



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

**CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

**Estudio del efecto de los parámetros de
torneado y bruñido sobre la integridad
superficial del polímero UHMWPE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ingeniería Mecánica

PRESENTA:

Ing. César Oswaldo Aguilera Ojeda

DIRECTORES:

Dr. Agustín Vidal Lesso

Dr. Alberto Saldaña Robles

Salamanca, Gto.

Junio 2020

Dedicatoria

A mi esposa por todo su apoyo incondicional durante este proceso, por creer en mi cuando nadie más lo hacía, inclusive yo, por amarme, motivarme y siempre estar a mi lado, te amo.

A mi mamá por sacarnos adelante a pesar de todo, por siempre ser fuerte, por enseñarme el camino correcto y por tu gran amor.

A mi padre gracias por siempre creer en mí.

A mis hermanos por sus enseñanzas, sus palabras de aliento y su confianza.

A la familia de mi esposa por su apoyo y motivación.

A todos mis amigos y amigas que eh conocido a lo largo de este proceso, gracias por todo su apoyo, alegría e inspiración.

A mis profesores y asesores que con su enseñanza, paciencia y dedicación me lograron transmitir las herramientas suficientes para poder culminar este proceso.

Gracias

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad de vivir esta experiencia.

A mi esposa por convencerme y apoyarme a lo largo de este camino.

Al Dr. Agustín Vidal por su apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Al Dr. Alberto Saldaña por su apoyo en los temas técnicos y su gran disposición.

Al Dr. Israel Martínez por su comprensión y apoyo a lo largo de toda la experimentación.

A la DICIS por darme la oportunidad de estudiar la maestría en su plantel.

A CONACYT, por otorgarme la beca para la maestría.

A todos los involucrados, muchas gracias.

Índice de contenido

Dedicatoria	II
Agradecimientos.....	III
Índice de contenido.....	IV
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas.....	X
Resumen	XII
Abstract.....	XIV
Capítulo 1 Marco de Referencia.....	1
1.1. Introducción	2
1.2. Justificación	3
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivo	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Impacto	5
1.6. Alcance y limitaciones.....	5
1.7. Estado del Arte.....	6
Capítulo 2 Marco Teórico	9
2.1. Definición de Polímero	10
2.1.1. Termoplásticos y sus características.....	11
2.1.2. UHMWPE	11
2.2. Proceso de Torneado.....	12
2.2.1. Rugosidad superficial	15
2.2.1.1. Medición de la rugosidad superficial	16

2.2.2.	Dureza.....	17
2.2.2.1.	Pruebas de indentación.....	18
2.3.	Proceso de Bruñido con Bola.....	19
2.3.1.	Ventajas y desventajas del proceso de bruñido con bola.....	21
2.4.	Tecnología CNC	22
2.5.	Metodología de Superficie de Respuesta (MSR).....	24
2.5.1.	Modelos	25
2.5.2.	Optimización	26
2.5.3.	Diseño de experimentos	27
Capítulo 3	Marco Metodológico	30
3.1.	Introducción	31
3.2.	Análisis de Deflexión.....	31
3.3.	Material de trabajo	32
3.4.	Proceso de Torneado.....	33
3.4.1.	Diseño de experimentos	34
3.4.2.	Medición de Rugosidad Superficial y RRM	37
3.5.	Bruñido con Bola	38
3.5.1.	Linealización	40
3.5.2.	Diseño de Experimentos.....	42
3.5.3.	Medición de Rugosidad Superficial y Dureza	44
3.6.	Uso de Software Estadístico	45
Capítulo 4	Resultados y Discusión.....	47
4.1.	Proceso de Torneado.....	48
4.1.1.	Análisis de Varianza (ANOVA).....	48
4.1.2.	Herramientas de Diagnostico.....	52

