 6.73 70.31 12.59 100.00 cans C 6.98 4.57 2.07 2.50	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591 %	j Adj 5 MS 7 2714 1 1761 5 18403 1 3295	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual Error Total Response 7 Smaller is be Level 1 2 3	Variance DF 2 2 2 2 8 Fable for etter A -28.74 -33.50 -34.82	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93 911.77 Signal t B -29.46 -30.59 -37.01	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93 o Noise C -28.40 -43.39 -25.27	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 2 93.96 Ratios	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V Analysis of V A B C Error Total Response Ta Level 1 40.4 2 98.3 3 84.3 Delta 57.4 Rank	Variance Seq F SS Co 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591 8 52345 able for Mo A B 67 86.67 3 13 46.64 16 81 90.30 2 46 43.66 14 2 3	eans C 6.73 6.73 70.319 12.599 100.009 eans C 6.98 4.57 2.07 2.50 1	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591 %	j Adj 5 MS 7 2714 1 1761 5 18403 1 3295	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual Error Total Response 7 Smaller is bo Level 1 2 3 Delta	Variance DF 2 2 2 2 8 Fable for etter A -28.74 -33.50 -34.82 6 08	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93 911.77 Signal t B -29.46 -30.59 -37.01 7 55	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93 o Noise C -28.40 -43.39 -25.27 18.12	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 2 93.96 Ratios	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250
Analysis of V Analysis of V A B C Error Total Response Ta Level 1 40.4 2 98.3 3 84.3 Delta 57.4 Rank	Variance Seq F SS Cc 2 5427 2 3521 2 36806 2 6591 8 52345 able for Ma A B 67 86.67 3 13 46.64 16 81 90.30 2 46 43.66 14 2 3	<u>eans</u> <u>C</u> <u>C</u> <u>2.50</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u> <u>10.37%</u>	Ad n SS % 5427 % 3521 % 36800 % 6591 %	j Adj 5 MS 7 2714 1 1761 5 18403 1 3295	F- P- Value Value 0.82 0.548 0.53 0.652 5.58 0.152	9.6935 79 Analysis of Source A B C Residual Error Total Response 7 Smaller is be Level 1 2 3 Delta Rank	Variance DF 2 2 2 2 8 Fable for etter A -28.74 -33.50 -34.82 6.08 3	17.55% e for SN Seq SS 61.43 99.58 562.83 187.93 911.77 Signal t <u>B</u> -29.46 -30.59 -37.01 7.55 2	ratios Adj SS 4 61.43 99.58 562.83 187.93 o Noise C -28.40 -43.39 -25.27 18.12 1	Adj MS 30.71 (49.79 (281.42 2 93.96 Ratios	F P 0.33 0.754 0.53 0.654 2.99 0.250

Anexo C2. Respuestas de desbaste en placa cavidad

Tabla 44. C2.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa cavidad en desbaste.

Linear Mode	el Analysi	s: Means ve	ersus A, I	8, C		Linear Mode	el Analysis:	SN ratios	versus A, I	B, C
Estimated M	Iodel Coe	fficients fo	r Means			Estimated N	Iodel Coeff	icients for	SN ratios	
Term	Coef	SE Coef	Т	Р		Term	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	753.17	50.02	15.056	0.004		Constant	-56.4517	0.3579	-157.745	0.000
A 1	92.61	70.75	1.309	0.321		A 1	-0.6178	0.5061	-1.221	0.347
A 2	-165.01	70.75	-2.333	0.145		A 2	1.7010	0.5061	3.361	0.078
B 1	514.03	70.75	7.266	0.018		B 1	-5.4085	0.5061	-10.687	0.009
B 2	-203.33	70.75	-2.874	0.103		B 2	1.8356	0.5061	3.627	0.068
C 1	125.68	70.75	1.776	0.218		C 1	-1.2003	0.5061	-2.372	0.141
C 2	-80.80	70.75	-1.142	0.372		C 2	0.2032	0.5061	0.402	0.727
Model Sumr	nary					Model Sumr	mary			
S	R-Sa R-	Sa(adi)				S F	R-Sa R-Sa(adi)		
150.0729)6.89%	87.55%				$\frac{0}{1.0736.98}$	55% 94.	21%		
Analysis of V	Variance					Analysis of V	Variance for	SN ratios		
				A	dj F- P-	Source	DF Seq	SS Adj SS	Adj MS	F P
Source D	F Seq SS	Contributi	on Adj	SS M	S Value Value	А	2 13.	345 13.345	6.673	5.79 0.147
А	2 123147	8.5	1% 1231	47 6157	2.73 0.268	В	2 136.	159 136.159	68.079	59.07 0.017
В	2 1206301	83.34	4% 12063	01 60315	50 26.78 0.036	С	2 7.	428 7.428	3.714	3.22 0.237
С	2 73010	5.04	4% 730	10 3650	05 1.62 0.382	Residual	2 2.	305 2.305	1.153	
Error	2 45044	3.1	1% 450	44 2252	22	Error				
Total	8 1447502	100.00)%			Total	8 159.	237		
Paspapa T	abla far M	loono				Posponso T	able for Sig	nal to Nois	o Pation	
Le el		C					able for org		c Ratios	
	A B	<u> </u>				Smaller 1s bet	tter			
1 845	120/.2	0/0.0 (70.4				Level	Α	B (2	
2 588	0.2 049.80	0/2.4 709.2				1	-57.07 -61	.86 -57.6	5	
5 825 Dalta 257	442.5	/U8.3 207 5				2	-54.75 -54	-56.2	5	
Deita 25/	0 824./2	200.5				3	-57.53 -52	2.88 -55.4	5	
Kank	∠ I	3				Delta	2.78 8	3.98 2.20)	
						Rank	2	1 3	3	
						1				

Tabla 45. C2.2. Análisis de varianza para medias y S/N de tiempo de maquinado para placa cavidad en desbaste.

	el Analysis:	Means ver	rsus A, F	3, C		Linear Mode	el Analysis:	SN ratios	versus A,	В, С
Estimated M	Iodel Coef	ficients for	Means			Estimated M	Iodel Coef	ficients for	SN ratio	6
Term	Coef	SE Coef	Т	Р		Term	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	4465.11	812.1	5.498	0.032		Constant	-70.5174	0.4316	-163.379	0.000
A 1	3204.89	1148.5	2.790	0.108		A 1	-5.5654	0.6104	-9.118	0.012
A 2	-727.44	1148.5	-0.633	0.591		A 2	0.3942	0.6104	0.646	0.585
B 1	3485.89	1148.5	3.035	0.094		B 1	-5.7568	0.6104	-9.431	0.011
B 2	-1132.78	1148.5	-0.986	0.428		B 2	0.8546	0.6104	1.400	0.296
C 1	1545.89	1148.5	1.346	0.311		C 1	-0.8198	0.6104	-1.343	0.311
C 2	-84.78	1148.5	-0.074	0.948		C 2	-0.1810	0.6104	-0.297	0.795
Model Sum	nary					Model Sumr	nary			
<u>S</u>	R-Sq R-	Sq(adj)				<u> </u>	R-Sq R-Sq	(adj)		
2436.3919	91.09%	64.35%				1.2949 99.	06% 96.	23%		
Analysis of V	Variance				F- P-	Analysis of V	Variance fo	r SN ratios	; ;	
0 0				1.00 1.1.10	1- 1- X7 1 X7 1	0	DEC		Adj	г г
Source D	F Seq S	S Contribu	tion A	dj SS Adj MS	Value Value	Source	DF Seq	SS Adj SS	MS	F F
Source D	F Seq S 2 5081465 2 5001521	S Contribu 8 38.	tion A	Adj SS Adj MS 14658 25407329	Value Value 4.28 0.189 4.70 0.172	Source A	DF Seq 9	SS Adj SS 09 173.609	MS 86.805 5	FF 1.77 0.019
Source D	F Seq S 2 5081465 2 5691521 2 1250541	S Contribu 8 38.7 6 42.7	tion A 15% 508 73% 569	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B	DF Seq 9 2 173.6 2 173.7 2 173.7	58 Adj S8 09 173.609 06 173.706	MS 86.805 5 86.853 5	F I 1.77 0.019 1.80 0.019
Source D A B C	F Seq S 2 5081465 2 5691521 2 1359541 2 1187201	S Contribut 8 38.7 6 42.7 6 10.2 1 86	tion A 15% 508 73% 569 21% 135	Adj SSAdj MS14658254073291521628457608954166797708720115036005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Posidual	DF Seq 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3 3	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353	MS 86.805 5 86.853 5 2.560	F I 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error	F Seq S 2 5081465 2 5691521 2 1359541 2 1187201 8 12210720	S Contribut 8 38.7 6 42.7 6 10.2 1 8.9 1 10.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118	Adj SSAdj MS14658254073291521628457608954166797708720115936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual	DF Seq 9 2 173.60 2 173.70 2 5.1 2 3.3	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353	Adj MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677	F I 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total	F Seq St 2 5081465 2 5691521 2 1359541 2 1187201 8 13319730	S Contribut 8 38.7 6 42.7 6 10.2 1 8.9 1 100.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SSAdj MS14658254073291521628457608954166797708720115936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	A B C Residual Error Total	DF Seq 9 2 173.60 2 173.70 2 5.1 2 3.3 8 355.77	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677	F F 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total	F Seq S 2 5081465 2 5691521 2 1359541 2 1187201 8 13319730	S Contribut 8 38. 6 42. 6 10.2 1 8.9 1 100.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608 95416 6797708 72011 5936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual Error Total	DF Seq 3 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3.3 8 355.7	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677	F H 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total	F Seq Si 2 5081465 2 5691521 2 1359541 2 1187201 8 13319730	S Contribut 8 38.° 6 42.° 6 10.° 1 8.° 1 100.°	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608 95416 6797708 72011 5936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual Error Total Response Ta	DF Seq 3 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3.3 8 355.7 able for Sig	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677 se Ratios	F F 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total Response T Level	F Seq S 2 5081465 2 5081465 2 5691521 2 1359541 2 1187201 8 13319730	S Contribut 8 38.° 6 42.° 6 10.° 1 8.° 1 100.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608 95416 6797708 72011 5936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet	DF Seq 3 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3.3 8 355.7 able for Sig	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88 mal to Noi	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677 se Ratios	F I 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total Response T <u>Level</u> 1 767	F Seq S 2 5081465 2 5081465 2 5691521 2 1359541 2 1187201 8 13319730	S Contribut 8 38.° 6 42.° 6 10.° 1 8.° 1 100.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608 95416 6797708 72011 5936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet Level	DF Seq 3 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3.3 8 355.7 able for Sig	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88 nal to Noi B	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677 se Ratios	F I 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total Response T <u>Level</u> 1 767 2 373	F Seq S 2 5081465 2 5081465 2 5091521 2 1359541 2 1187201 8 13319730	S Contribut 8 38.° 6 42.° 6 10.° 1 8.° 1 100.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608 95416 6797708 72011 5936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual Error Total Response Ta Smaller is bet Level 1	DF Seq 3 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3.3 8 355.7 able for Sig tter A 76.08 -7	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88 mal to Noi B 6.27 -71.3	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677 se Ratios	F I 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total Response T <u>Level</u> 1 767 2 373 3 198	F Seq S 2 5081465 2 5081465 2 5091521 2 1359541 2 1187201 8 13319730	S Contribut 8 38.° 6 42.° 6 10.° 1 8.° 1 100.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608 95416 6797708 72011 5936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual Error Total Response Ta Smaller is bet Level 1 - 2	DF Seq 3 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3.3 8 355.7 able for Sig tter A 76.08 -7 70.12 -6	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88 mal to Noi B 5.27 -71.3 9.66 -70.7	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677 se Ratios	F I 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total Response T <u>Level</u> 1 767 2 373 3 198 Delta 568	F Seq S 2 5081465 2 5081465 2 5091521 2 1359541 2 13319730 able for Met A B C 70 7951<601	S Contribut 8 38.° 6 42.° 6 10.° 1 8.° 1 100.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608 95416 6797708 72011 5936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual Error Total Response Ta Smaller is bet Level 1 - 2 - 3 -	DF Seq 3 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3.3. 8 355.7 able for Sig tter A 76.08 -7 70.12 -6 65.35 -6.	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677 se Ratios	F I 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total Response T <u>Level</u> 1 767 2 373 3 198 Delta 568 Rank	F Seq S: 2 5081465 2 5081465 2 5091521 2 1359541 2 13319730 able for Met A B C 70 7951<601	S Contribut 8 38.° 6 42.° 6 10.° 1 8.° 1 100.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608 95416 6797708 72011 5936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual Error Total Response Ta Smaller is bet Level 1 - 2 - 3 - Delta	DF Seq 3 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3.3. 8 355.7 able for Sig tter A 76.08 -7 70.12 -6 65.35 -6. 10.74 10	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677 se Ratios	F I 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Source D A B C Error Total Response T <u>Level</u> 1 767 2 373 3 198 Delta 568 Rank	F Seq S: 2 5081465 2 5081465 2 5091521 2 1359541 2 13319730 able for Met 4 A B C 70 7951<601	S Contribut 8 38.° 6 42.° 6 10.° 1 8.° 1 100.0	tion A 15% 508 73% 569 21% 135 91% 118 00%	Adj SS Adj MS 14658 25407329 15216 28457608 95416 6797708 72011 5936005	Value Value 4.28 0.189 4.79 0.173 1.15 0.466	Source A B C Residual Error Total Response Ta Smaller is bet Level 1 - 2 - 3 - Delta Rank	DF Seq 3 2 173.6 2 173.7 2 5.1 2 3.3. 8 355.7 able for Sig tter A 76.08 -7 70.12 -6 65.35 -6. 10.74 10 1	SS Adj SS 09 173.609 06 173.706 19 5.119 53 3.353 88	MS 86.805 5 86.853 5 2.560 1.677 se Ratios C 32 32 3	F I 1.77 0.019 1.80 0.019 1.53 0.390
Term									0.1	
---	--	---	-----------------------------------	---------------------------	--	--	---	--	--	--
Term	Iodel Co	efficients f	or Mean	s		Estimated M	lodel Coe	efficients fo	or SN ratio	08
	Coef	SE Coef	Т	Р		Term	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	70.42	23.55	2.990	0.096		Constant	-33.354	0.8976	-37.160	0.001
A 1	-50.82	33.30	-1.526	0.267		A 1	9.457	1.2694	7.451	0.018
A 2	22.04	33.30	0.662	0.576		A 2	-3.937	1.2694	-3.102	0.090
B 1	-33.90	33.30	-1.018	0.416		B 1	5.423	1.2694	4.272	0.051
B 2	31.29	33.30	0.939	0.447		B 2	-4.845	1.2694	-3.817	0.062
C 1	-26.05	33.30	-0.782	0.516		C 1	4.734	1.2694	3.730	0.065
C 2	13.13	33.30	0.394	0.731		C 2	-3.160	1.2694	-2.489	0.131
odel Sum	nary					Model Sumn	nary			
S	R-Sa R.	Sa(adi)				SR	-Sa R-Se	(ibe)r		
70 6463 6	<u> </u>	$\frac{0.00\%}{0.00\%}$				2 6927 97	88% 0	1 53%		
10.0105 0		0.0070				2.0921 91.	5070 2	1.5570		
Source D	Seq F SS 2 11691 2 6405 2 3055	Contributio 37.55 20.57	Adj on SS % 11691 % 6405	Adj MS 5845 3202	F- P- Value Value 1.17 0.461 0.64 0.609 0.31 0.766	Source A B C Basi hal	DF Sc 2 4 2 1 2 1	eq SS Adj 9 06.26 406. 59.66 159. 04.63 104.	SS Adj M 26 203.12 66 79.83 63 52.31	S F I 9 28.01 0.034 1 11.01 0.083 7 7.22 0.123
Б С	<u> </u>	32.06	% 9987	4991	0.51 0.700	Error	4	14.30 14.	50 7.25	1
C Error	2 9982		// ///L	1//1		131101				
C Error Total	2 9982 8 31132	100.00	0%			Total	86	85.06		
C Error Total	2 9982 8 31132 able for l	100.00	%			Total Response Ta	8 6 able for Si	85.06 ignal to No	oise Ratio	s
C Error Total esponse T Level	2 9982 8 31132 able for 1 A B	100.00 Means C	0% 			Total Response Ta Smaller is bet	8 6 able for Siter	85.06 ignal to No	oise Ratio	s
Error Total csponse T Level 1 19.	2 9982 8 31132 able for I <u>A B</u> 60 36.52	100.00 Means <u>C</u> 44.37	1 ⁰ / ₀			Total Response Ta Smaller is bet	8 6 able for Siter	85.06 ignal to No	oise Ratio C	s
Error Total Esponse T Level 1 19. 2 92.	2 9982 8 31132 able for I <u>A B</u> 60 36.52 46 101.71	Means <u>C</u> 44.37 83.55	9%			Total Response Ta Smaller is bet <u>Level</u> 1	8 6 able for Siter A -23.90	85.06 ignal to No <u>B</u> -27.93	vise Ratio	s
C Error Total Esponse T Level 1 19. 2 92. 3 99.	2 9982 8 31132 able for I <u>A B</u> 60 36.52 46 101.71 20 73.04	Means <u>C</u> 44.37 83.55 83.35	9%			Total Response Ta Smaller is bet Level 1 2	8 6 able for Siter <u>A</u> -23.90 -37.29	85.06 ignal to No <u>B</u> -27.93 -38.20	bise Ratio <u>C</u> -28.62 -36.51	s
C Error Total Esponse T Level 1 19. 2 92. 3 99. Delta 79.	2 9982 8 31132 able for I <u>A B</u> 60 36.52 46 101.71 20 73.04 60 65.19	Means <u>C</u> 44.37 83.55 83.35 39.18	9%			Total Response Ta Smaller is bet Level 1 2 3	8 6 able for Si ter -23.90 -37.29 -38.87	85.06 ignal to No <u>B</u> -27.93 -38.20 -33.93	c <u>-28.62</u> -36.51 -34.93	s
C Error Total	2 9982 8 31132	100.00	0%			Total	8 6	85.06		

Tabla 46. C2.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa cavidad en desbaste.