4.1.3.	Pruebas de Validación	54
4.1.4.	Gráficas 3D y de Contornos	55
4.1.5.	Optimización de la <i>Ra</i> y <i>RRM</i>	59
4.2.	Proceso de Bruñido con Bola.....	66
4.2.1.	Análisis de Varianza (ANOVA).....	66
4.2.2.	Herramientas de Diagnostico.....	68
4.2.3.	Gráficas 3D y de Contornos	70
4.2.4.	Dureza.....	72
4.2.5.	Optimización de la <i>Ra</i> y Dureza.....	73
Capítulo 5	Conclusiones.....	82
Capítulo 5	Trabajos Futuros	85
Referencias	87
Anexos	92

Índice de Figuras

Figura 1.1 Esquema del proceso de bruñido con bola (Saldaña <i>et al.</i> , 2017).....	7
Figura 2.1 El proceso de torneado	13
Figura 2.2 Componentes principales de un torno convencional.....	14
Figura 2.3 Perfil de rugosidad y ondulación.....	15
Figura 2.4 Mediciones de los 3 tipos de rugosidad; a) Rugosidad media aritmética (Ra), b) Profundidad de rugosidad media (Rz) y c) Profundidad de rugosidad máxima (Rt)	16
Figura 2.5 Diferentes mecanismos de bruñido con bola; a) Mecanismo de resorte, b) Mecanismo hidrostático (Saldaña <i>et al.</i> , 2012)	20
Figura 2.6. Códigos G y M más usados para un torno CNC	24
Figura 2.7 Diferentes tipos de superficies de respuesta; a) descrita por un modelo lineal y b) por un modelo cuadrático.	27
Figura 2.8 Representación del diseño de composición central.....	28
Figura 3.1 Metodología general para el desarrollo del proyecto.....	31
Figura 3.2 Probeta experimental de UHMWPE, a) Vista ortogonal de la probeta en mm y b) probeta manufacturada en el CNC.	33
Figura 3.3 Maquinado de la probeta experimental; a) Cilindrado y b) Tronzado	34
Figura 3.4 Montaje y ajuste del bruñidor en el torno CNC.....	39
Figura 3.5 Centrado del bruñidor con bola.....	39
Figura 3.6 Bruñidor y celda de carga colocados para la linealización.	40
Figura 3.7 Pieza de UHMWPE para la linealización.	41
Figura 3.8 Gráfica de calibración entre la fuerza de bruñido y el desplazamiento vertical del bruñidor,	42
Figura 3.9 Prueba de Dureza Vickers.....	45
Figura 4.1 Perfiles de rugosidad y micrografías (amplificación de 15X) para los ensayos experimentales (a)8, (b)23 y (c)21.	50

Figura 4.2 Gráfica de probabilidad normal para la Ra .	52
Figura 4.3 Gráfica de supuesto de varianza para la Ra .	53
Figura 4.4 Gráfica de independencia para Ra .	54
Figura 4.5 Gráfica comparativa de los resultados experimentales con los de la MSR.	55
Figura 4.6 Gráficas de superficie de respuesta para la Ra , de contorno (derecha), 3D (izquierda).	58
Figura 4.7 Gráficas de superficie de respuesta para la MRR, de contorno (derecha), 3D (izquierda).	59
Figura 4.8 Gráficas de contorno para la deseabilidad y Ra para las diferentes interacciones a) $Vc \times f$, b) $ap \times f$ y c) $Vc \times ap$.	61
Figura 4.9 Gráfica de rampa para los valores óptimos de Ra .	62
Figura 4.10 Gráficas de contorno para la deseabilidad, Ra y RRM para las diferentes interacciones a) $Vc \times f$, b) $ap \times f$ y c) $Vc \times ap$.	64
Figura 4.11 Gráfica de rampa para los valores óptimos de Ra y RRM .	65
Figura 4.12 Gráfica de barras de la deseabilidad para el caso combinado.	66
Figura 4.13 Gráfica de probabilidad normal para la Ra .	68
Figura 4.14 Gráfica de supuesto de varianza para la Ra .	69
Figura 4.15 Gráfica de independencia para Ra .	69
Figura 4.16 Gráficas de superficie de respuesta para la Ra , de contorno (derecha), 3D (izquierda).	72
Figura 4.17 Casos en los cuales condujeron a un incremento en la dureza.	73
Figura 4.18 Gráficas de contorno para la deseabilidad y Ra para las diferentes interacciones a) $Vc \times F$, b) $Vc \times f$ y c) $F \times f$.	75
Figura 4.19 Gráfica de rampa para la optimización de la Ra .	75
Figura 4.20 Gráficas de contorno para la deseabilidad y dureza para las diferentes interacciones a) $Vc \times F$, b) $Vc \times f$ y c) $F \times f$.	77
Figura 4.21 Gráfica de rampa para la optimización de la Dureza.	77

Figura 4.22 Gráficas de contorno para la deseabilidad, Ra y dureza para las diferentes interacciones a) $Vc \times F$, b) $Vc \times f$ y c) $F \times f$	79
Figura 4.23 Gráfica de rampa para la optimización del caso combinado.....	80
Figura 4.24 Gráfica de barras para la optimización del caso combinado.....	81

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Polímeros comunes en la industria y sus propiedades.....	12
Tabla 3.1 Propiedades del UHMWPE utilizado en este trabajo.....	32
Tabla 3.2 Descripción del código utilizado para cilindrar nuestra pieza.....	34
Tabla 3.3 Parámetros de maquinado seleccionados para la investigación de torneado.	35
Tabla 3.4 Diseño experimental para torneado resultado del Diseño Central Compuesto Centrado en las Caras.	36
Tabla 3.5 Resultados de las mediciones experimentales de R_a y RRM (R_1 =Primer medición de R_a , R_2 =Segunda medición de R_a , R_3 =Tercera medición de R_a , Desv. Std. = Desviación Estándar).....	37
Tabla 3.6 Código utilizado para establecer la rugosidad mínima por torneado antes del bruñido.....	38
Tabla 3.7 Parámetros de bruñido.....	43
Tabla 3.8 Diseño experimental para bruñido resultado del Diseño Central Compuesto Centrado en las Caras.	43
Tabla 3.9 Resultados de las mediciones experimentales de R_a y Dureza (Desv. Std. =Desviación Estándar).....	45
Tabla 4.1 ANOVA para la variable de respuesta R_a (SC =Suma de Cuadrados, GDL =Grados de Libertad, MC =Media Cuadrada)	49
Tabla 4.2 ANOVA para la variable de respuesta RRM (SC =Suma de Cuadrados, GDL =Grados de Libertad, MC =Media Cuadrada)	51
Tabla 4.3 Resultados de las pruebas experimentales de validación del modelo de R_a	55
Tabla 4.4 Rangos de optimización para la calidad, producción y su combinación.....	60
Tabla 4.5 Resultados para la optimización de calidad	60
Tabla 4.6 Resultados para la optimización del caso combinado.	63
Tabla 4.7 ANOVA para la variable de respuesta R_a	67
Tabla 4.8 Parámetros que conllevaron a un aumento en la dureza.....	72

Tabla 4.9 Rangos de optimización para la Ra , dureza y su combinación	73
Tabla 4.10 Resultados para la optimización de Ra	74
Tabla 4.11 Resultados para la optimización de dureza	75
Tabla 4.12 Resultados para la optimización del caso combinado	78

Resumen

El proceso de acabado superficial conocido como bruñido con bola ha demostrado ser un proceso económico, rápido y fácil de implementar en materiales metálicos. Su poca investigación en materiales poliméricos, específicamente en el UHMWPE, es una oportunidad de investigación para estudiar el efecto del proceso de bruñido con bola en la integridad superficial de este polímero, cuya implementación con resultados satisfactorios permitiría reducir los altos costos de los procesos tradicionales, así como lograr mejores acabados superficiales con un incremento en la dureza y disminución de rugosidad, que finalmente repercutirán en su resistencia al desgaste y la vida útil de piezas en diversos sectores industriales, tales como: aeronáutico, automotriz, aeroespacial y biomecánico.

El polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) es un termoplástico ampliamente utilizado cuando se trata de fabricar piezas maquinadas como engranes, husillos de transporte, juntas, guías, rodillos, bujes, mesas de corte, ruedas, sinfines, catarinas, placas para troqueladoras, perfiles y más recientemente su uso en piezas biomédicas. Debido a este tipo de aplicaciones es que la integridad superficial es de gran interés para la calidad de las piezas o componentes; por lo tanto, es de vital importancia encontrar los parámetros de maquinado que proporcionen una mejoría en la integridad superficial, entiéndase por integridad superficial para este trabajo a la rugosidad (R_a) y dureza (HV) superficiales.