Anexo C3. Respuestas de semi-acabado en placa corazón

stimated Model Coefficients for Means	Estimated Model Coefficients for SN ratios
Term Coef SE Coef T P	Term Coef SE Coef T P
Constant 743.75 30.49 24.391 0.002	Constant -57.0556 0.1222 -466.917 0.000
A 1 162.47 43.12 3.768 0.064	A 1 -1.6073 0.1728 -9.301 0.011
A 2 -56.90 43.12 -1.319 0.318	A 2 0.4787 0.1728 2.770 0.109
B 1 112.83 43.12 2.616 0.120	B 1 -0.9351 0.1728 -5.411 0.032
B 2 -32.20 43.12 -0.747 0.533	B 2 0.1972 0.1728 1.141 0.372
C 1 244.21 43.12 5.663 0.030	C 1 -2.6071 0.1728 -15.086 0.004
C 2 -44.38 43.12 -1.029 0.412	C 2 0.2428 0.1728 1.405 0.295
odel Summary	Model Summary
$S = \mathbf{D} S_{\mathbf{r}} (\mathbf{r}, \mathbf{t})$	$S = \mathbf{P} S_{\mathbf{r}} (\mathbf{r} \mathbf{d}^{\dagger})$
$\frac{5}{01.4701.06} \frac{\text{R-Sq}(\text{ad})}{6.720}$	5 K-Sq K-Sq(adj)
91.4/91 96.68% 86.73%	0.3666 99.50% 98.02%
91.4/91 96.68% 86.73%	0.3666 99.50% 98.02%
nalysis of Variance	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios
nalysis of Variance Adj F- P-	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F
91.4791 96.68% 86.73% nalysis of Variance Adj F- P- Source DF Seq SS Contribution Adj SS MS Value Value	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios <u>Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F</u> <u>A</u> 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj F- P- MS Value Value	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F I A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 4.3737 2.1869 16.27 0.05
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj F- P- MS Value Value A 2 122341 24.25% 122341 61171 7.31 0.120 B 2 60805 12.05% 60805 30403 3.63 0.216	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F 1 A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 4.3737 2.1869 16.27 0.05 C 2 37.3355 37.3355 18.6677 138.91 0.00
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj F- P- MS Value Value A 2 122341 24.25% 122341 61171 7.31 0.120 B 2 60805 12.05% 60805 30403 3.63 0.216 C 2 304610 60.38% 304610 152305 18.20 0.052	O.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F 1 A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 4.3737 2.1869 16.27 0.05 C 2 37.3355 37.3355 18.6677 138.91 0.00 Residual 2 0.2688 0.2688 0.1344
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj F- P- MS Value Value A 2 122341 24.25% 122341 61171 7.31 0.120 B 2 60805 12.05% 60805 30403 3.63 0.216 C 2 304610 60.38% 304610 152305 18.20 0.052 Error 2 16737 3.32% 16737 8368	Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F I A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 4.3737 2.1869 16.27 0.05 C 2 37.3355 37.3355 18.6677 138.91 0.00 Residual 2 0.2688 0.2688 0.1344
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj F- P- MS Value Value A 2 122341 24.25% 122341 61171 7.31 0.120 B 2 60805 12.05% 60805 30403 3.63 0.216 C 2 304610 60.38% 304610 152305 18.20 0.052 Error 2 16737 3.32% 16737 8368 Total 8 504494 100.00%	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F 1 A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 4.3737 2.1869 16.27 0.05 C 2 37.3355 37.3355 18.6677 138.91 0.00 Residual 2 0.2688 0.2688 0.1344 Error Total 8 54.2371
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj F- P- Mathematical Adj Adji Adji Adji Adji Adji Adji Adji	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F 1 A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 4.3737 2.1869 16.27 0.05 C 2 37.3355 37.3355 18.6677 138.91 0.00 Residual 2 0.2688 0.2688 0.1344 Error Total 8 54.2371
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj F- P- Marce DF Seq SS Contribution Adj SS MS Value Value A 2 122341 24.25% 122341 61171 7.31 0.120 B 2 60805 12.05% 60805 30403 3.63 0.216 C 2 304610 60.38% 304610 152305 18.20 0.052 Error 2 16737 3.32% 16737 8368 Total 8 504494 100.00% 868	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F 1 A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 4.3737 2.1869 16.27 0.05 C 2 37.3355 37.3355 18.6677 138.91 0.00 Residual 2 0.2688 0.2688 0.1344 Error Total 8 54.2371 Response Table for Signal to Noise Ratios Smaller is better Smaller is better
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj F- P- Matrix 2 122341 24.25% 122341 61171 7.31 0.120 B 2 60805 12.05% 60805 30403 3.63 0.216 C 2 304610 60.38% 304610 152305 18.20 0.052 Error 2 16737 3.32% 16737 8368 Total 8 504494 100.00% 868	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios <u>Source</u> DF Seq SS Adj SS Adj MS F 1 A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 4.3737 2.1869 16.27 0.05 C 2 37.3355 37.3355 18.6677 138.91 0.00 Residual 2 0.2688 0.2688 0.1344 Error Total 8 54.2371 Response Table for Signal to Noise Ratios Smaller is better Level A B C
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj F- P- Malysis of Variance Adj E- P- A 2 122341 24.25% 122341 61171 7.31 0.120 B 2 60805 12.05% 60805 30403 3.63 0.216 C 2 304610 60.38% 304610 152305 18.20 0.052 Error 2 16737 3.32% 16737 8368 Total 8 504494 100.00% 8368	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 2.1869 16.27 0.05 C 2 37.3355 37.3355 18.6677 138.91 0.00 Residual 2 0.2688 0.2688 0.1344 Error Total 8 54.2371 Response Table for Signal to Noise Ratios Smaller is better Level A B C 1 58.66 59.66
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.3666 99.50% 98.02% Analysis of Variance for SN ratios Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F A 2 12.2591 12.2591 6.1296 45.61 0.02 B 2 4.3737 4.3737 2.1869 16.27 0.05 C 2 37.3355 37.3355 18.6677 138.91 0.00 Residual 2 0.2688 0.2688 0.1344 Error Total 8 54.2371 Response Table for Signal to Noise Ratios Smaller is better Level A B C 1 -58.66 -57.99 -59.66 2 -56.58
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{r c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{r c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$

Tabla 48. C3.2. Análisis de varianza para medias y S/N de tiempo de maquinado para placa corazón en semi-acabado.

Linear Model Analysis: Means versus A, B, C	Linear Model Analysis: SN ratios versus A, B, C
Estimated Model Coefficients for Means	Estimated Model Coefficients for SN ratios
Term Coef SE Coef T P	Term Coef SE Coef T P
Constant 5828.4 234.3 24.874 0.002	Constant -74.8310 0.05998 -1247.577 0.000
A 1 1665.2 331.4 5.025 0.037	A 1 -2.1773 0.08483 -25.668 0.002
A 2 -426.4 331.4 -1.287 0.327	A 2 0.3661 0.08483 4.316 0.050
B 1 943.6 331.4 2.847 0.104	B 1 -0.9130 0.08483 -10.763 0.009
B 2 -249.8 331.4 -0.754 0.530	B 2 0.1145 0.08483 1.349 0.310
C 1 2013.9 331.4 6.077 0.026	C 1 -2.7483 0.08483 -32.400 0.001
C 2 -357.8 331.4 -1.080 0.393	C 2 0.2638 0.08483 3.110 0.090
Model Summery	Model Summary
Nouci Summary	Woder Summary
S R-Sq R-Sq(adj)	S R-Sq R-Sq(adj)
702.9453 97.50% 90.00%	0.1799 99.91% 99.63%
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj MS Value Value A 2 13468171 34.06% 13468171 6734085 13.63 0.0 B 2 4302041 10.88% 4302041 2151020 4.35 0.1 C 2 20779372 52.56% 20779372 10389686 21.03 0.0 Error 2 988264 2.50% 988264 494132 Total 8 39537848 100.00% 6 6	Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F P A 2 24.4650 24.4650 12.2325 377.78 0.003 B 2 4.4533 4.4533 2.2266 68.77 0.014 C 2 41.3883 41.3883 20.6942 639.11 0.002 45 Residual 2 0.0648 0.0648 0.0324 Error Total 8 70.3713 5 5 5
Level A B C 1 7494 6772 7842 2 5402 5579 5471 3 4590 5135 4172	Response Table for Signal to Noise Ratios Smaller is better Level A B C 1 -77.01 -75.74 -77.58 2 -74.46 -74.72 -74.57
Delta 2904 1637 3670	3 -73.02 -74.03 -72.35
Rank 2 3 1	Delta 3.99 1.71 5.23
	Rank 2 3 1

Tabla 49. C	3.3. Análisis de	varianza para me	edias y S/N del	desgaste de	herramienta para	placa corazón en sei	ni-acabado.
-------------	------------------	------------------	-----------------	-------------	------------------	----------------------	-------------

stimated M	odel Coeffic	tients for l	Means			Estimated M	Iodel Coe	fficients f	or SN ratio	os
Term	Coef S	SE Coef	Т	Р		Term	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	24.8367	2.488	9.982	0.010		Constant	-26.6807	0.7938	-33.613	0.001
A 1	15.6200	3.519	4.439	0.047		A 1	-5.1395	1.1225	-4.578	0.045
A 2	-6.7267	3.519	-1.912	0.196		A 2	1.6393	1.1225	1.460	0.282
B 1	7.2400	3.519	2.057	0.176		B 1	-2.6389	1.1225	-2.351	0.143
B 2	-7.7533	3.519	-2.203	0.158		B 2	3.1781	1.1225	2.831	0.105
C 1	0.1967	3.519	0.056	0.961		C 1	1.5690	1.1225	1.398	0.297
C 2	-2.0333	3.519	-0.578	0.622		C 2	-0.3936	1.1225	-0.351	0.759
Iodel Summ	nary					Model Sumr	nary			
с р	Sa D Sa(ad	4:)				6 1		(adi)		
<u>7 4647 02 0</u>	-5q - 5q(ac)	<u>1))</u>				$\frac{3}{22912.04}$	210/ 7	(auj)		
7.4047 72.7	/4/0 /1./4	-/0				2.3013 74.	J1/0 /	.2070		
	•									
Source DF A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8	Seq SS Con 1104.97 338.39 22.64 111.44 1577.44	ntribution 70.05% 21.45% 1.44% 7.06% 100.00%	Adj SS 1104.97 338.39 22.64 111.44	Adj MS V 552.49 169.19 11.32 55.72	F- P- Value Value 9.92 0.092 3.04 0.248 0.20 0.831	Analysis of V Source A B C Residual Error Total	Variance fr DF Se 2 1: 2 2 2 2 8 1:	or SN rati 24.06 124 52.06 52 11.99 11 11.34 11 99.46	SS Adj M .06 62.03 .06 26.03 .99 5.99 .34 5.67	S F I 30 10.94 0.08 32 4.59 0.17' 77 1.06 0.48' 70 7 1.06'
Source DF A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta Level 4	ariance 2 Seq SS Con 1104.97 338.39 22.64 111.44 1577.44	ntribution 70.05% 21.45% 1.44% 7.06% 100.00%	Adj SS 1104.97 338.39 22.64 111.44	Adj MS V 552.49 169.19 11.32 55.72	F- P- Value Value 9.92 0.092 3.04 0.248 0.20 0.831	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bei	Variance fr DF Se 2 12 2 2 2 2 8 19 able for Si tter	or SN rati eq SS Adj 24.06 124 52.06 52 11.99 11 11.34 11 09.46 gnal to N	os <u>SS</u> Adj M .06 62.03 .06 26.03 .99 5.99 .34 5.67 oise Ratio	S F I 30 10.94 0.08 32 4.59 0.17' 77 1.06 0.486 70 s 100
Source DF A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta 1 40.4 2 18	ariance 2 Seq SS Con 1104.97 338.39 22.64 111.44 1577.44	ntribution 70.05% 21.45% 1.44% 7.06% 100.00%	Adj SS 1104.97 338.39 22.64 111.44	Adj MS V 552.49 169.19 11.32 55.72	F- P- Value Value 9.92 0.092 3.04 0.248 0.20 0.831	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is ber Level	Variance fr DF Se 2 12 2 2 2 2 8 19 able for Si tter <u>A</u>	er SN rati eq SS Adj 24.06 124 52.06 52 11.99 11 11.34 11 09.46 gnal to N B	os <u>SS</u> Adj M .06 62.03 .06 26.03 .99 5.99 .34 5.67 oise Ratio	S F I 50 10.94 0.08 32 4.59 0.17' 77 1.06 0.486 70 s
Source DF A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta 1 Level 4 1 40.4 2 18.1 3 15.9	Seq SS Con 1104.97 338.39 22.64 111.44 1577.44 ble for Mean A B C 6 32.08 25.03 1 17.08 22.80 4 25 35 26 67	ntribution 70.05% 21.45% 1.44% 7.06% 100.00%	Adj SS 1104.97 338.39 22.64 111.44	Adj MS V 552.49 169.19 11.32 55.72	F- P- Value Value 9.92 0.092 3.04 0.248 0.20 0.831	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is ber Level 1	Variance f DF Se 2 12 2 2 2 2 8 19 able for Si tter A -31.82 25 6 1	er SN rati eq SS Adj 24.06 124 52.06 52 11.99 11 11.34 11 09.46 gnal to N B -29.32 -29.32	os <u>SS</u> Adj M .06 62.03 .06 26.03 .99 5.99 .34 5.67 oise Ratio <u>C</u> -25.11 -25.71	S F I 30 10.94 0.08 32 4.59 0.17' 77 1.06 0.48 70 s
Source DF A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta 40.4 1 40.4 2 18.1 3 15.9 Delta 24 5	Seq SS Con 1104.97 338.39 22.64 111.44 1577.44 ble for Mear A B C 6 32.08 25.03 1 17.08 22.80 4 25.35 26.67 1 14 99 3 87	ntribution 70.05% 21.45% 1.44% 7.06% 100.00%	Adj SS 1104.97 338.39 22.64 111.44	Adj MS V 552.49 169.19 11.32 55.72	F- P- Value Value 9.92 0.092 3.04 0.248 0.20 0.831	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is ber Level 1 2	Variance f DF Se 2 12 2 2 2 2 8 19 able for Si tter A -31.82 -25.04 22.14	er SN rati eq SS Adj 24.06 124 52.06 52 11.99 11 11.34 11 09.46 gnal to N B -29.32 -23.50 07 22	os <u>SS</u> Adj M .06 62.03 .06 26.03 .99 5.99 .34 5.67 oise Ratio <u>C</u> -25.11 -27.07 27.07	S F I 30 10.94 0.08 32 4.59 0.17' 77 1.06 0.48 70 s 1000
Source DF A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Tai 40.4 1 40.4 2 18.1 3 15.9 Delta 24.5 Bank 24.5	Seq SS Con 1104.97 338.39 22.64 111.44 1577.44 ble for Mear A B C 6 32.08 25.03 1 17.08 22.80 4 25.35 26.67 1 14.99 3.87 1 2 3	ntribution 70.05% 21.45% 1.44% 7.06% 100.00%	Adj SS 1104.97 338.39 22.64 111.44	Adj MS V 552.49 169.19 11.32 55.72	F- P- Value Value 9.92 0.092 3.04 0.248 0.20 0.831	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet Level 1 2 3 5	Variance fr DF Se 2 12 2 2 2 3 8 19 able for Si tter A -31.82 -25.04 -23.18 0 64	er SN rati eq SS Adj 24.06 124 52.06 52 11.99 11 11.34 11 09.46 gnal to N B -29.32 -23.50 -27.22 5 22	os <u>SS</u> Adj M .06 62.03 .06 26.03 .99 5.99 .34 5.67 oise Ratio <u>C</u> -25.11 -27.07 -27.86 <u>7</u>	S F I 30 10.94 0.08 32 4.59 0.17' 77 1.06 0.48 70 s 50
Source DFA2B2C2Error2Total8esponse TaLevelA140.4218.1315.9Delta24.5Rank	Seq SS Cort 1104.97 338.39 22.64 111.44 1577.44 ble for Mear A B C 6 32.08 25.03 1 17.08 22.80 4 25.35 26.67 1 14.99 3.87 1 2 3	ntribution 70.05% 21.45% 1.44% 7.06% 100.00%	Adj SS 1104.97 338.39 22.64 111.44	Adj MS V 552.49 169.19 11.32 55.72	F- P- 9.92 0.092 3.04 0.248 0.20 0.831	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet Level 1 2 3 Delta Barl	Variance fr DF Se 2 1: 2 2 2 3 8 19 able for Si tter A -31.82 -25.04 -23.18 8.64	er SN rati eq SS Adj 24.06 124 52.06 52 11.99 11 11.34 11 09.46 gnal to N B -29.32 -23.50 -27.22 5.82	os <u>SS</u> Adj M .06 62.03 .06 26.03 .99 5.99 .34 5.67 oise Ratio <u>C</u> -25.11 -27.07 -27.86 2.74 2	S F I 30 10.94 0.08 32 4.59 0.17' 77 1.06 0.48 70 s 5