Por lo anterior, en esta investigación en una primera etapa se realizó un estudio experimental por medio de un Diseño Central Compuesto (DCC) con Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para el proceso de torneado, donde intervenían los parámetros de velocidad de corte (V_c), profundidad de corte (ap) y avance de corte (f), con el fin de analizar la influencia de dichos parámetros y obtener los valores óptimos que proporcionan una mejoría en la integridad superficial; sin embargo, también se determinó la razón de remoción de material (RRM) la cual es la tasa de material removido de la pieza de trabajo por unidad de tiempo y es un factor que evalúa la productividad. Los resultados permitieron obtener modelos de regresión multivariable ajustados que describen el comportamiento de la R_a en el rango experimental de estudio, y la función de deseabilidad permitió optimizar los parámetros de corte ($V_c = 250$ m/min, $ap = 1.5$ mm y $f = 0.27$ mm/rev) para obtener la mínima rugosidad superficial dentro del rango experimental estudiado de R_a

= 4.3 μm , siendo la Ra inicial de 15.072 μm . Una vez determinados los parámetros de corte que proporcionan la rugosidad mínima, estos se fijaron para en una segunda etapa aplicar el proceso de bruñido con bola buscando disminuir más la rugosidad superficial e incrementar la dureza. Un diseño de experimentos similar se realizó para el proceso de bruñido considerando los parámetros de fuerza de bruñido (F), avance de corte (f) y velocidad de corte (V_c). Los resultados arrojaron una mejoría de la Ra en un 52% y de la dureza en un 33%, la función de deseabilidad arrojó que los siguientes parámetros de bruñido $V_c=274.938$ m/min, $F = 170$ N y $f=0.05$ mm/rev permiten optimizar la rugosidad superficial minimizándola a un valor de 2.94 μm .

Se puede concluir que la combinación del proceso de torneado y bruñido con bola mejoran la integridad superficial del UHMWPE de manera sustancial, los resultados de los ANOVA para cada uno de los procesos mostraron que el factor de avance (f) es el que más influye en la Ra en ambos procesos. Sin embargo, se descubrió que los valores bajos de avance empeoran la rugosidad superficial, porque la alta temperatura que se genera a avances bajos degrada el material mientras que los avances altos la mejoran. Los modelos de predicción encontrados presentan un coeficiente de regresión de 96.83% para el proceso de torneado y de 91.87% para el proceso de bruñido con bola, esto nos permite una predicción acertada de las variables de respuesta.

Abstract

The surface finishing process known as ball burnishing has proven to be an inexpensive, quick, and easy process to implement on metallic materials. His little research in polymeric materials, specifically at UHMWPE, is a research opportunity to study the effect of the ball burnishing process on the surface integrity of this polymer, whose implementation with satisfactory results would reduce the high costs of traditional processes, as well as achieving better surface finishes with an increase in hardness and a decrease in roughness, which will ultimately affect its resistance to wear and the useful life of parts in various industrial sectors, such as: aeronautical, automotive, aerospace and biomechanical.

Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) is a widely used thermoplastic when it comes to manufacturing machined parts such as gears, transport spindles, gaskets, guides, rollers, bushings, cutting tables, wheels, augers, sprockets, die cutter plates, profiles and more recently its use in biomedical pieces. Due to this type of applications, the surface integrity is of great interest for the quality of the parts or components; therefore, it is vitally important to find the machining parameters that provide an improvement in surface integrity, meaning surface integrity for this work to surface roughness (Ra) and hardness (HV).