Anexo C4. Respuestas de semi-acabado en placa Cavidad

Tabla 50. C4.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa cavidad en semi-acabado.

stimated M	lodel Coeffi	icients fo	or Mean	. S		Estimated N	Iodel C	oefficie	nts for S	SN ratios	
Term	Coef SI	E Coef	Т	Р		Term	Co	ef SE	Coef	Т	Р
Constant	526.76	13.55	38.879	0.001		Constant	-54.16	09 ().3492	-155.109	0.000
A 1	92.65	19.16	4.836	0.040		A 1	-1.49	14 ().4938	-3.020	0.094
A 2	-21.27	19.16	-1.110	0.383		A 2	0.17	76 ().4938	0.360	0.754
B 1	45.44	19.16	2.372	0.141		B 1	-0.64	03 ().4938	-1.297	0.324
B 2	27.91	19.16	1.457	0.283		B 2	-0.54	49 ().4938	-1.103	0.385
C 1	126.28	19.16	6.590	0.022		C 1	-2.05	30 ().4938	-4.157	0.053
C 2	-17.24	19.16	-0.900	0.463		C 2	0.28	21 ().4938	0.571	0.625
odel Sumn	nary					Model Sum	nary				
S	R-Sa R-Sa	(adi)				S I	R-Sa R-	Sa(adi)			
40.6466.97	<u></u>	46%				1.0475.94	87%	79.47%	_		
						1.04/3 /4.			,		
						1.047574.					
nalysis of V	⁷ ariance					Analysis of V	Variance	e for SN	ratios		
nalysis of V	ariance	,.	Ad	j Adj	F- P-	Analysis of Source	Variance DF	e for SN Seq SS	l ratios Adj SS	Adj MS	FI
nalysis of V Source DI	Variance	<u>>ntributi</u>	Ad on SS	lj Adj 3 MS	F- P- Value Value	Analysis of V Source	Variance DF 2	e for SN Seq SS 11.946	Adj SS 11.946	Adj MS 5.973	F I 5.44 0.155
nalysis of V Source DI	7 ariance <u>7</u> Seq SS Co 2 42398	<u>ontributi</u> 27.39	Ad on SS 9% 42398	l j Adj S MS 8 21199	F- P- Value Value 12.83 0.072	Analysis of V Source A B	Variance DF 2 2	e for SN Seq SS 11.946 6.334	Adj SS 11.946 6.334	Adj MS 5.973 3.167	F I 5.44 0.155 2.89 0.25
alysis of V Source DI A 2 B 2	Variance <u>F Seq SS Co</u> 2 42398 2 24674	ontributi 27.39 15.94	Ad on SS 9% 42398 4% 24674	lj Adj S MS 3 21199 4 12337	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.022	Analysis of V Source A B C	Variance DF 2 2 2	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291	Adj SS 11.946 6.334 22.291	Adj MS 5.973 3.167 11.146	F I 5.44 0.15: 2.89 0.25 [°] 10.16 0.090
Source DI A 2 B 2 C 2	Yariance F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3204	ontributi 27.39 15.94 54.53	Ad on SS 9% 42398 4% 24674 3% 84407	l j Adj 5 MS 8 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual	Variance DF 2 2 2 2 2	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195	Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097	F I 5.44 0.155 2.89 0.25 10.16 0.090
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total	F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3304 2 154776	ontributi 27.39 15.94 54.53 2.13	Ad on SS 9% 42398 4% 24674 3% 84403 3% 3304	lj Adj S MS 8 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual Error Total	Variance DF 2 2 2 2 2	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195	Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097	F I 5.44 0.155 2.89 0.25 [°] 10.16 0.090
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8	F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3304 3 154776	ontributi 27.39 15.94 54.53 2.13 100.00	Ad on SS 5% 42398 4% 24674 3% 84407 3% 3304 3% 3304	l j Adj <u>S MS</u> 8 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual Error Total	Variance DF 2 2 2 2 8	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195 42.766	Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097	F I 5.44 0.155 2.89 0.25 [°] 10.16 0.090
A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8	F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3304 3 154776	<u>ontributi</u> 27.39 15.94 54.53 2.13 100.00 ans	Ad on St 7% 42391 4% 2467- 3% 84402 3% 84402 3% 330- 0%	l j Adj <u>8</u> 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T	Variance DF 2 2 2 2 8 8 able for	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195 42.766 Signal	I ratios Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195 to Noise	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097 e Ratios	F I 5.44 0.15: 2.89 0.25 [°] 10.16 0.090
A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta Level	F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3304 3 154776 uble for Mea A B	<u>ontributi</u> 27.39 15.94 54.53 2.13 100.00 ans <u>C</u>	Ad on St 9% 42394 4% 24674 3% 84407 3% 3304 9%	lj Adj <u>5 MS</u> 8 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be	Variance DF 2 2 2 2 8 able for tter	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195 42.766 Signal	Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195 to Noise	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097 e Ratios	F I 5.44 0.155 2.89 0.257 10.16 0.090
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta Level 1 1 619	F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3304 3 154776 uble for Mea A B .4 572.2	<u>ontributi</u> 27.39 15.94 54.53 2.13 100.00 ans <u>C</u>	Ad on St 0% 42391 4% 24674 3% 84401 3% 3304 0%	lj Adj <u>5 MS</u> 8 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet Level	Variance DF 2 2 2 2 8 able for tter A	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195 42.766 Signal B	I ratios Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195 to Noise	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097 e Ratios	F I 5.44 0.155 2.89 0.257 10.16 0.090
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta Level 1 1 619 2 505 2 505	Yariance F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3304 3 154776 uble for Mea 4 A B .4 572.2 653 .5 554.7 509	<u>ontributi</u> 27.39 15.94 54.53 2.13 100.00 ans <u>C</u> .0	Ad on SS 30% 42391 4% 24674 3% 8440 3% 3304 3%	lj Adj <u>S MS</u> 8 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet <u>Level</u> 1	Variance DF 2 2 2 2 8 able for tter A -55.65	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195 42.766 Signal B -54.80	I ratios Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195 to Noise to Noise -56.21	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097 e Ratios	F I 5.44 0.155 2.89 0.25 [°] 10.16 0.090
A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 Esponse Ta Level 1 619 2 505 3 455	F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3304 3 154776 able for Mea A B .4 572.2 653 .5 554.7 509 .4 453.4 417	<u>ontributi</u> 27.39 15.94 54.53 2.13 100.00 ans <u>C</u> .0 .5	Ad on SS 3% 42391 4% 2467- 3% 8440 3% 330- 3%	lj Adj <u>S MS</u> 8 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet <u>Level</u> 1 2	Variance DF 2 2 2 2 8 able for tter A -55.65 -53.98	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195 42.766 Signal B -54.80 -54.71	I ratios Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195 to Noise C -56.21 -53.88	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097 e Ratios	F I 5.44 0.155 2.89 0.25 10.16 0.090
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta Level 1 619 2 505 3 455 Delta 164	Yariance F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3304 3 154776 able for Mea A B .4 572.2 653 .5 554.7 509 .4 453.4 417 .0 118.8 235	27.39 15.94 54.53 2.13 100.00 ans <u>C</u> .0 .5 .7 .3	Ad on <u>St</u> 3% 42391 4% 2467- 3% 8440 3% 8440 3% 330- 0%	lj Adj <u>S MS</u> 8 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet <u>Level</u> 1 2 3	Variance DF 2 2 2 2 8 able for tter A -55.65 -53.98 -52.85	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195 42.766 Signal B -54.80 -54.71 -52.98	I ratios Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195 to Noise C -56.21 -53.88 -52.39	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097 e Ratios	F I 5.44 0.155 2.89 0.25 [°] 10.16 0.090
A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 Esponse Ta Level 1 619 2 505 3 455 Delta 164 Rank	Arriance F Seq SS Co 2 42398 2 24674 2 84401 2 3304 3 154776 able for Mea A B .4 572.2 653 .5 554.7 509 .4 453.4 417 .0 118.8 235 .2 .3 3	<u>ontributi</u> 27.39 15.94 54.53 2.13 100.00 ans <u>C</u> 5 7 3 1	Ad on St 7% 42391 4% 2467- 3% 8440 3% 8440 3% 330- 0%	lj Adj <u>S MS</u> 8 21199 4 12337 1 42200 4 1652	F- P- Value Value 12.83 0.072 7.47 0.118 25.54 0.038	Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet <u>Level</u> 1 2 3 Delta	Variance DF 2 2 2 2 8 able for tter <u>A</u> -55.65 -53.98 -52.85 2.81	e for SN Seq SS 11.946 6.334 22.291 2.195 42.766 Signal B -54.80 -54.71 -52.98 1.83	I ratios Adj SS 11.946 6.334 22.291 2.195 to Noise C -56.21 -53.88 -52.39 3.82	Adj MS 5.973 3.167 11.146 1.097 e Ratios	F I 5.44 0.155 2.89 0.25 [°] 10.16 0.090

Tabla 51. C4.2. Análisis de varianze	ı para medias y S/N d	e tiempo de maquinado	para placa cavidad	l en semi-acabado.
--------------------------------------	-----------------------	-----------------------	--------------------	--------------------

Linear Madal Analasia Magazamana A. P. C.	Linear Madel Analysis SN action second A. B. C.
Estimated Model Coefficients for Means	Estimated Model Coefficients for SN ratios
Term Coef SE Coef T P	Term Coef SE Coef T P
Constant 4480.8 156.2 28.687 0.001	Constant -72.5455 0.03266 -2221.241 0.000
A 1 1203.9 220.9 5.450 0.032	A 1 -2.1069 0.04619 -45.616 0.000
A 2 -218.4 220.9 -0.989 0.427	A 2 0.1980 0.04619 4.288 0.050
B 1 563.2 220.9 2.550 0.126	B 1 -0.6309 0.04619 -13.660 0.005
B 2 -196.1 220.9 -0.888 0.468	B 2 0.1178 0.04619 2.550 0.125
C 1 1617.9 220.9 7.324 0.018	C 1 -2.9135 0.04619 -63.079 0.000
C 2 -322.4 220.9 -1.460 0.282	C 2 0.3541 0.04619 7.668 0.017
Model Summary S R-Sq R-Sq(adj)	Model Summary <u>S R-Sq R-Sq(adj)</u>
468.5927 98.05% 92.20%	0.0980 99.97% 99.89%
Analysis of Variance	Analysis of Variance for SN ratios
F- P-	Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F P
Source DF Seq SS Contribution Adj SS Adj MS Value Value	A 2 24.3662 24.3662 12.1831 1269.07 0.001
A 2 7404502 32.89% 7404502 3702251 16.86 0.056	B 2 2.0257 2.0257 1.0129 105.51 0.009
B 2 1471348 6.54% 1471348 735674 3.35 0.230	C 2 45.4923 45.4923 22.7462 2369.39 0.000
C 2 13199134 58.63% 13199134 6599567 30.06 0.032	Residual 2 0.0192 0.0192 0.0096
Error 2 439158 1.95% 439158 219579	Error
Total 8 22514142 100.00%	Total 8 71.9035
Response Table for Means	Response Table for Signal to Noise Ratios
Level A B C	Smaller is better
1 5685 5044 6099	Level A B C
2 4262 4285 4158	1 -74.65 -73.18 -75.46
3 3495 4114 3185	2 -72.35 -72.43 -72.19
Delta 2189 930 2913	3 -70.64 -72.03 -69.99
Rank 2 3 1	Delta 4.02 1.14 5.47
	Rank 2 3 1

Tabla 52. C4.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa cavidad en semi-acabado.