Therefore, in this research in an initial stage, an experimental study was carried out using a Central Composite Design (CCD) with Response Surface Methodology (RSM) for the turning process, where the parameters involved were cutting speed (V_c), depth of cut (ap) and advance of cut (f), in order to analyze the influence of these parameters and obtain the optimal values that provide an improvement in surface integrity; however, the material removal ratio (MRR) was also determined, which is the rate of material removed from the workpiece per unit of time and is a factor that evaluates productivity. The results allowed obtaining adjusted multivariate regression models that describe the behavior of Ra in the experimental range of the study, and the desirability function allowed optimizing the cut parameters ($V_c = 250$ m/min, $ap = 1.5$ mm and $f = 0.27$ mm/rev) to obtain the minimum surface roughness within the studied experimental range of $Ra = 4.3$ μm , with the initial Ra being 15.072 μm . Once the cutting parameters that provide the minimum roughness were determined, these were set so that in a second stage the ball burnishing process was applied,

seeking to further decrease the surface roughness and increase the hardness. A similar design of experiments was carried out for the burnishing process considering the parameters of burnishing force (F), cutting advance (f) and cutting speed (V_c). The results showed an improvement in Ra in 52% and in hardness in 33%, the desirability function showed that the following burnishing parameters $V_c = 274.938$ m/min, $F = 170$ N and $f = 0.05$ mm/rev allow optimize surface roughness by minimizing it to a value of $2.94 \mu\text{m}$.

It can be concluded that the combination of the turning and ball burnishing process improves the surface integrity of the UHMWPE in a substantial way, the results of the ANOVA for each of the processes showed that the advance factor (f) is the one that most influences the Ra in both processes. However, low feed values were found to worsen surface roughness, because the high temperature generates at low feeds degrades the material while high feeds improve it. The prediction models found present a regression coefficient of 96.83% for the turning process and 91.87% for the ball burnishing process, this allows us to accurately predict the response variables.



Capítulo 1

Marco de Referencia

En este capítulo se presenta el marco de referencia, donde se abordan los antecedentes a esta investigación, justificación, objetivo, el impacto que se pretende tener, el alcance, las limitaciones y una breve recopilación del estado del arte para este proyecto.

- 1.1 Introducción
- 1.2 Justificación
- 1.3 Hipótesis
- 1.4 Objetivo
- 1.5 Impacto
- 1.6 Alcance y limitaciones
- 1.7 Estado del arte

1.1.Introducción

En este trabajo, se aplica el proceso de bruñido con bola sobre el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), con la finalidad de evaluar el desempeño del proceso sobre la integridad superficial (rugosidad y dureza) del polímero. Aunque el estudio del proceso de bruñido muestra mejoramiento sustancial en la integridad superficial de metales, se cuenta con poco estudio en polímeros.

El mejoramiento de la integridad superficial del polímero de estudio puede permitir mejorar la vida útil de piezas en diversos sectores industriales, tales como: aeronáutico, automotriz, aeroespacial y biomecánico. En donde la rugosidad y dureza superficial de algunos componentes industriales juega un papel importante en su desgaste.

El presente trabajo, comprende un conjunto de capítulos, en los cuales se presenta la investigación, desarrollo e implementación del proceso de torneado y bruñido con bola en el polímero UHMWPE. De esta manera, se pretende contribuir al conocimiento de la mejora de la calidad superficial del UHMWPE y de la implementación del bruñido con bola en materiales poliméricos y su afectación del proceso a este tipo de materiales. Para lograr lo antes mencionado, la tesis se divide de la siguiente manera:

El capítulo 1 presenta el marco de referencia, donde se abordan la introducción, la justificación, la hipótesis, el objetivo, el impacto que se pretende tener, el alcance, las limitaciones y una breve recopilación del estado del arte de este proyecto.

En el capítulo 2, se muestran el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos necesarios para poder realizar la presente investigación de manera satisfactoria. Se inicia con la explicación de los polímeros y su uso para entender el material con el que estamos trabajando, seguido del proceso de torneado y bruñido con bola con el fin de comprender la mecánica de los procesos que permitirán mejorar la integridad superficial del polímero UHMWPE. Además, se presenta la teoría estadística que se utiliza para el desarrollo experimental y el análisis de los resultados del estudio.

En el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para este trabajo, la metodología de las pruebas experimentales, las técnicas utilizadas, los equipos empleados y como se

analizarán los datos obtenidos y la aplicación de ambos procesos de manufactura con parámetros adecuados acorde a literatura para mejorar la integridad superficial.