Estimated N	Aodel Coe	efficients fo	or Means	•		Estimated I	Model Coe	efficients	s for S	N ratio	os	
Term	Coef	SE Coef	т	Р		Term	Coe	f SE C	oef	т	Р	
Constant	71.14	57.32	1.241	0.340		Constant	-25.8141	5.5	591	-4.617	0.044	-
A 1	104.45	81.06	1.289	0.326		A 1	-4.9822	2. 7.9	906	-0.630	0.593	
A 2	-49.75	81.06	-0.614	0.602		A 2	1.8526	7.9	906	0.234	0.837	
B 1	-58.84	81.06	-0.726	0.543		B 1	4.3421	7.9	906	0.549	0.638	
B 2	-44.36	81.06	-0.547	0.639		B 2	-0.7274	- 7.9	906	-0.092	0.935	
C 1	-55.12	81.06	-0.680	0.567		C 1	3.8852	2. 7.9	906	0.491	0.672	
C 2	-59.99	81.06	-0.740	0.536		C 2	5.4360) 7.9	906	0.688	0.563	
Model Sum	nary					Model Sum	mary					
S	R-Sq R	-Sq(adj)				<u>S</u>	R-Sq R-	Sq(adj)				
171.9503	/2.04%	0.0076				16.7/22 5	1.0070	0.0076				
171.9503 Analysis of ` Source D A	Variance F Seq SS 2 49135	<u>Contributio</u> 22.73	Adj on SS % 49135	Adj MS 24568	F- P- Value Value 0.83 0.546	Analysis of Source A B	Variance 1 DF Se 2 1 2	For SN ra eq SS <u>A</u> 14.15 1 97.35	atios dj SS 14.15 97.35	Adj M 57.0' 48.6'	S F 7 0.20 0 7 0.17 0	P .831 .852
171.9503 Analysis of Source D A B	Variance F Seq SS 2 49135 2 48241	Contributio 22.73 22.32	Adj on SS % 49135 % 48241	Adj MS 24568 24121	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551	Analysis of Source A B C	Variance 1 DF S 2 1 2 2 3	For SN r eq SS A 14.15 1 97.35 9 94.59 3	atios dj SS 14.15 97.35 94.59	Adj M 57.0 [°] 48.6 [°] 197.2 [°]	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0	P .831 .852 .588
171.9503 Analysis of T Source D A B C	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660	Contributio 22.73 22.32 27.60	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660	Adj MS 24568 24121 29830	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	Analysis of Source A B C Residual	Variance 1 DF Se 2 1 2 2 3 2 5	For SN r eq SS A 14.15 1 97.35 9 94.59 3 62.61 5	atios dj SS 14.15 97.35 94.59 62.61	Adj M 57.0' 48.6' 197.2' 281.3	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P .831 .852 .588
171.9503 Analysis of T Source D A B C Error	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660 2 59134	Contributio 22.73 22.32 27.60 27.36	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660 % 59134	Adj MS 24568 24121 29830 29567	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	Analysis of Source A B C Residual Error	Variance 1 DF Se 2 1 2 3 2 5	For SN r eq SS A 14.15 1 97.35 9 94.59 3 62.61 5	atios dj SS 14.15 97.35 94.59 62.61	Adj M3 57.0 48.6 197.2 281.3	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P .831 .852 .588
171.9503 Analysis of T <u>Source D</u> A B C Error Total	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660 2 59134 8 216170	Contributio 22.73 22.32 27.60 27.36 100.00	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660 % 59134 %	Adj MS 24568 24121 29830 29567	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	Analysis of Source A B C Residual Error Total	Variance 1 DF So 2 1 2 3 2 3 2 5 8 11	or SN r 2 eq SS A 14.15 1 97.35 9 94.59 3 62.61 5 68.70	atios dj SS 14.15 97.35 94.59 62.61	Adj M 57.0 48.6 197.2 281.3	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P .831 .852 .588
171.9503 Analysis of T A B C Error Total Response T	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660 2 59134 8 216170 able for M	Contributio 22.73 22.32 27.60 27.36 100.00	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660 % 59134 %	Adj MS 24568 24121 29830 29567	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T	Variance 1 DF Se 2 1 2 3 2 5 8 11 Sable for Se	For SN ra eq SS A 14.15 1 97.35 9 94.59 3 62.61 5 68.70 ignal to	atios dj SS 14.15 97.35 94.59 62.61 Noise	Adj M3 57.0 48.6 197.2 281.3	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P .831 .852 .588
171.9503 Analysis of T <u>Source D</u> A B C Error Total Response T Level	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660 2 59134 8 216170 able for M A E	Contributio 22.73 22.32 27.60 27.36 100.00 Ieans C	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660 % 59134 %	Adj MS 24568 24121 29830 29567	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be	Variance 1 DF Se 2 1 2 3 2 5 8 11 Sable for Se tter	For SN r eq SS A 14.15 1 97.35 9 94.59 3 62.61 5 68.70 ignal to	atios dj SS 14.15 97.35 94.59 62.61 Noise	Adj M3 57.0 48.6 197.2 281.3 e Ratios	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P 1.831 1.852 1.588
Analysis of T Analysis of T Analysis of T A B C Error Total Response T Level 1 173	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660 2 59134 8 216170 able for M <u>A E</u> 5.59 12.30	Contributio 22.73 22.32 27.60 27.36 100.00 Iteans 5 C) 16.02	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660 % 59134 %	Adj MS 24568 24121 29830 29567	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level	Variance 1 DF So 2 1 2 3 2 5 8 11 Sable for So tter A	for SN rz eq SS A 14.15 1 97.35 9 94.59 3 62.61 5 68.70 ignal to	atios dj <u>SS</u> 14.15 97.35 94.59 62.61 Noise	Adj M3 57.0 48.6 197.2 281.3 e Ratios	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P .831 .852 .588
Analysis of T Analysis of T A B C Error Total Response T <u>Level</u> 1 17: 2 2:	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660 2 59134 8 216170 able for M <u>A E</u> 5.59 12.30 1.39 26.77	Contributio 22.73 22.32 27.60 27.36 100.00 Ieans <u>6 C</u> 16.02 7 11.15	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660 % 59134 %	Adj MS 24568 24121 29830 29567	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1	Variance 1 DF So 2 1 2 3 2 5 8 11 Sable for So tter A -30.80	ior SN rz eq SS A 14.15 1 97.35 9 62.61 5 68.70 ignal to B -21.47	atios dj SS 14.15 97.35 94.59 62.61 Noise	Adj M3 57.0 48.6 197.2 281.3 e Ratios	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P .831 .852 .588
Analysis of T Source D A B C Error Total Response T Level 1 17: 2 2: 3 10	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660 2 59134 8 216170 able for M <u>A E</u> 5.59 12.30 1.39 26.77 5.43 174.34	Contributio 22.73 22.32 27.60 27.36 100.00 Ieans <u>6 C</u> 11.15 186.24	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660 % 59134 %	Adj MS 24568 24121 29830 29567	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	16.7/22 5 Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1 2	Variance 1 DF So 2 1 2 3 2 5 8 11 Sable for So tter A -30.80 -23.96	ior SN rate eq SS A 14.15 1 97.35 9 62.61 5 68.70 ignal to B -21.47 -26.54	atios dj SS 14.15 97.35 94.59 62.61 Noise -211 -20	Adj M3 57.0 48.6 197.2 281.3 e Ratios <u>C</u> 93 38	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P .831 .852 .588
Analysis of T Source D A B C Error Total Response T Level 1 17: 2 2: 3 16 Delta 159	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660 2 59134 8 216170 able for M <u>A E</u> 5.59 12.30 1.39 26.77 5.43 174.34 0.16 162.04	Contributid 22.73 22.32 27.60 27.36 100.00 Ieans 3 C 16.02 7 11.15 186.24 175.10	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660 % 59134 %	Adj MS 24568 24121 29830 29567	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1 2 3	Variance f DF So 2 1 2 3 2 5 8 11 Sable for So tter A -30.80 -23.96 -22.68	book cor SN r cor SN r eq SS A 14.15 1 94.59 3 62.61 5 68.70 ignal to B -21.47 -26.54 -29.43	atios dj SS 14.15 97.35 94.59 62.61 Noise -21. -20. -35.	Adj M3 57.0 48.6 197.2 281.3 e Ratios C 93 38 14	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P .831 .852 .588
Analysis of T Source D A B C Error Total Response T Level 1 17: 2 2: 3 16 Delta 15: Rank	Variance F Seq SS (2 49135 2 48241 2 59660 2 59134 8 216170 able for M <u>A E</u> 5.59 12.30 39 26.77 5.43 174.34 0.16 162.04 3 2	Contributid 22.73 22.32 27.60 27.36 100.00 Ieans 3 C 16.02 7 11.15 186.24 175.10 2 1	Adj on SS % 49135 % 48241 % 59660 % 59134 %	Adj MS 24568 24121 29830 29567	F- P- Value Value 0.83 0.546 0.82 0.551 1.01 0.498	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1 2 3 Delta	Variance f DF So 2 1 2 3 2 5 8 11 Sable for So tter A -30.80 -23.96 -22.68 8.11	book cor SN ra eq SS A 14.15 1 94.59 3 62.61 5 68.70 ignal to B -21.47 -26.54 -29.43 7.96	atios dj SS 14.15 97.35 94.59 62.61 Noise -21. -20. -35. 14.	Adj M3 57.0 48.6 197.2 281.3 e Ratios C 93 38 14 76	S F 7 0.20 0 7 0.17 0 9 0.70 0 1	P .831 .852 .588

Tabla 53. C4.4. Análisis de varianza para medias y S/N de rugosidad superficial para placa cavidad en semi-acabado.

Linear Mod	al Analysis	Maana vara		C		Linoar M	odol An	alvoia.	N ratios	0#0110 A	BC
Estimated N	Andel Coeffi	icients for N	leans	C		Enicario	d Model	Coeffic	vients for \mathbf{S}	N ratio	D , C
Tama			T	п		Tarma	a Wiouci	Cast		л тано. Т	, п
Constant	0.68033	SE Coer	7 722	<u>P</u>		Constant	nt 3	77051	<u>5E Coer</u>	3.045	P 0.003
	0.08033	0.12450	1.006	0.010			ut J. 1	66591	1.241	0.040	0.095
	0.12555	0.12450	0.444	0.420		A 2	-1.	000005	1.755	0.513	0.445
R 1	0.03535	0.12459	0.444	0.700		R 1	-0.	60620	1.755	-0.315	0.055
B 2	-0.07055	0.12459	0.150	0.002		B 2	0.	06181	1.755	0.045	0.705
	-0.01567	0.12450	0.126	0.075			-0.	31127	1.755	-0.033	0.975
	0.01307	0.12459	0.120	0.515		C_{1}	-0.	40774	1.755	-0.177	0.070
C 2	-0.09707	0.12439	-0.704	0.515		C 2	1.	.49774	1.755	0.855	0.403
Model Sum	marv					Model Su	mmarv				
inoucl outin						iniouer ou					
$\frac{S}{O}$	R-Sq R-Sq(a	adj)				<u>S</u>	R-Sq	R-Sq(a	<u>dj)</u>		
0.2643 64.	.09% 0.0	0%0				5.7236	61.22%	0.00)%o		
Analysis of V	Variance					Analysis o	of Varia	nce for	SN ratios		
				Adj	F- P-	Source	D	F Seq S	SS Adj SS	Adj MS	FΡ
Source D	F Seq SS Co	ontribution	Adj SS	MŚ	Value Value	А		2 30.5	25 30.525	15.262	1.10 0.476
А	2 0.15423	39.64%	0.15423	0.07712	1.10 0.475	В		2 2.0	03 2.003	1.001	0.07 0.933
В	2 0.04560	11.72%	0.04560	0.02280	0.33 0.754	С		2 11.2	43 11.243	5.622	0.41 0.712
С	2 0.04952	12.73%	0.04952	0.02476	0.35 0.738	Residua	ıl	2 27.7	31 27.731	13.866	
Error	2 0.13970	35.91%	0.13970	0.06985		Error					
Total	8 0.38906	100.00%				Total		8 71.5	02		
Response T	able for Me	ans				Response	Table f	for Sign	al to Noise	e Ratios	
Level	A B	С				Smaller is	better				
1 0.8	057 0.6040 0	.6960				Level	А	в	С		
2 0.7	357 0.6617 0	.5827				$\frac{1}{1}$	2.114	4.386	3.468		
3 0.4	997 0.7753 0	.7623				2	2.879	3,718	5.277		
Delta 0.3	060 0.1713 0	.1797				3	6 346	3 235	2 593		
Rank	1 3	2				Delta	4 233	1 1 51	2.575		
						Rank	1		2.001		
							-	5	-		

Anexo C5. Respuestas de acabado (Contour area) en placa corazón

Tabla 54. C5.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa corazón en acabado(Contour area).

timated M	odel Coef	ficients for	Means			Estimated M	Model Coe	efficients fo	r SN ratios	8
Term	Coef	SE Coef	Т	Р		Term	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	508.66	31.63	16.083	0.004		Constant	-53.0716	0.1999	-265.459	0.000
A 1	106.52	44.73	2.382	0.140		A 1	-1.3297	0.2827	-4.703	0.042
A 2	-20.66	44.73	-0.462	0.690		A 2	-0.1288	0.2827	-0.455	0.693
B 1	83.60	44.73	1.869	0.203		B 1	-0.7340	0.2827	-2.596	0.122
B 2	-17.18	44.73	-0.384	0.738		B 2	-0.2548	0.2827	-0.901	0.463
C 1	334.87	44.73	7.487	0.017		C 1	-5.2680	0.2827	-18.632	0.003
C 2	-104.92	44.73	-2.346	0.144		C 2	1.0701	0.2827	3.785	0.063
odel Sumn	nary					Model Sum	mary			
S	P-Sa P-Sa	a(adi)				S I	P-Sa P-Sa	a(adi)		
94 8791 97	18% 89	<u>4(auj)</u> 8.72%				0 5998 99	54% 09	<u>1(auj)</u> 8.16%		
,	.1070 00					0.3770 77	.5170).			
alysis of V	ariance					Analysis of	Variance f	or SN ratio	8	
				Adj	F- P-	Source	DF Se	eq SS Adj S	SS Adj MS	F
					X7.1 . X7.1 .					
Source DI	⁷ Seq SS C	ontribution	Adj SS	MS	value value	А	2 1	1.736 11.73	36 5.868 0	16.31 0.05
Source DI	7 Seq SS C 2 57439	ontribution 8.99%	Adj SS 57439	MS 28719	3.19 0.239	A B	2 1 2 ·	1.736 11.73 4.744 4.74	36 5.8680 44 2.3721	16.31 0.05 6.59 0.13
A 2 B 2	Seq SS C 2 57439 2 35093	ontribution 8.99% 5.50%	Adj SS 57439 35093	MS 28719 17547	value value 3.19 0.239 1.95 0.339	A B C	2 1 2 2 13	1.736 11.73 4.744 4.74 9.558 139.55	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790	16.31 0.05 6.59 0.13 193.98 0.00
Source DI A 2 B 2 C 2	Seq SS C 2 57439 2 35093 2 528082	ontribution 8.99% 5.50% 82.69%	Adj SS 57439 5528082 2	MS 28719 17547 264041	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual	2 1 2 2 2 13 2	1.736 11.73 4.744 4.74 9.558 139.55 0.719 0.73	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597	16.31 0.05 6.59 0.13 193.98 0.00
Source DIABC2Error2	Seq SS C 2 57439 2 35093 2 528082 2 18004	ontribution 8.99% 5.50% 82.69% 2.82%	Adj SS 57439 535093 528082 2 18004	MS 28719 17547 264041 9002	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual Error	2 1 2 1 2 13 2 1	1.736 11.73 4.744 4.74 9.558 139.55 0.719 0.73	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597	0 16.31 0.09 6.59 0.13 0 193.98 0.00
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8	F Seq SS C 2 57439 2 35093 2 528082 2 18004 3 638618	ontribution 8.99% 5.50% 82.69% 2.82% 100.00%	Adj SS 57439 55093 528082 2 18004	MS 28719 17547 264041 9002	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual Error Total	2 1 2 13 2 8 15	1.736 11.73 4.744 4.74 9.558 139.55 0.719 0.73 6.758	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597) 16.31 0.05 6.59 0.13) 193.98 0.00
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta	 Seq SS C 57439 35093 528082 18004 638618 ble for Me 	ontribution 8.99% 5.50% 82.69% 2.82% 100.00% eans	Adj SS 57439 557439 528082 2 18004	MS 28719 17547 264041 9002	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual Error Total Response T	2 1 2 13 2 3 8 15	1.736 11.73 4.744 4.74 9.558 139.53 0.719 0.77 6.758	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597 ise Ratios) 16.31 0.03 6.59 0.12) 193.98 0.00
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta Level	 Seq SS C 57439 35093 528082 18004 638618 ble for Me A B 	ontribution 8.99% 5.50% 82.69% 2.82% 100.00% cans C	Adj SS 57439 55093 528082 18004	MS 28719 17547 264041 9002	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual Error Total Response T Smaller is be	2 1 2 13 2 13 2 8 15	1.736 11.7 4.744 4.7 9.558 139.5 0.719 0.7 6.758	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597 ise Ratios) 16.31 0.03 6.59 0.12) 193.98 0.00
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta Level 1 1 615	Seq SS C 2 57439 2 35093 2 528082 2 18004 3 638618 ble for Me A B 2 592.3	ontribution 8.99% 5.50% 82.69% 2.82% 100.00% eans <u>C</u> 3.5	Adj SS 57439 528082 2 18004	MS 28719 17547 264041 9002	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual Error Total Response T Smaller is be	2 1 2 13 2 13 2 8 15 2 8 15	1.736 11.7: 4.744 4.74 9.558 139.5: 0.719 0.7 6.758 gnal to No	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597 ise Ratios) 16.31 0.03 6.59 0.12 193.98 0.00
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta 2 Level 2 1 615 2 488	Seq SS C 2 57439 2 35093 2 528082 2 18004 3 638618 ble for Me A B 2 592.3 491.5 403	ontribution 8.99% 5.50% 82.69% 2.82% 100.00% eans <u>C</u> 3.5 3.7	Adj SS 57439 528082 2 18004	MS 28719 17547 264041 9002	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual Error Total Response T Smaller is be <u>Level</u>	2 1 $2 13$ $2 13$ $2 13$ $3 15$ $bable for Sinter$ A $-54 40$	1.736 11.7: 4.744 4.74 9.558 139.5: 0.719 0.7 6.758 gnal to No <u>B</u> 53.81 5	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597 ise Ratios <u>C</u> 8 34) 16.31 0.03 6.59 0.12 193.98 0.00
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta 2 Level 1 1 615 2 488 3 422	Seq SS C 2 57439 2 35093 2 528082 2 18004 3 638618 ble for Me A B 2 592.3 8 491.5 8 442.2	ontribution 8.99% 5.50% 82.69% 2.82% 100.00% eans <u>C</u> 3.5 3.7 8.7	Adj SS 57439 5528082 2 18004	MS 28719 17547 264041 9002	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual Error Total Response T Smaller is be <u>Level</u> 1	2 1 2 13 2 13 2 8 15 able for Si tter -54.40 - -53 20	1.736 11.7: 4.744 4.74 9.558 139.5: 0.719 0.7 6.758 gnal to No <u>B</u> 53.81 -56	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597 ise Ratios <u>C</u> 8.34) 16.31 0.03 6.59 0.12 193.98 0.00
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta 2 Level 1 1 615 2 488 3 422 Delta 192	Seq SS C 2 57439 2 35093 2 528082 2 18004 3 638618 ble for Me A B 2 592.3 8 442.2 4 150.0	ontribution 8.99% 5.50% 82.69% 2.82% 100.00% eans C 3.5 3.7 8.7 4.8	Adj SS 57439 5528082 2 18004	MS 28719 17547 264041 9002	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual Error Total Response T Smaller is be <u>Level</u> 1 2 3	2 1 2 13 2 13 2 8 15 able for Si tter A -54.40 - -53.20 - -51.61	1.736 11.7: 4.744 4.74 9.558 139.5: 0.719 0.7' 6.758 gnal to No <u>B</u> 53.81 -5: 53.33 -5: 52.08 4	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597 ise Ratios <u>C</u> 8.34 2.00 8.87) 16.31 0.03 6.59 0.13 193.98 0.00
Source DI A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta 2 Level 1 615 2 2 488 3 422 Delta 192 Rank 2	Seq SS C 2 57439 2 35093 2 35093 2 528082 2 18004 3 638618 ble for Me A B 2 592.3 8 442.2 4 150.0 2 3	ontribution 8.99% 5.50% 82.69% 2.82% 100.00% eans C 3.5 3.7 8.7 4.8 1	Adj SS 57439 5528082 2 18004	MS 28719 17547 264041 9002	value value 3.19 0.239 1.95 0.339 29.33 0.033	A B C Residual Error Total Response T Smaller is be <u>Level</u> 1 2 3 Delta	2 1 2 13 2 13 2 8 15 able for Si tter A -54.40 - -53.20 - -51.61 - 2 79	1.736 11.7: 4.744 4.74 9.558 139.5: 0.719 0.7 6.758 6.758 53.81 -5: 53.33 -5: 52.08 -4: 1.72 -	36 5.8680 44 2.3721 58 69.7790 19 0.3597 ise Ratios <u>C</u> 8.34 2.00 8.87 0.47) 16.31 0.03 6.59 0.13 193.98 0.00

stimated M	Aodel Coe	efficients	for Mea	ans			Estimated I	Model Co	efficients	for SN ratio	s
Term	Coef S	E Coef	Т	Р			Term	Coef	SE Coe	f T	Р
Constant	4035.9	270.9	14.896	0.004			Constant	-71.0449	0.330	7 -214.819	0.000
A 1	1321.8	383.2	3.450	0.075			A 1	-2.5409	0.467	7 -5.433	0.032
A 2	-296.6	383.2	-0.774	0.520			A 2	0.0900	0.467	0.192	0.865
B 1	707.1	383.2	1.845	0.206			B 1	-0.4828	0.467	7 -1.032	0.410
B 2	-264.2	383.2	-0.690	0.562			B 2	-0.0828	0.467	7 -0.177	0.876
C 1	2528.4	383.2	6.599	0.022			C 1	-4.9930	0.467	7 -10.675	0.009
C 2	-922.6	383.2	-2.408	0.138			C 2	1.4174	0.467	3.030	0.094
odel Sumi	mary						Model Sum	mary			
s	D Sa D	Sa(adi)					s		Sa(adi)		
912 9174	<u>n-34 n</u>	-5q(auj)					0.0022.00	K-54 K-3	$\frac{\mathbf{pq(au)}}{15.00\%}$		
	2 (1. (1. 7 / 1)	0/) + /0					0.9922.98	. / / /0	/././////		
	0.0370	07.3470					0.9922 98	.///0	5.0770		
nalvsis of '	Variance	07.3470					Analysis of	Variance	for SN r	atios	
nalysis of `	Variance	07.3470				E D	Analysis of	Variance	for SN ra	atios	E
nalysis of Source D	Variance	S Contril	hution	Adi SS	Adi MS I	F- P- Value Value	Analysis of Source	Variance DF Se	for SN ra	atios j SS Adj MS 414 - 18 7070	F
nalysis of Source D	Variance <u>F Seq S</u> 2 865836	S Contri	bution	Adj SS	Adj MS V 4329183	F- P- Value Value	Analysis of Source	Variance DF Se 2 3	for SN ra eq SS Ad 7.414 37	atios <u>j SS Adj MS</u> .414 18.7070 679 0.8397	F 19.00 0 0.85 0
nalysis of Source D	Variance <u>F Seq S</u> 2 865836 2 229791	S Contri 7 2	bution 20.74%	Adj SS 8658367 2297910	Adj MS V 4329183 1148955	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365	Analysis of Source A B C	Variance <u>DF Se</u> 2 3 2 2 11	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119	atios j SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 171 59 5857	F 19.00 0 0.85 0 60 53 0
nalysis of ^N Source D A B C	Variance <u>F Seq S</u> 2 865836 2 229791 2 2946905	S Contril 7 2 0	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1	Adj MS V 4329183 1148955 4734529	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual	Variance DF Se 2 3 2 2 11 2	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119	atios j SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 969 0.9844	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
nalysis of ^N Source D A B C Error	F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134	S Contril 7 2 0 8 7	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS V 4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error	Variance DF Se 2 3 2 2 11 2	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1	atios j SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
nalysis of ^N Source D A B C Error Total	F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134 8 4174667	S Contril 7 2 0 8 7 4 9 10	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17% 20.00%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS V 4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error Total	Variance <u>DF Se</u> 2 3 2 11 2 8 16	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1 0.233	atios Jj SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
nalysis of ⁷ Source D A B C Error Total	Variance F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134 8 4174667	S Contril 7 2 0 8 7 4 9 10	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17% 00.00%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS V 4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error Total	Variance DF Se 2 3 2 2 11 2 8 16	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1 0.233	atios J SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
nalysis of ⁷ Source D A B C Error Total	Variance F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134 8 4174667 able for Mark	S Contril 7 2 0 8 7 4 9 10 Ieans	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17% 00.00%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS V 4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T	Variance DF Se 2 3 2 11 2 8 16 'able for S	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1 0.233 Signal to	atios Jj SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844 Noise Ratios	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
alysis of Source D A B C Error Total esponse T Level	Variance F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134 8 4174667 able for M A B	<u>S Contril</u> 7 2 0 88 7 4 9 10 Ieans <u>C</u>	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17% 00.00%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS (4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be	Variance <u>DF Se</u> 2 3 2 11 2 8 16 'able for Setter	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1 0.233 Signal to	atios <u>j SS Adj MS</u> .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844 Noise Ratios	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
A B C Error Total Esponse T Level 1 53:	Variance F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134 8 4174667 able for M 58 4743 65	<u>S Contril</u> 7 2 0 88 7 4 9 10 feans <u>C</u> 64	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17% 00.00%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS (4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level	Variance <u>DF Se</u> 2 3 2 11 2 8 16 Sable for Setter A	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1 0.233 Signal to B	atios <u>j SS Adj MS</u> .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844 Noise Ratios C	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
A B C Error Total Esponse T Level 1 53: 2 37:	Variance F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134 8 4174667 bable for M A 58 4743 65 39 3772 31	S Contril 7 2 0 8 7 9 10 Iceans C 64 13	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17% 00.00%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS (4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1	Variance DF Sc 2 3 2 11 2 8 16 Cable for Sc etter A -73.59	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1 0.233 Signal to B -71.53	atios j SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844 Noise Ratios <u>C</u> .76.04	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
A B C Error Total Esponse T Level 1 53: 2 37: 3 30:	Variance F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134 8 4174667 bable for M A B 58 58 4743 39 3772 11 3593		bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17% 00.00%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS (4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1 2	Variance DF Se 2 3 2 11 2 8 16 Sable for Se etter A -73.59 -70.95	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1 0.233 Signal to B -71.53 - -71.13	Atios j SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844 Noise Ratios <u>C</u> .76.04 .69.63	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
A B C Error Total Esponse T Level 1 533 2 373 3 301 Delta 234	Variance F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134 8 4174667 Cable for M A B 58 58 4743 39 3772 11 3593 47 1150	S Contril $ $	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17% 00.00%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS (4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1 2 3	Variance DF Se 2 3 2 11 2 8 16 Sable for Se etter A -73.59 -70.95 -68.59	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1 0.233 Gignal to B -71.53 - -71.13 - -70.48	Atios j SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844 Noise Ratios	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0
A B C Error Total Esponse T Level 1 533 2 373 3 301 Delta 234 Rank	Variance F Seq S 2 865836 2 229791 2 2946905 2 132134 8 4174667 Cable for M A B 58 58 4743 39 3772 11 3593 2 3	S Contril $ $	bution 20.74% 5.50% 70.59% 2 3.17% 00.00%	Adj SS 8658367 2297910 9469058 1 1321344	Adj MS (4329183 1148955 4734529 660672	F- P- Value Value 6.55 0.132 1.74 0.365 22.30 0.043	Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1 2 3 Delta	Variance DF Se 2 3 2 11 2 8 16 Sable for Se etter A -73.59 -70.95 -68.59 4.99	for SN ra eq SS Ad 7.414 37 1.679 1 9.171 119 1.969 1 0.233 Gignal to B -71.53 - -71.13 - -70.48 1.05	Atios j SS Adj MS .414 18.7070 .679 0.8397 .171 59.5857 .969 0.9844 Noise Ratios	F 19.00 0 0.85 0 60.53 0

Tabla 55. C5.2. Análisis de varianza para medias y S/N de tiempo de maquinado para placa corazón en acabado(Contour area).

stimated	Model Co	efficient	s for Me	eans		Estimated N	Model Coe	efficients fo	or SN rat	ios
Term	Coef S	E Coef	Т	Р		Term	Coef	f SE Coe	fТ	P
Constar	nt 14.5067	1.282	11.320	0.008		Constant	-22.9122	0.698	-32.782	2 0.001
A 1	0.2167	1.812	0.120	0.916		A 1	-0.1323	0.9884	4 -0.134	0.906
A 2	1.8333	1.812	1.012	0.418		A 2	-1.1869	0.9884	4 -1.201	0.353
B 1	-1.0000	1.812	-0.552	0.637		B 1	0.4037	0.9884	4 0.408	0.723
В2	2.1200	1.812	1.170	0.363		B 2	-1.4053	0.9884	4 -1.422	2 0.291
C 1	3.2633	1.812	1.801	0.214		C 1	-2.0028	0.9884	4 -2.026	6 0.180
C 2	-0.0700	1.812	-0.039	0.973		C 2	0.0902	0.9884	4 0.091	0.936
odel Su	mmary					Model Sum	mary			
S	R-Sa R-S	a(adi)				S	R-Sa R-S	a(adi)		
0	K-54 K-5	q(auj)				5 1	K-54 K-5	q(auj)		
3.8445	78.13% 1	2.54%				2.0968 82	67% 3	0.69%		
3.8445	78.13% 1	2.54%				2.0968 82	.67% 3	0.69%		
3.8445 and alysis o	78.13% 1 f Variance	2.54%				2.0968 82 Analysis of	Variance f	0.69% For SN ratio	os	
3.8445 alysis o	r8.13% 1 of Variance Seq	2.54%	ŀ	Adj Adj	F- P-	2.0968 82 Analysis of Source	Variance f	0.69% For SN ratio	os SS Adj N	AS F F
3.8445 alysis o Source	78.13% 1 f Variance Seq DF SS 2 22.82	2.54%	A ation	Adj Adj SS MS	F- P- Value Value	2.0968 82 Analysis of Source	Variance f $\frac{DF}{2}$	0.69% For SN rations eq SS Adj 9.499 9.4	os SS Adj N 99 4.7	AS F F 50 1.08 0.481
3.8445 alysis o Source	78.13% 1 of Variance Seq DF SS 0 2 22.83 2 20.25	2.54%	A ation .89% 22	Adj Adj SS MS .83 11.42	F- P- Value Value 0.77 0.564	2.0968 82 Analysis of Source	.67% 3 Variance f DF Se 2 2	0.69% For SN rations eq SS Adj 9.499 9.4 9.423 9.4	SS Adj N 99 4.7 23 4.7	AS F F 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483
3.8445 alysis o Source A B	f Variance Seq DF SS 2 22.83 2 20.25 2 62 55	2.54%	Aution .89% 22 .98% 20 .27% 62	Adj Adj SS MS .83 11.42 .25 10.12 .55 31 28	F- P- Value Value 0.77 0.564 0.68 0.594 2.12 0.321	2.0968 82 Analysis of ` Source A B C Paridad	.67% 3 Variance f <u>DF Se</u> 2 2 2 2 2 2 2	0.69% for SN rational eq SS Adj 9.499 9.4 9.423 9.4 3.032 23.0 8.702 8.702	SS Adj M 99 4.7 23 4.7 32 11.5	<u>MS F F</u> 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483 16 2.62 0.276
3.8445 alysis o Source A B C	f Variance Seq DF SS (2 22.83 2 20.25 2 62.55 2 05.55	2.54% <u>Contribu</u> 16 14 46 21	Aution .89% 22 .98% 20 .27% 62	Adj Adj SS MS .83 11.42 .25 10.12 .55 31.28 54 14 78	F- P- Value Value 0.77 0.564 0.68 0.594 2.12 0.321	2.0968 82 Analysis of ` Source A B C Residual	.67% 3 Variance f DF Se 2 2 2 2 2 2	0.69% for SN rational eq SS Adj 9.499 9.4 9.423 9.4 3.032 23.0 8.793 8.7	SS Adj M 99 4.7 23 4.7 32 11.5 93 4.3	AS F F 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483 16 2.62 0.270 96
3.8445 - nalysis o Source A B C Error	f Variance Seq DF SS 2 22.83 2 20.25 2 62.55 2 29.56 * 135 10	2.54%	A ation .89% 22 .98% 20 .27% 62 .87% 29 .00%	Adj Adj SS MS .83 11.42 .25 10.12 .55 31.28 .56 14.78	F- P- Value Value 0.77 0.564 0.68 0.594 2.12 0.321	2.0968 82 Analysis of T Source A B C Residual Error Total	.67% 3 Variance f DF So 2 2 2 2 2 2	0.69% for SN ratio eq SS Adj 9.499 9.4 9.423 9.4 3.032 23.0 8.793 8.7 0.748	SS Adj M 99 4.7 23 4.7 32 11.5 93 4.3	AS F F 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483 16 2.62 0.276 96
3.8445 ⁻ aalysis o Source A B C Error Total	F8.13% 1 f Variance Seq DF SS 2 22.83 2 20.25 2 62.55 2 29.56 8 135.19	2.54% <u>Contribu</u> 16 14 46 21 100	4 ation .89% 22 .98% 20 .27% 62 .87% 29 .00%	Adj Adj SS MS .83 11.42 .25 10.12 .55 31.28 .56 14.78	F- P- Value Value 0.77 0.564 0.68 0.594 2.12 0.321	2.0968 82 Analysis of Source A B C Residual Error Total	.67% 3 Variance 1 DF Sc 2 2 2 2 2 2 2 8 5	0.69% For SN rational state of the second stat	SS Adj M 99 4.7 23 4.7 32 11.5 93 4.3	<u>MS F F</u> 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483 16 2.62 0.270 96
3.8445 ⁻ alysis o Source A B C Error Total sponse	F8.13% 1 f Variance Seq DF SS 2 22.83 2 20.25 2 62.55 2 29.56 8 135.19 Table for M	2.54% <u>Contribu</u> 16 14 46 21 100 Means	A ation .89% 22 .98% 20 .27% 62 .87% 29 .00%	Adj Adj SS MS .83 11.42 .25 10.12 .55 31.28 .56 14.78	F- P- Value Value 0.77 0.564 0.68 0.594 2.12 0.321	2.0968 82 Analysis of T Source A B C Residual Error Total Response T	.67% 3 Variance f 2 2 2 2 2 8 5 'able for S	0.69% For SN ratio eq SS Adj 9.499 9.4 9.423 9.4 9.423 9.4 8.793 8.7 0.748 0.748	os <u>SS</u> Adj N 99 4.7 23 4.7 132 11.5 93 4.3 Dise Ratio	<u>AS F F</u> 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483 16 2.62 0.276 96 os
3.8445 - alysis o Source A B C Error Total sponse Level	78.13% 1 f Variance Seq DF SS 2 22.83 2 20.25 2 20.25 2 29.56 8 135.19 Table for M A B	2.54% <u>Contribu</u> 16 14 46 21 100 Means <u>C</u>	4 1tion .89% 22 .98% 20 .27% 62 .87% 29 .00%	Adj Adj SS MS .83 11.42 .25 10.12 .55 31.28 .56 14.78	F- P- Value Value 0.77 0.564 0.68 0.594 2.12 0.321	2.0968 82 Analysis of T <u>Source</u> A B C Residual Error Total Response T Smaller is be	.67% 3 Variance f DF S 2 2 2 2 2 2 2 8 5	0.69% For SN ratio eq SS Adj 9.499 9.4 9.423 9.4 3.032 23.0 8.793 8.7 0.748	os <u>SS Adj N</u> 99 4.7 23 4.7 32 11.5 93 4.3 Dise Ratio	AS F F 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483 16 2.62 0.270 96
3.8445 - alysis o Source A B C Error Total sponse Level 1 1	F8.13% 1 f Variance Seq DF SS 2 22.83 2 20.25 2 62.55 2 29.56 8 135.19 Table for M A B 4.72 13.51	2.54% <u>Contribu</u> 16 14 46 21 100 Means <u>C</u> 17.77	4 1tion .89% 22 .98% 20 .27% 62 .87% 29 .00%	Adj Adj SS MS .83 11.42 .25 10.12 .55 31.28 .56 14.78	F- P- Value Value 0.77 0.564 0.68 0.594 2.12 0.321	2.0968 82 Analysis of T <u>Source</u> A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level	.67% 3 Variance f DF S 2 2 2 2 2 2 2 8 5	0.69% For SN ratio eq SS Adj 9.499 9.4 9.423 9.4 3.032 23.0 8.793 8.7 0.748	os <u>SS Adj N</u> 99 4.7 23 4.7 32 11.5 93 4.3 Dise Ratio	AS F F 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483 16 2.62 0.270 96
3.8445 - alysis o Source A B C Error Total sponse Level 1 1 2 1	F8.13% 1 f Variance Seq DF SS / 2 22.83 2 20.25 2 62.55 2 29.56 8 135.19 Table for M A B 4.72 13.51 6.34 16.63	2.54% <u>Contribu</u> 16 14 46 21 100 Means <u>C</u> 17.77 14.44	4 1tion .89% 22 .98% 20 .27% 62 .87% 29 .00%	Adj Adj <u>SS MS</u> .83 11.42 .25 10.12 .55 31.28 .56 14.78	F- P- Value Value 0.77 0.564 0.68 0.594 2.12 0.321	2.0968 82 Analysis of Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1	.67% 3 Variance f DF S 2 2 2 2 2 2 8 5 'able for S : etter A -23.04 -	0.69% For SN ratio eq SS Adj 9.499 9.4 9.423 9.4 3.032 23.0 8.793 8.7 0.748	DS <u>SS</u> Adj N 99 4.7 23 4.7 32 11.5 93 4.3 Dise Rational <u>C</u> 24.92	AS F F 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483 16 2.62 0.270 96
3.8445 alysis o Source A B C Error Total sponse Level 1 1 2 1 3 1	78.13% 1 f Variance Seq DF SS (1000) 2 22.83 2 20.25 2 62.55 2 29.56 8 135.19 Table for M A B 4.72 13.51 6.34 16.63 2.46 13.39	2.54% Contribu 16 14 46 21 100 Means <u>C</u> (7.77 4.44 1.31	Antion .89% 22 .98% 20 .27% 62 .87% 29 .00%	Adj Adj <u>SS MS</u> .83 11.42 .25 10.12 .55 31.28 .56 14.78	F- P- Value 0.77 0.564 0.68 0.594 2.12 0.321	2.0968 82 Analysis of T Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is be Level 1 2	.67% 3 Variance f DF S 2 2 2 2 2 2 8 5 Cable for S ctter A -23.04 -24.10	0.69% For SN ratio eq SS Adj 9.499 9.4 9.423 9.4 3.032 23.0 8.793 8.7 0.748	SS Adj N 99 4.7 23 4.7 32 11.5 93 4.3 Dise Ratio C 24.92 22.82	AS F F 50 1.08 0.481 12 1.07 0.483 16 2.62 0.270 96

Tabla 56. C5.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa corazón en acabado (Contour area).