En el capítulo 4, se exponen todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación desde el proceso de torneado hasta el proceso de bruñido, cada uno con sus respectivas ecuaciones de regresión, sus superficies de respuesta, valores óptimos, sus ANOVA para cada caso y una discusión de los resultados obtenidos.

Finalmente se mencionan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

1.2. Justificación

Hoy en día, las piezas manufacturadas de plásticos se utilizan cada vez más en la industria, debido a que sus propiedades les permiten un uso más amplio que los metales convencionales. La tecnología de moldeo por inyección se utiliza generalmente para un gran número de piezas, en caso de producción en serie, mientras que los procesos de corte se prefieren a la producción por pieza (unidad) o menor número (Keresztes *et al*, 2011). El polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) es un termoplástico, tiene cadenas extremadamente largas, con la enumeración del peso molecular en millones, generalmente entre 2 y 6 millones. Lo anterior, da lugar a un material muy resistente, con la fuerza de impacto más alta del termoplástico fabricado actualmente. Es altamente resistente a los productos químicos corrosivos, con la excepción de ácidos que oxidan, tiene absorción de la humedad extremadamente baja, coeficiente de la fricción bajo, es auto lubricante y es altamente resistente a la abrasión (15 veces más resistente a la abrasión que el acero al carbón). Es ampliamente utilizado cuando se trata de fabricar piezas maquinadas como engranes, husillos de transporte, juntas, guías, rodillos, bujes, mesas de cortes, ruedas, sinfines, estrellas distribuidoras, placas para troqueladoras, perfiles, etc. Debido a este tipo de aplicaciones es que la integridad de la superficie acabada es de gran interés para la calidad de las piezas o componentes. Por ello, la rugosidad superficial (R_a) es un parámetro importante que define la calidad de un producto e influye en el costo de fabricación (Chabbi, 2017).

A pesar de haber sido estudiado y utilizado continuamente en la industria durante muchos años, el estado del arte revela que la investigación del proceso de bruñido con bola

se ha limitado en gran medida al estudio de materiales metálicos, pero relativamente desconocido en el procesamiento de polímeros (Low & Wong, 2011). Se han realizado varios estudios sobre la influencia de los agentes de refuerzo, los parámetros de mecanizado y diversas técnicas de tratamiento de superficies para mejorar las cualidades de la superficie y las propiedades tribológicas de las superficies poliméricas (Low y Wong, 2011; Salahshoor y Guo, 2011; El-Tayeb, Low y Brevern, 2008).

El proceso de acabado superficial conocido como bruñido con bola ha demostrado ser un proceso económico, rápido y fácil de implementar en materiales metálicos. Su poca investigación en materiales poliméricos, específicamente en el UHMWPE, es una oportunidad de investigación para estudiar el efecto del proceso de bruñido con bola en la integridad superficial de este polímero, cuya implementación con resultados satisfactorios permitiría reducir los altos costos de los procesos tradicionales, así como lograr mejores acabados superficiales con un incremento en la dureza y disminución de rugosidad, que finalmente repercutirán en su resistencia al desgaste y la vida útil de piezas en diversos sectores industriales, tales como: aeronáutico, automotriz, aeroespacial y biomecánico.

1.3.Hipótesis

El proceso de torneado en combinación con el proceso de bruñido con bola genera una mejoría en la integridad superficial (dureza y rugosidad superficial) del polímero UHMWPE.

1.4.Objetivo

1.4.1. Objetivo General

Estudiar el efecto de los parámetros de mayor influencia en el proceso de torneado y bruñido con bola sobre la calidad superficial del material polimérico UHMWPE.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer los parámetros de corte por torneado y bruñido óptimos dentro de la región experimental de estudio, que permitan mejorar la integridad superficial del material polimérico UHMWPE.

- Analizar el efecto de los parámetros más importantes de corte por torneado y bruñido con bola sobre la calidad superficial del material polimérico UHMWPE utilizando diseño de experimentos.
- Obtener modelos de predicción a partir de métodos estadísticos de la calidad superficial del UHMWPE en función de los parámetros de torneado y bruñido.