Anexo C6. Respuestas de acabado (Flowcut ref tool) en placa corazón

Tabla 57. C6.1. Análisis de varianza para medias y S/N de energía consumida para placa corazón en acabado(Flowcut ref tool).

mica mou	el Analysis:	: Means v	ersus A	, B, C		Linear Mod	el Analysi	is: SN rati	os versus	A, B, C
Estimated N	Model Coef	ficients fo	or Mean	s		Estimated M	Model Co	efficients	for SN rati	ios
Term	Coef S	E Coef	Т	Р		Term	Coef	SE Coef	Т	Р
Constant	442.082	6.086	72.641	0.000		Constant	-52.6459	0.2008	-262.145	0.000
A 1	139.902	8.607	16.255	0.004		A 1	-2.6357	0.2840	-9.280	0.011
A 2	-30.502	8.607	-3.544	0.071		A 2	0.4128	0.2840	1.453	0.283
B 1	42.974	8.607	4.993	0.038		B 1	-0.8469	0.2840	-2.982	0.096
B 2	-25.357	8.607	-2.946	0.098		B 2	0.5396	0.2840	1.900	0.198
C 1	15.577	8.607	1.810	0.212		C 1	-0.2357	0.2840	-0.830	0.494
C 2	7.969	8.607	0.926	0.452		C 2	-0.1516	0.2840	-0.534	0.647
Model Sum	mary					Model Sum	mary			
c		a (adi)				6	D 6	aladi)		
10 2574.0	$\frac{\mathbf{K} - \mathbf{S}\mathbf{Q} + \mathbf{K} - \mathbf{S}\mathbf{C}}{\mathbf{N} - \mathbf{S}\mathbf{C}}$	$\frac{1(au)}{7550}$				0.6025.08	$\frac{\mathbf{x}-\mathbf{y}}{\mathbf{y}}$	q(au)		
18.2374 9	9.3970 9	1.5570				0.0023 98	.22/0 9	2.9070		
	¥7 •									
Inalysis of	Variance					Analysis of	Variance	tor SN rat	105	
				A	Adj F- I	P- Source	DF S	eq SS Ad	j SS Adj N	AS F P
Source D	F Seq SS C	ontributio	on Adj	SS N	MS Value Valu	ie A	2 36	5.1753 36.1	753 18.08	76 49.83 0.020
А	2 97414	89.32	2% 9741	3.6 4870	6.8 146.12 0.00)7 B	2 3	3.3087 3.3	087 1.65	43 4.56 0.180
В	2 8400	7.70	% 840	0.2 420	0.1 12.60 0.07	74 C	2 (0.6855 0.6	855 0.34	27 0.94 0.514
С	2 2582	2.37	258	1.8 129	0.9 3.87 0.20	05 Residual	2 (0.7260 0.7	260 0.36	30
Error	2 667	0.61	% 66	6.7 33	3.3	Error				
-	0 1000 15	100.00	1%			Total	8 40).8953		
Total	8 109062	100.00								
Total	8 109062					Response T	able for S	ignal to N	loise Rati	0.5
Total Response T	8 109062 `able for Me	eans				Response T	able for S	ignal to N	loise Ratio	08
Total Response T Level 1 585	8 109062 `able for Me 2 0 485 1 45 [°]	eans $\frac{C}{77}$				Response T Smaller is be	able for S	ignal to N	loise Ratio	08
Total Response T Level 1 582 2 411	8 109062 `able for Me A B 2.0 485.1 45' 1.6 416 7 45'	eans $\frac{\mathbf{C}}{7.7}$ 0.1				Response T Smaller is be Level	able for S	ignal to N E	loise Ratio	05
Total Response T <u>Level</u> 1 582 2 411 3 333	8 109062 `able for Me A B 2.0 485.1 45' 1.6 416.7 450 2.7 424 5 41	eans <u>C</u> 7.7 0.1				Response T Smaller is be Level	tter -55.28	ignal to N E	Noise Ratio	05 2
Total Response T <u>Level</u> 1 582 2 411 3 332 Delta 249	8 109062 `able for Me A B 2.0 485.1 45' 1.6 416.7 456 2.7 424.5 418 0.3 68 3 33	C 7.7 0.1 8.5				Response T Smaller is be <u>Level</u> 1 2	able for S tter -55.28 -52.23	ignal to N E -53.49 -52.11	Ioise Ratio	05
Total Response T <u>Level</u> 1 582 2 411 3 332 Delta 249 Papele	8 109062 `able for Me A B 2.0 485.1 45' 1.6 416.7 450 2.7 424.5 418 9.3 68.3 39 1 2	C 7.7 0.1 8.5 9.1				Response T Smaller is be Level 1 2 3	A -55.28 -52.23 -50.42	ignal to N -53.49 -52.11 -52.34	Ioise Ratio	05
Total Response T <u>Level</u> 1 582 2 411 3 332 Delta 249 Rank	8 109062 `able for Me A B 2.0 485.1 45' 1.6 416.7 450 2.7 424.5 418 9.3 68.3 39 1 2	E C 7.7 0.1 8.5 9.1 3				Response T Smaller is be Level 1 2 3 Delta	A -55.28 -52.23 -50.42 4.86	ignal to N -53.49 -52.11 -52.34 1.39	Joise Ratio C -52.88 -52.80 -52.26 0.62	

	1. CALL 1	• 1 1	$1 1 (\Gamma 1) (C + 1)$
Iabla X Ib / Aballsis de varianza b	ατα πραιας ν Ν/Ν αρ πρηρο α	e maauinaao nara niaca coraz	$on \rho n a canadol Flow cut ret tool)$
abla 50. Co.2. Intalisis de Vallada p	a meanas y son de nempo a	e maganado para praca coraz	on en acabaao(1 to nem rej toot).

T.

Linear Mod	el Analve	is Means	versus A	BC			Linear Mod	lel Analve	is: SN ratio	s versue A	BC
Estimated M	Aodel Co	efficients i	for Means	2,0			Estimated	Model Co	efficients fo	or SN ratio	, <i>2</i> , 0 os
Term	Coef	SE Coef	Т	Р			Term	Coef	SE Coe	f T	' P
Constant	3848.00	21.51	178.932	0.000	-		Constant	-71.3020	0.156	4 -455.995	0.000
A 1	1573.33	30.41	51.732	0.000			A 1	-3.3611	0.221	1 -15.200	0.004
A 2	-423.67	30.41	-13.930	0.005			A 2	0.6626	0.221	1 2.996	0.096
B 1	404.00	30.41	13.284	0.006			B 1	-0.9104	0.221	1 -4.117	0.054
B 2	-176.33	30.41	-5.798	0.028			B 2	0.4249	0.221	1 1.921	0.195
C 1	114.67	30.41	3.770	0.064			C 1	-0.1517	0.221	1 -0.686	0.564
C 2	76.33	30.41	2.510	0.129			C 2	-0.1673	0.221	1 -0.757	0.528
Model Sumr	mary						Model Sum	mary			
	D (D	0 (1)						D O D O	< 1 •		
S	K-Sq K-	Sq(adj)					$\frac{S}{0.4(01.00)}$	R-Sq R-S	q(adj)		
04.3101 95	9.94%	99./4%					0.4091 95	9.29%0 5	/.15%0		
Analysis of V	Variance						Analysis of	Variance	for SN rati	os	
						F- P-	Source	DF Seq	SS Adj SS	5 Adj MS	F P
Source D	F Seq S	SS Contrib	ution A	dj SS	Adj MS	Value Value	А	2 57.0	555 57.0555	5 28.5278 1	29.64 0.008
А	2 119298	14 92	2.89% 119	29814	5964907	1433.07 0.001	В	2 3.7	351 3.7351	1.8675	8.49 0.105
В	2 73842	25	5.75% 7	38425	369212	88.70 0.011	С	2 0.4	584 0.4584	0.2292	1.04 0.490
С	2 1663	59 í	1.30% 1	66369	83184	19.99 0.048	Residual	2 0.4	401 0.4401	0.2201	
Error	2 83	25 (0.06%	8325	4162		Error				
Total	8 1284293	32 10	0.00%				Total	8 61.6	891		
Response T	able for N	Aeans					Response 7	fable for S	ignal to N	oise Ratio	s
Level	A B	С					Smaller is be	etter			
1 542	21 4252 39	063					Level	А	В	С	
2 342	24 3672 39	024					$\frac{1}{1}$	-74.66	-72.21	-71.45	
3 269	08 3620 30	557					2	-70.64	-70.88	-71.47	
Delta 272	23 632 3	306					3	-68.60	-70.82	-70.98	
Rank	1 2	3					Delta	6.06	1.40	0.49	
							Rank	1	2	3	

Tabla 59. C6.3. Análisis de varianza para medias y S/N del desgaste de herramienta para placa corazón en acabado (Flowcut ref tool).

stimated M	lodel Coeffi	cients for	Means			Estimated M	Iodel Coef	ficients for	SN ratio	os
Term	Coef S	E Coef	т	Р)	Term	Coef	SE Coef	т	Р
Constant	10.054	4.314	2.331	0.145	5	Constant	-17.7581	3.213	-5.527	0.031
A 1	-4.728	6.100	-0.775	0.519)	A 1	3.8129	4.544	0.839	0.490
A 2	5.026	6.100	0.824	0.497	7	A 2	-2.9113	4.544	-0.641	0.587
B 1	-1.968	6.100	-0.323	0.778	3	B 1	1.1044	4.544	0.243	0.831
B 2	-1.651	6.100	-0.271	0.812	2	B 2	-0.5845	4.544	-0.129	0.909
C 1	5.569	6.100	0.913	0.458	3	C 1	-2.8885	4.544	-0.636	0.590
C 2	-4.018	6.100	-0.659	0.578	3	C 2	2.4878	4.544	0.547	0.639
Iodel Sumn	nary					Model Sum	nary			
s		(adi)				S I		(adi)		
	n-99 n-99(aujj				5 1	х-эд к-эд	(auj)		
12 9405 51	16% 0	00%				9 6 3 9 7 3 9	44% 0	00%		
12.9405 51	.16% 0.0	00%				9.6397 39.	44% 0.	.00%		
12.9405 51 nalysis of V	.16% 0.4	00%	Adi	A .4:	E D	9.6397 39. Analysis of V	44% 0 Variance fo	.00% or SN ratio	6 6 A J: M	се Б
12.9405 51 nalysis of V	.16% 0.4 Variance Seq	00%	Adj	Adj MS V	F- P-	9.6397 39. Analysis of V Source	44% 0. Variance for DF Sec 2 71	.00% or SN ratio q SS Adj S	s S Adj M	[S F]
12.9405 51 nalysis of V Source DF	.16% 0.4 Variance Seq <u>5 SS Cor</u> 2 143 09	00% ntributior 20 87%	Adj SS 143.09	Adj MS V 71.55	F- P- Value Value	9.6397 39. Analysis of V Source A B	44% 0 Variance fo <u>DF Sec</u> 2 71 2 5	.00% or SN ratio q SS Adj S .480 71.48	s <u>S Adj M</u> 30 35.74	S F 10 0.38 0.72
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2	.16% 0.4 Variance Seq <u>5 SS Cor</u> 2 143.09 2 59.08	00% ntributior 20.87% 8.62%	Adj <u>SS</u> 0 143.09 0 59.08	Adj MS V 71.55 29.54	F- P- Value Value 0.43 0.701 0.18 0.850	9.6397 39. Analysis of V Source A B C	44% 0 Variance fo DF Sec 2 71 2 5 2 44	.00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44 08	s S Adj M 30 35.74 15 2.74 30 22.04	S F 0 0.38 0.72 7 0.03 0.97 0 0 24 0 80
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2	.16% 0.4 Variance Seq 7 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68	00% ntribution 20.87% 8.62% 21.68%	Adj SS 143.09 59.08 148.68	Adj MS V 71.55 29.54 74.34	F- P- <i>Yalue Value</i> 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual	44% 0 Variance fo DF Sec 2 71 2 5 2 44 2 185	00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 .846 185 84	s <u>S</u> Adj M 30 35.74 15 2.74 30 22.04 6 92 92	S F 10 0.38 0.72 17 0.03 0.97 10 0.24 0.80
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2 Error 2	.16% 0.4 Variance Seq 5 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91	ntributior 20.87% 8.62% 21.68% 48.84%	Adj 58 143.09 59.08 148.68 148.68	Adj MS V 71.55 29.54 74.34	F- P- Value Value 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error	44% 0 Variance fo DF Sec 2 71 2 5 2 44 2 185	.00% or SN ratio q SS Adj S .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 .846 185.84	s S Adj M 30 35.74 35 2.74 30 22.04 36 92.92	S F 1 10 0.38 0.72 17 0.03 0.97 10 0.24 0.80 13 3 3
12.9405 51 nalysis of V Source DF A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8	.16% 0.4 Variance Seq 5 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91 3 685.77	00% ntribution 20.87% 8.62% 21.68% 48.84% 100.00%	Adj SS 5143.09 59.08 148.68 334.91 1	Adj MS V 71.55 29.54 74.34 167.46	F- P- Value Value 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error Total	44% 0 Variance fo DF Sec 2 71 2 5 2 44 2 185 8 306	00% or SN ratio q SS Adj S .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 5.846 185.84 5.901	s S Adj M 30 35.74 30 22.04 30 22.02 30 92.92	S F 100.380.72 170.030.97 100.240.80 23
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8	.16% 0.4 Variance Seq 5 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91 3 685.77	00% ntribution 20.87% 8.62% 21.68% 48.84% 100.00%	Adj SS 143.09 59.08 148.68 334.91 1	Adj MS V 71.55 29.54 74.34 167.46	F- P- 7alue Value 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error Total	44% 0 Variance fo DF Sec 2 71 2 5 2 44 2 185 8 306	.00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 .846 185.84 .901	S Adj M 30 35.74 25 2.74 30 22.04 46 92.92	SF 10 0.38 0.72 17 0.03 0.97 10 0.24 0.80 23
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8	.16% 0.4 Variance Seq 5 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91 3 685.77 ble for Mea	ntribution 20.87% 8.62% 21.68% 48.84% 100.00%	Adj SS 143.09 59.08 148.68 334.91 1	Adj MS V 71.55 29.54 74.34 167.46	F- P- Value Value 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T	44% 0 Variance fo DF Sec 2 71 2 5 2 44 2 185 8 306 able for Sig	00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 .846 185.84 .901 gnal to No	s S Adj M 30 35.74 35 2.74 30 22.04 36 92.92 38 Ratio	S F 1 10 0.38 0.72 17 0.03 0.97 10 0.24 0.80 23 s
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 tesponse Ta Level	.16% 0.4 Variance Seq 5 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91 3 685.77 bble for Mea A B	00% ntribution 20.87% 8.62% 21.68% 48.84% 100.00% ms <u>C</u>	Adj 58 143.09 59.08 148.68 334.91 1	Adj MS V 71.55 29.54 74.34 167.46	F- P- 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is ber	44% 0 Variance fo DF Sec 2 71 2 5 2 44 2 185 8 306 able for Sig	00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 .846 185.84 .901 gnal to No	s <u>S</u> Adj M 30 35.74 35 2.74 30 22.04 36 92.92 ise Ratio	S F D 0.38 0.72 D 0.38 0.72 D 0.03 0.97 D 0.24 0.80 D 0.24 0.80 S S
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 tesponse Ta Level 1 5.3	.16% 0.4 Variance Seq 5 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91 3 685.77 bble for Mea A B 27 8.087 15	ntributior 20.87% 8.62% 21.68% 48.84% 100.00% ms <u>C</u> 5.623	Adj 58 143.09 59.08 148.68 334.91 1	Adj MS V 71.55 29.54 74.34 167.46	F- P- Value Value 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is ber Level	44% 0 Variance for 2 71 2 5 2 44 2 185 8 306 able for Sig tter A	00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 5.846 185.84 5.901 gnal to Nor B	s <u>S</u> Adj M 30 35.74 35 2.74 30 22.04 30 22.04 35 6 92.92 35 6 8 6 8 6 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	S F 1 0 0.38 0.72 7 0.03 0.97 10 0.24 0.80 23 s
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 tesponse Ta Level 1 5.3 2 15.0	.16% 0.4 Variance Seq 5 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91 3 685.77 ble for Mea A B 27 8.087 15 80 8.403 (ntributior 20.87% 8.62% 21.68% 48.84% 100.00% ms <u>C</u> 5.623 5.037	Adj 58 143.09 59.08 148.68 334.91 1	Adj MS V 71.55 29.54 74.34 167.46	F- P- Value Value 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is ber Level 1	44% 0 Variance for 2 71 2 5 2 44 2 185 8 306 able for Sig tter A -13.95	00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 5.846 185.84 5.901 gnal to No <u>B</u> -16.65	s <u>S</u> Adj M 30 35.74 30 22.04 30 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	S F 10 0.38 0.72 77 0.03 0.97 70 0.24 0.80 23 s
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 eesponse Ta 1 1 5.3 2 15.0 3 9.7	.16% 0.4 Variance Seq 7 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91 3 685.77 ble for Mea A B 27 8.087 15 80 8.403 (57 13.673 8	ntributior 20.87% 8.62% 21.68% 48.84% 100.00% ms <u>C</u> 5.623 5.037 3.503	Adj 58 59.08 59.08 59.08 148.68 334.91 1	Adj MS V 71.55 29.54 74.34 167.46	F- P- Value Value 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet Level 1 2	44% 0 Variance for DF Sec 2 71 2 5 2 44 2 185 8 306 able for Sig tter A -13.95 -20.67	.00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 .846 185.84 .901 gnal to No <u>B</u> -16.65 -18.34	s <u>S</u> Adj M 30 35.74 30 22.04 30	S F 10 0.38 0.72 17 0.03 0.97 10 0.24 0.80 23 s
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 cesponse Ta 1 Level 1 5.3 2 15.0 3 9.7 Delta 9.7 9.7	.16% 0.4 Variance Seq 7 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91 3 685.77 ble for Mea A B 27 8.087 15 980 8.403 0 57 13.673 8 53 5.587 9	ntributior 20.87% 8.62% 21.68% 48.84% 100.00% ms <u>C</u> 5.623 5.037 3.503 0.587	Adj 58 143.09 59.08 148.68 334.91 1	Adj MS V 71.55 29.54 74.34 167.46	F- P- Value Value 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet Level 1 2 3	44% 0 Variance for DF Sec 2 71 2 5 2 44 2 185 8 306 able for Sig tter A -13.95 -20.67 -18.66	.00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 .846 185.84 .901 gnal to No <u>B</u> -16.65 -18.34 -18.28	s <u>S</u> Adj M 30 35.74 30 22.04 30 22.04 30 22.04 30 22.04 30 22.04 31 20 -20.65 -15.27 -17.36	S F 1 0 0.38 0.72 7 0.03 0.97 10 0.24 0.80 23 s
12.9405 51 nalysis of V Source DH A 2 B 2 C 2 Error 2 Total 8 esponse Ta Level 1 5.3 2 15.0 3 9.7 Delta 9.7 Rank	.16% 0.4 Variance Seq 7 SS Cor 2 143.09 2 59.08 2 148.68 2 334.91 3 685.77 ble for Mea A B 27 8.087 15 980 8.403 0 57 13.673 8 5.587 9 1 3	ntributior 20.87% 8.62% 21.68% 48.84% 100.00% ms <u>C</u> 5.623 5.037 3.503 0.587 2	Adj 58 143.09 59.08 148.68 334.91 1	Adj MS V 71.55 29.54 74.34 167.46	F- P- Value Value 0.43 0.701 0.18 0.850 0.44 0.693	9.6397 39. Analysis of V Source A B C Residual Error Total Response T Smaller is bet Level 1 2 3 Delta	44% 0 Variance for DF Sec 2 71 2 5 2 44 2 185 8 306 able for Sig tter A -13.95 -20.67 -18.66 6.72	00% or SN ratio <u>q SS Adj S</u> .480 71.48 .495 5.49 .080 44.08 .846 185.84 .901 gnal to No <u>B</u> -16.65 -18.34 -18.28 1.69	s S Adj M 30 35.74 35 2.74 30 22.04 36 92.92 38 Ratio C -20.65 -15.27 -17.36 5.38	S F 1 0 0.38 0.72 7 0.03 0.97 0 0.24 0.80 23 s