1.5. Impacto

El desarrollo de la presente investigación plantea en un futuro tener un impacto económico directo en el área de integridad superficial de procesos de manufactura.

El impacto deseado es:

- Aportar información sobre el torneado del UHMWPE y sus efectos en el mismo.
- La posible influencia positiva de aplicar bruñido con bola en el polímero UHMWPE sobre la integridad superficial del mismo. Así como evaluar el porcentaje de mejora de esta integridad en la región experimental evaluada.
- Disminución de los gastos de producción al poder obtener valores óptimos de corte.

1.6. Alcance y limitaciones

Los alcances de este trabajo abarcan la obtención de valores óptimos para el proceso de torneado en la región experimental estudiada, así como una investigación completa con el diseño de experimentos que nos arroje información clara sobre los parámetros que más influyen sobre la integridad superficial del polímero UHMWPE. Del mismo modo la obtención de los valores óptimos del proceso de bruñido con bola y sus efectos sobre la integridad superficial del polímero de estudio, en consecuencia, los parámetros más influyentes para este proceso.

Las principales limitaciones a las que se enfrenta este trabajo son, los tiempos de maquinado para la realización de nuestro diseño de experimentos, ya que solo hay un torno

CNC y se usa también para clases y diferentes proyectos. La influencia de parámetros que no se puedan controlar en el área de trabajo pero que si influyan tanto en la integridad superficial como en el uso de la máquina.

1.7.Estado del Arte

El proceso de bruñido con bola produce una deformación plástica superficial (SPD por sus siglas en inglés) que utiliza una bola con un diámetro de 3–20 mm como elemento deformante (Saldaña *et al.*, 2017). La bola aplica una fuerza normal lo suficientemente alta como para producir una deformación plástica en la superficie que desplaza el material de crestas a depresiones en micro irregularidades superficiales como se muestra en la figura 1.1 (Saldaña *et al.*, 2014). El bruñido se considera un proceso simple y de bajo costo con ventajas de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las piezas fabricadas; disminuyendo la rugosidad de la superficie (Hassan y Maqableh, 2000; Bougharriou, Saï, y Bouzid, 2010; El-Tayeb, Low, y Brevern, 2007; Hamadache *et al.*, 2006), ofreciendo una buena precisión de acabado, aumentando la dureza en la superficie de la pieza de trabajo (El-Tayeb, Low, y Brevern, 2007; Hamadache *et al.*, 2006; Yen, Sartkulvanich, y Altan, 2005), induciendo tensiones residuales de compresión (Yen, Sartkulvanich, y Altan, 2005; Klocke *et al.*, 2011), que como consecuencia, mejora la resistencia al desgaste (Hassan y Al-Dhifi, 1999), fatiga (Klocke *et al.*, 2011) y corrosión. Estas propiedades pueden ayudar a extender la vida útil esperada de la pieza tratada. Entre otros parámetros, la rugosidad media y la dureza de la superficie se consideran los parámetros más importantes en la medición de la integridad de la superficie.

Los materiales poliméricos tienen buenas propiedades mecánicas, equiparables a los metálicos además que el efecto de la corrosión es casi nulo. Varios autores han llevado a cabo su investigación sobre cómo los diferentes procesos de corte afectan las propiedades tribológicas de los polímeros (A. Chabbi, 2017; Xiao y Zhang, 2002; Lazarević *et al.*, 2011; Fetecau & Stan, 2012; Ansari, Sharma, y Nikam, 2014). Estas investigaciones se han centrado en diferentes tipos de polímeros de acuerdo con las necesidades que se buscan satisfacer en la industria. Kaddeche *et al.* (2012) llevaron a cabo un estudio sobre la rugosidad de la superficie, la fuerza de corte y la evolución de la temperatura durante el mecanizado de dos polietilenos de alta densidad de diferentes grados HDPE-100 y HDPE-80, concluyeron