Tabla 60. C6.4. Análisis de varianza para medias y S/N de rugosidad superficial para placa corazón en acabado.

Estimated N	Iodel Coeffic	cients for Me	eans			Estimated	l Model	Coefficie	ents fo	SN rat	ios	
Term	Coef	SE Coef	Т	Р	1	Term	(Coef SE	Coef	Т	Р	
Constant	0.54722	0.07488	7.308	0.018	-	Constan	nt 5.9	932	1.022	5.865	0.028	•
A 1	0.01711	0.10590	0.162	0.886		A 1	0.2	2394	1.445	0.166	0.884	
A 2	-0.04689	0.10590	-0.443	0.701		A 2	0.3	8064	1.445	0.212	0.852	
B 1	-0.24989	0.10590	-2.360	0.142		B 1	4.5	5898	1.445	3.176	0.086	
B 2	0.06544	0.10590	0.618	0.600	1	B 2	-1.5	5567	1.445	-1.077	0.394	
C 1	-0.02322	0.10590	-0.219	0.847		C 1	0.4	308	1.445	0.298	0.794	
C 2	-0.05822	0.10590	-0.550	0.638		C 2	0.5	5704	1.445	0.395	0.731	
Iodel Sum	nary					Model Su	mmary					
5 1	R-Sa R-Sa(a	4i)				s	R-Sa I	R-Saladi)			
5 1	x-34 x-34(a	<u></u>				3	K-34 I	x-sy(au)	,			
0.2247 77.	32% 9.27	7%				3.0654	84.69%	38.76%	6			
0.2247 77.	32% 9.27	70/0				3.0654	84.69%	38.76%	0			
0.2247 77.	32% 9.27 Variance	70%				3.0654 Analysis o	84.69% of Varian	38.76%	N ratio	s		
0.2247 77.	32% 9.27 Variance	70/0			F- P-	3.0654 Analysis of	84.69% of Varian	38.76% ce for SI	N ratio	s S Adi I	MS F	
0.2247 77. analysis of V Source D	32% 9.27 Variance	ntribution 4	Adi SS Ad	di MS V	F- P- Value Value	3.0654 Analysis o Source	84.69% of Varian DI	38.76% ce for SI <u>5 Seq SS</u> 2 1 347	N ratio	s S Adj I	MS F 736.0.07.0	<u>Р</u> 933
0.2247 77. analysis of V Source D	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013	ntribution 4 2.28% 0.	Adj SS Ad	dj MS V 05067	F- P- Value Value 0.10 0.909	3.0654 Analysis o Source A B	84.69% of Varian DI	38.76% ce for SP 5 Seq SS 2 1.347 2 98.066	N ratio Adj S 1.34 98.00	s S Adj N 7 0.67	MS F 736 0.07 0	P .933 .161
0.2247 77. analysis of V Source D A B	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224	ntribution A 2.28% 0. 67.92% 0.	Adj SS Ad 01013 0.00 30224 0.1	dj MS V 05067 51121	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250	3.0654 Analysis o Source A B C	of Varian	38.76% ce for SP <u>5 Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4 540	N ratio Adj S 1.34 98.00 4.54	s S Adj N 7 0.67 66 49.03 40 2.27	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0 24 0	P .933 .161
0.2247 77. analysis of V <u>Source D</u> A B C	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169	ntribution A 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0.	Adj SS Ad 01013 0.00 30224 0.1 .03169 0.0	dj MS V 05067 51121 15843	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis o Source A B C Residua	of Varian	38.76% ce for SI <u>5 Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794	N ratio Adj S 1.34 98.00 4.54 18.79	s S Adj I 7 0.67 66 49.03 40 2.27 04 9 39	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0	P .933 .161 .805
0.2247 77. analysis of V <u>Source D</u> A B C Error	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169 2 0.10094	ntribution A 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0. 22.68% 0.	Adj SS Ad 01013 0.0 30224 0.1 .03169 0.0 .10094 0.0	dj MS V 05067 51121 15843 50469	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis o Source A B C Residuz Error	of Varian DI 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2	38.76% ce for SI <u>5 Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794	N ratio Adj S 1.34 98.00 4.54 18.79	s S Adj I 7 0.67 66 49.03 40 2.27 94 9.39	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0 770	P .933 .161 .805
0.2247 77. analysis of V <u>Source D</u> <u>A</u> B C Error Total	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169 2 0.10094 8 0.44500	ntribution A 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0. 22.68% 0. 100.00%	Adj SS Ad 01013 0.0 30224 0.1 03169 0.0 10094 0.0	dj MS V 05067 51121 15843 50469	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis of <u>Source</u> A B C Residua Error Total	84.69% of Varian DI 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	38.76% cc for SN <u>5 Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794 3 122.747	N ratio Adj S 1.3 ² 98.00 4.5 ² 18.79	s <u>S</u> Adj I 7 0.67 6 49.03 0 2.27 9 39	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0 770	P .933 .161 .805
0.2247 77. analysis of V Source D A B C Error Total Response T	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169 2 0.10094 8 0.44500 able for Mea	ntribution A 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0. 22.68% 0. 100.00%	Adj SS Ad 01013 0.0 30224 0.1 03169 0.0 10094 0.0	dj MS V 05067 51121 15843 50469	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis of A B C Residua Error Total	of Varian DI 2 2 1 2 2 2 2 2 3 2 2 3 2 2 3 3 2 2 3 3 3 5 5 5 5	38.76% ce for SI <u>F Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794 3 122.747 or Signal	N ratio Adj S 98.00 4.54 18.79	s <u>S</u> Adj I 7 0.67 6 49.03 40 2.27 44 9.35 ise Rati	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0 070	P .933 .161 .805
0.2247 77. analysis of V Source D A B C Error Total Response T Level	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169 2 0.10094 8 0.44500 able for Mea A B	ntribution A 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0. 22.68% 0. 100.00%	Adj SS Ad 01013 0.00 30224 0.1 .03169 0.0 .10094 0.0	dj MS V 05067 51121 15843 50469	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis of A B C Residuz Error Total Response Smaller is	of Varian DI 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	38.76% ce for SN <u>7 Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794 3 122.747 or Signal	N ratio Adj S 1.34 98.00 4.54 18.79 to No	s <u>S</u> Adj N 7 0.67 56 49.03 40 2.27 94 9.35 ise Rati	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0 070	P .933 .161 .805
0.2247 77. analysis of V <u>Source D</u> <u>A</u> B C Error Total Response T <u>Level</u> <u>1</u> 0.5	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169 2 0.10094 8 0.44500 able for Mea A B 543 0.2973 0.1	ntribution A 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0. 22.68% 0. 100.00%	Adj SS Ad 01013 0.00 30224 0.1 .03169 0.0 .10094 0.0	dj MS V 05067 51121 15843 50469	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis of <u>Source</u> A B C Residuz Error Total Response Smaller is	of Varian DI 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	38.76% ce for SN <u>7 Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794 3 122.747 pr Signal	N ratio Adj S 98.00 4.54 18.79	s <u>S</u> Adj N 7 0.67 56 49.03 40 2.27 94 9.35 ise Rati	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0 070	P
0.2247 77. analysis of V Source D A B C Error Total Response T Level 1 0.5 2 0.5	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169 2 0.10094 8 0.44500 able for Mea A B 543 0.2973 0.3 003 0.6127 0.4	ntribution 4 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0. 22.68% 0. 100.00% ns <u>C</u> 5240 4890	Adj SS Ad 01013 0.00 30224 0.1 .03169 0.0 .10094 0.0	dj MS V 05067 51121 15843 50469	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis of <u>Source</u> A B C Residuz Error Total Response Smaller is <u>Level</u> 1	of Varian DI 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	38.76% ce for SN <u>F Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794 3 122.747 or Signal <u>B</u> 10.583	N ratio Adj S 98.00 4.54 18.79 to No	s <u>S</u> Adj N 7 0.67 56 49.03 10 2.27 04 9.39 ise Rati	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0 070	P .933 .161 .805
Source D Analysis of V Source D A B C Error Total Response T Level 1 0.5 2 0.5 3 0.5	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169 2 0.10094 8 0.44500 able for Mea A B 543 0.2973 0.3 003 0.6127 0.4 770 0.7317 0.6	ntribution 4 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0. 22.68% 0. 100.00% ns <u>C</u> 5240 4890 5287	Adj SS Ad 01013 0.00 30224 0.1 .03169 0.0 .10094 0.0	dj MS V 05067 51121 15843 50469	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis of <u>Source</u> A B C Residuz Error Total Response Smaller is <u>Level</u> 1 2	64.69%	38.76% ce for SN <u>F Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794 3 122.747 or Signal <u>B</u> 10.583 4 436	N ratio Adj S 98.00 4.54 18.79 to No	s <u>S</u> Adj N 7 0.67 56 49.03 10 2.27 04 9.39 ise Rati	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0 070	P .933 .161 .805
B C Error Total Response T 1 1 0.5 3 0.5 Delta 0.0	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169 2 0.10094 8 0.44500 able for Mea A B 543 0.2973 0.3 003 0.6127 0.4 770 0.7317 0.0 767 0.4343 0.5 2 0.277 0.4 3 0.5 2 0.277 0.5 2	ntribution A 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0. 22.68% 0. 100.00% ns <u>C</u> 5240 4890 5287 1397	Adj SS Ad 01013 0.00 30224 0.1 .03169 0.0 .10094 0.0	dj MS V 05067 51121 15843 50469	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis of <u>Source</u> A B C Residuz Error Total Response Smaller is <u>Level</u> 1 2 3	84.69% of Varian DI 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	38.76% ce for SN <u>F</u> Seq SS 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794 3 122.747 or Signal <u>B</u> 10.583 4.436 2 960	V ratio Adj S 98.00 4.54 18.79 to No 6.42 6.56 4.99	s <u>S</u> Adj N 7 0.67 66 49.03 10 2.27 04 9.39 ise Rati	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0 070	P .933 .161 .805
0.2247 77. analysis of V Source D A B C Error Total Response T Level 1 0.5 3 0.5 Delta 0.0 Rank	32% 9.27 Variance F Seq SS Co 2 0.01013 2 0.30224 2 0.03169 2 0.10094 8 0.44500 Able for Mea A B 543 0.2973 0.3 003 0.6127 0.4 770 0.7317 0.4 767 0.4343 0.3 3 1	ntribution 4 2.28% 0. 67.92% 0. 7.12% 0. 22.68% 0. 100.00% ns <u>C</u> 5240 4890 5287 1397 2	Adj SS Ad 01013 0.00 30224 0.1 .03169 0.0 .10094 0.0	dj MS V 05067 51121 15843 50469	F- P- Value Value 0.10 0.909 2.99 0.250 0.31 0.761	3.0654 Analysis of <u>Source</u> A B C Residuz Error Total Response Smaller is <u>Level</u> 1 2 3 Delta	ef Varian Df Varian DI 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	38.76% ce for SN <u>F Seq SS</u> 2 1.347 2 98.066 2 4.540 2 18.794 3 122.747 or Signal <u>B</u> 10.583 4.436 2.960 7 623	V ratio Adj S 98.00 4.54 18.79 to No 6.42 6.56 4.99 1.57	s <u>S</u> Adj N 7 0.67 66 49.03 10 2.27 04 9.39 ise Rati	MS F 736 0.07 0 332 5.22 0 700 0.24 0 070	P .933 .161 .805

Anexo D. Evidencias de resultados experimentales, mecanizados con y sin fluido de corte, estrategias de maquinado.

Anexo D1. Anexo de evidencias de desbaste en placa corazón



Figura D1.1. Estación de trabajo dentro de la máquina herramienta fresadora HAAS al finalizar una corrida experimental sin fluido de corte.



Figura D1.2. Apariencia final en la operación desbaste con estrategia de corte Periferia sin fluido de corte.



Figura D1.3. Apariencia final en la operación desbaste con estrategia de corte Trocoidal sin fluido de corte.



Figura D1.4. Apariencia final en la operación desbaste con estrategia de corte Zigzag sin fluido de corte.



Figura D1.5. Comparación entre estrategias de corte, Periferia vs Zigzag.

Anexo D2. Anexo de evidencias de desbaste en placa cavidad



Figura D2.1. Fin de corrida de desbaste en placa cavidad sin fluido de corte.



Figura D2.2. Desbaste irregular sin fluido de corte en placa cavidad.



Figura D2.3. Apariencia final de una corrida de desbaste irregular sin fluido de corte.



Figura D2.4. Apariencia final de una corrida de desbaste regular sin fluido de corte.



Figura D2.5. Comparación de corridas desbaste sin fluido de corte regular e irregular respectivamente.

Anexo D3. Anexo de evidencias de semi-acabado en placa corazón y cavidad



Figura D3.1. Ejecución de corrida de placa corazón con fluido de corte.



Figura D3.2. Fin de corrida de placa corazón con fluido de corte.



Figura D3.3. Inicio de corrida de placa cavidad con fluido de corte.



Figura D3.4. Fin de corrida de placa cavidad con fluido de corte.



Figura D3.5. Apariencia final de placa cavidad al finalizar semi-acabado.

Anexo D4. Anexo de evidencias de acabado en placa corazón y cavidad



Figura D4.1. Fin de corrida de placa corazón en acabado (Contour area y Flowcut ref tool).



Figura D4.2. Apariencia final de placa corazón al finalizar acabado con fluido de corte



Figura D4.3. Apariencia final de placa corazón después de las 3 operacion

Bibliografía

- [1] Min Kong, Jun Pei, Xinbao Liu, Pei-Chun Lai, & Panos M. Pardalos. (2019). Green manufacturing: Order acceptance and scheduling subject to the budgets of energy consumption and machine launch. *Journal of Cleaner Production*, 248. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119300
- [2] Tao Peng, & Xun Xu. (2017). An interoperable energy consumption analysis system for CNC machining. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1828–1841. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.083
- [3] Luoke Hu, Ying Liu, Chen Peng, Wangchujun Tang, Renzhong Tang, & Ashutosh Tiwari. (2018). Minimising the energy consumption of tool change and tool path of machining by sequencing the features. *Energy*, 147, 390–402. doi: 10.1016/j.energy.2018.01.046
- [4] Tao Peng, Xun Xu, & Lihui Wang. (2014). A novel energy demand modelling approach for CNC machining based on function blocks. *Journal of Manufacturing Systems*, 33, 196–208. doi: 10.1016/j.jmsy.2013.12.004
- [5] Nasir Khalid. (2014). Efficient energy management: is variable frequency drives the solution. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 145, 371–376. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.06.046
- [6] Hae-Sung Yoon, Eun-Seob Kim, Min-Soo Kim, Jang-Yeob Lee, & Gyu-Bong Lee. (2015). Towards greener machine tools–A review on energy saving strategiesand technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 870–891. doi: 10.1016/j.rser.2015.03.100
- [7] Ayudia Prillia, Haris Rachmat, & Tatang Mulyana. (2017). Cost Optimization on Energy Consumption of Punching Machine Based on Green Manufacturing Method at PT Buana Intan Gemilang. EDP Sciences, 135(MATEC Web of Conferences). doi: 10.1051/matecconf/201713500054
- [8] Xianyu Zhang, Xinguo Ming, Zhiwen Liu, Yuanju Qu, & Dao Yin. (2019). General reference model and overall frameworks for green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 237. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117757
- [9] Amine Belhadi, Sachin S. Kamble, Karim Zkik, Anass Cherrafi, & Fatima Ezahra Touriki. (2020). The integrated effect of Big Data Analytics, Lean Six Sigma and Green Manufacturing on the environmental performance of manufacturing companies: The case of North Africa. *Journal of Cleaner Production*, 252. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119903

- [10] Dinesh Seth, Minhaj Ahemad A. Rehman, & Rakesh L. Shrivastava. (2018). Green manufacturing drivers and their relationships for small and medium (SME) and large industries. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1381–1405. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.106
- [11] Benhong Peng, Chaoyu Zheng, Guo Wei, & Ehsan Elahi. (2020). The cultivation mechanism of green technology innovation in manufacturing industry: From the perspective of ecological niche. *Journal of Cleaner Production*, 252. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119711
- [12] Yogesh Bhatt, Karminder Ghuman, & Amandeep Dhir. (2020). Sustainable manufacturing. Bibliometrics and content analysis. *Journal of Cleaner Production*, 260. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120988
- [13] Ampara Aramcharoen, & Paul T. Mativenga. (2014). Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy. *Journal of Cleaner Production*, 78, 63–74. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.065
- [14] Jingxiang Lv, Renzhong Tang, Shun Jia, & Ying Liu. (2016). Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 3864–3874. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.040
- [15] Ramesh S, S Denis Ashok, & Shanmukha Nagaraj. (2018). An Energy Conservation Strategy Using Variable Frequency Drive for a Hydraulic Clamping System in a CNC Machine. *Materials Today: Proceedings*, 5, 13504–13513. doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.346
- [16] Timo Schudeleit, Simon Züs, & Konrad Wegener. (2015). Methods for evaluation of energy efficiency of machine tools. *Energy*, 93, 1964–1970. doi: 10.1016/j.energy.2015.10.074
- [17] Peiji Liu, Fei Liu, & Hang Qiu. (2017). A novel approach for acquiring the real-time energy efficiency of machine tools. *Energy*, *121*, 524–532. doi: 10.1016/j.energy.2017.01.047
- [18] François Malrait, Al Kassem Jebai, & Kamal Ejjabraoui. (2017). Power conversion optimization for hydraulic systems controlled by variable speed drives. *Journal of Process Control*, 74, 133–146. doi: 10.1016/j.jprocont.2017.11.002
- [19] R. A. Faizrakhmanov, R. T. Murzakaev, V. S. Pristupov, & A. N. Polyakov.
 (2017). Optimization of the Energy Consumption of a CNC Machine Cutting Tool with Hard-to-Formalize Restrictions. RUSSIAN ELECTRICAL ENGINEERING, 88. doi: 10.3103/S1068371217110049

- [20] M.P. Sealy, Z.Y. Liu, D. Zhang, Y.B. Guo, & Z.Q. Liu. (2016). Energy consumption and modeling in precision hard milling. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1591–1601. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.094
- [21] Nitesh Sihag, Kuldip Singh Sangwan, & Siddhant Pundir. (2018). Development of a structured algorithm to identify the status of a machine tool to improve energy and time efficiencies. *Procedia CIRP*, 69, 294–299. doi: 10.1016/j.procir.2017.11.081
- [22] Qianqian Zhong, Renzhong Tang, & Tao Peng. (2017). Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1819–1827. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.084
- [23] Lirong Zhou, Jianfeng Li, Fangyi Li, Qiang Meng, Jing Li, & Xingshuo Xu. (2016). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3721–3734. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.093
- [24] Chen Peng, Luoke Hu, Steve Evans, Tao Peng, Ying Liu, Renzhong Tang, & Ashutosh Tiwari. (2017). Minimising the machining energy consumption of a machine tool bysequencing the features of a part. *Energy*, 121, 292–305. doi: 10.1016/j.energy.2017.01.039
- [25] Gideon Edgar Du Plessis, Leon Liebenberg, & Edward Henry Mathews. (2013). The use of variable speed drives for cost-effective energy savings in South African mine cooling systems. *Applied Energy*, 111, 16–27. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.04.061
- [26] Ashutosh Kumar Singh, Deepak Singhal, & Ramanuj Kumar. (2020). Machining of aluminum 7075 alloy using EDM process: An ANN validation. *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.591
- [27] J.T. Wang, L. Xie, & K.Y. Luo. (2018). Improving creep properties of 7075 aluminum alloy by laser shock peening. *Surface & Coatings Technology*, 349(725). doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.06.061
- [28] G.Y. Zhao, Z.Y. Liu, Y. He, H.J. Cao, & Y.B. Guo. (2017). Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy. *Energy*, *133*, 142–157. doi: 10.1016/j.energy.2017.05.110
- [29] Étory Madrilles Arruda, Anderson Paulo de Paiva, & João Roberto Ferreira. (2019). Robust optimisation of surface roughness of AISI H13 hardened steel in the finishing milling using ball nose end mills. *Precision Engineering*, 60, 194–214. doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.07.013

- [30] Bin Guan, Mark Cherrill, Jing-Hong Pai, & Craig Priest. (2019). Effect of mould roughness on injection moulded poly (methyl methacrylate) surfaces: Roughness and wettability. *Journal of Manufacturing Processes*, 48, 313–319. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.10.024
- [31] Francesco Gabriele Galizia, WaguihElMaraghy, Hoda ElMaraghy, Marco Bortolini, & Cristina Mora. (2019). The evolution of molds in manufacturing: from rigid to flexible. *Procedia Manufacturing*, 33, 319–326. doi: 10.1016/j.promfg.2019.04.039
- [32] Andreas Klink, Maximilian Holsten, & Thoma Bergs. (2018). Technologybased assessment of subtractive machining processes for mold manufacture. *Procedia CIRP*, 71, 401–406. doi: 10.1016/j.procir.2018.05.052
- [33] Gandjar Kiswanto, Maulana Azmi, & Ignatia Averina. (2018). Optimizing micro milling energy consumption for green manufacturing based on cutting strategies. *EDP Sciences*, 67(E3S Web Conf.). doi: 10.1051/e3sconf/20186702055
- [34] Lingling Li, Congbo Li, Ying Tang, & Qian Yi. (2017). Influence factors and operational strategies for energy efficiency improvement of CNC machining. *Journal of Cleaner Production*, *161*, 220–238. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.084
- [35] Hong-seok Park, Bowen Qi, Duck-Viet Dang, & Dae Yu Park. (2018). Development of smart machining system for optimizing feed rates to minimize machining time. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5, 299–304. doi: 10.1016/j.jcde.2017.12.004
- [36] Xuewei Zhang, Tianbiao Yu, Yuanxing Dai, & Ji Zhao. (2020). Energy consumption considering tool wear and optimization of cutting parameters in micro milling process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 178. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105628
- [37] Andreas Wirtz, Matthias Meißner, Petra Wiederkehr, & Johanna Myrzik. (2018). Simulation-assisted investigation of the electric power consumption of milling processes and machine tools. *Procedia CIRP*, 67, 87–92. doi: 10.1016/j.procir.2017.12.181
- [38] Andrea Wirtz, Matthias Meißner, Petra Wiederkehr, Dirk Biermann, & Johanna Myrzik. (2019). Evaluation of cutting processes using geometric physicallybased process simulations in view of the electric power consumption of machine tools. *Procedia CIRP*, 79, 602–607. doi: 10.1016/j.procir.2019.02.083
- [39] Zhaohui Deng, Hua Zhang, Yahui Fu, Linlin Wan, & Wei Liu. (2017). Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on

cutting specific energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1407–1414. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.022

- [40] Wael Mersni, Mohamed Boujelbene, Sahbi Ben Salem, & H.P. Singh. (2020). Machining time and quadratic mean roughness optimization in ball end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V – Aeronautic field. *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.553
- [41] S.P. Leo Kumar. (2018). Experimental investigations and empirical modeling for optimization of surface roughness and machining time parameters in micro end milling using Genetic Algorithm. *Measurement*, 124, 386–394. doi: 10.1016/j.measurement.2018.04.056
- [42] A.V. Antsev. (2019). Cutting tool life prediction in case of rough machining by the fracture model. *Materials Today: Proceedings*, 19, 2148–2151. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.229
- [43] Amin Dadgari, Dehong Huo, & David Swailes. (2018). Investigation on tool wear and tool life prediction in micro-milling of Ti-6Al-4V. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 1(4), 218–225. doi: 10.1016/j.npe.2018.12.005
- [44] Muhammad Qaiser Saleem, & Salman Mumtaz. (2020). Face milling of Inconel 625 via wiper inserts: Evaluation of tool life and workpiece surface integrity. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 322–336. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.011
- [45] Katarina Monkova, Peter Pavol Monka, & Sergej Hloch. (2020). Durability and tool wear investigation of HSSE-PM milling cutters within long-term tests. *Engineering Failure Analysis*, 108. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104348
- [46] Hai Li, Wei Wang, Ziwei Li, Liyi Dong, & Qingzhao Li. (2020). A novel approach for predicting tool remaining useful life using limited data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 143. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106832
- [47] Xuefeng Wu, & Xuefeng Yin. (2018). Surface Roughness Analysis and Parameter Optimization of Mold Steel Milling. *Procedia CIRP*, 71, 317–321. doi: 10.1016/j.procir.2018.05.032
- [48] Akash Sharma, & V.K. Dwivedi. (2019). Effect of milling parameters on surface roughness: An experimental investigation. *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.256
- [49] Laura Peña-Parás, Demófilo Maldonado-Cortés, & Gabriela Trousselle.
 (2019). Optimization of milling parameters of 1018 steel and nanoparticle additive concentration in cutting fluids for enhancing multi-response

characteristics. Wear, 426-427, 877-886. doi: 10.1016/j.wear.2019.01.078

- [50] Ravikumar D Patel, & Sanket N Bhavsar. (2020). Experimental investigation during end milling of AISI D2 tool steel using AlCrN coated tool. *Materials Today: Proceedings*, 22, 2647–2656. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.396Get
- [51] Jonas Holmberg, Anders Wretland, JohanBerglund, & Tomas Beno. (2020). A detailed investigation of residual stresses after milling Inconel 718 using typical production parameters for assessment of affected depth. *Materials Today: Communications, 24.* doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.100958
- [52] K. Aslantas, E. Ekici, & A. Çiçek. (2018). Optimization of process parameters for micro milling of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi-based gray relational analysis. *Measurement*, *128*, 419–427. doi: 10.1016/j.measurement.2018.06.066
- [53] Steven Y. Liang, & Albert J. Shih. (2016). Analysis of Machining and Machine Tools. New York: Springer. doi: 10.1007/978-1-4899-7645-1
- [54] Roy, R.K. (2001). Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [55] Paramjit Singh Bilga, Sehijpal Singh, & Raman Kumar. (2016). Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1406–1417. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.220
- [56] Teruo Mori, PhD, PE. (2011). *Taguchi Methods; Benefits, Impacts, Mathematics, Statistics, and Applications*. (Shih-Chung Tsai, PhD, CQE, Trans.). New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- [57] Genichi Taguchi. (1993). Taguchi on Robust Technology Development; Bringing Quality Engineering Upstream. (Shih Chung Tsai, Trans., K. M. Ragsdell, University of Missouri, Ed.). New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- [58] Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, & Yuin Wu. (2005). Taguchi's Quality Engineering Handbook. (Shin Taguchi & Hiroshi Yano, Eds.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [59] Dehnad, K. (1989). Quality Control, Robust Design and the Taguchi Method. California: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software Pacific Grove. doi:10.10071978-1-4684-1472-1
- [60] Ruefer, H. (n.d.). *Living Without Mathematical Statistics*. Burghausen, Germany: Springer. doi:10.1007/978-3-319-99632-5

- [61] Carmita Camposeco-Negrete. (2013). Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. *Journal of Cleaner Production*, 53, 195–203. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.03.049
- [62] Seung-Jun Shin, Jungyub Woo, & Sudarsan Rachuri. (2017). Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters. *Journal of Cleaner Production*, 161, 12–29. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.013
- [63] Wonkyun Lee, Seong Hyeon Kim, Jaesang Park, & Byung-Kwon Min. (2017). Simulation-based machining condition optimization for machine tool energy consumption reduction. *Journal of Cleaner Production*, 150, 352–360. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.178
- [64] Thomas, T. (1999). Rough Surfaces (Second ed.). London: Imperial College Press. ISBN 1-86094-100-1
- [65] Donald R. Askeland, & W. (2016). *The Science and Engineering of Materials* (7th ed.). USA: Cengage Learning. ISBN: 978-1-305-07710-2
- [66] ISO (1989). ISO 8688-2 *Tool life testing in milling Part 2: End milling* [Reviewed in 2016]. Genève, Switzerland.
- [67] Carmita Camposeco-Negrete. (2015). Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum. *Journal of Cleaner Production*, 91, 109–117. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.017
- [68] Zhipeng Jiang, Dong Gao, Yong Lu, Linghao Kong, & Zhendong Shang. (2018). Electrical energy consumption of CNC machine tools based on empirical modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 2255– 2267. doi: 10.1007/s00170-018-2808-x
- [69] Greenhouse Gas Equivalencies Calculator (2020). EPA (United States Environmental Protection Agency) <u>https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references</u>