que el avance es el factor dominante en el criterio de rugosidad; con respecto a las fuerzas de corte el aumentar las velocidades de corte conduce a componentes de menor fuerza de corte (F_r , F_a y F_v) y F_v es el componente dominante. Descubrieron que la temperatura generada en la zona de corte es mayor cuando se corta HDPE-80 que HDPE-100 y la profundidad de corte es el factor más influyente en el nivel de temperatura. Keresztes *et al.*, (2011) realizaron a cabo un estudio comparativo entre las fuerzas de corte para diferentes polímeros como PA-6 (Mg), PA-6 (Na), Polioximetileno (POM-C) y HD-1000 (UHMWPE). Los resultados muestran que las fuerzas más altas se obtienen con PA-6 (Mg) y las más bajas con polímero HD-1000. Las fuerzas de corte correspondientes al corte del POM-C son casi la mitad de las registradas en PA-6 (Mg), que es más resistente a la operación de corte que los otros tres polímeros.

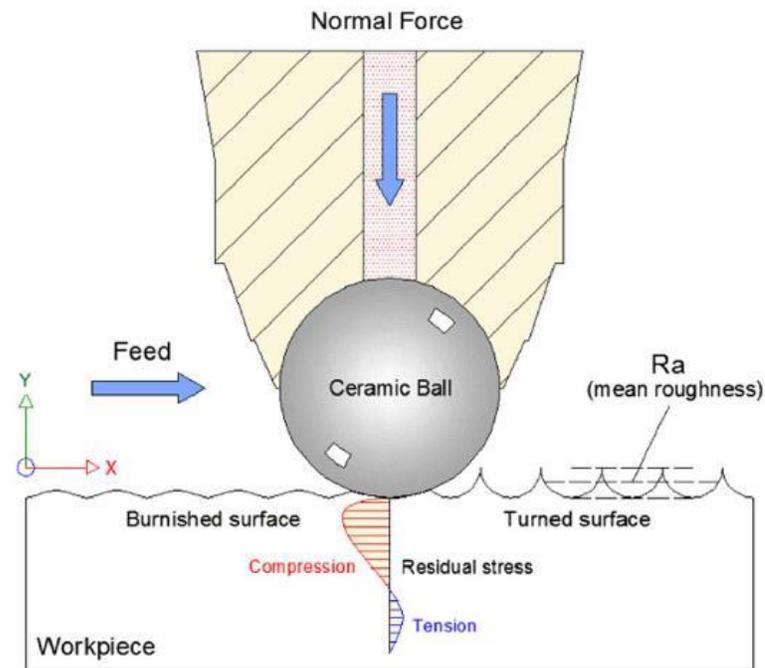


Figura 1.1 Esquema del proceso de bruñido con bola (Saldaña *et al.*, 2017)

Tushar & Hemant, (2015) demostraron que las propiedades mecánicas de ciertos polímeros son similares a los metales y para lograr una alta precisión dimensional y la rugosidad superficial deseada es preferible un mecanizado como el torneado, taladrado o fresado.

El-Tayeb, Low, & Brevern, (2008) investigaron el proceso de bruñido con bola para mejorar la rugosidad superficial y la dureza del poliuretano (PU) y del acetal homopolímero (POM-H), encontraron que los efectos del bruñido con bola fueron más significativos en el POM-H que en el PU. Redujeron la rugosidad superficial del POM-H en un 32% y la del PU en un 28%, mientras que la dureza incremento 0.8% para el POM-H y 1% para el PU. (Low & Wong, 2011) ellos realizaron un estudio de los mismos polímeros antes mencionados, pero solo utilizaron los parámetros de velocidad de bruñido y fuerza de bruñido en condiciones secas y con lubricante, sus resultados mostraron que los coeficientes de fricción fueron reducidos en un 26.8% para el POM-H y 17.7% para el PU y la razón de desgaste disminuyo un 25% para el POM-H y 27.8% para el PU. Sin embargo, descubrieron que velocidades y fuerzas altas de bruñido tienden a degradar la calidad superficial.



Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se muestran el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos necesarios para poder comprender y llevar a cabo la presente investigación. Se proporciona información de los polímeros, enfocándose en el UHMWPE, utilizado en la presente investigación, seguido del proceso de torneado y bruñido con bola con el fin de comprender los procesos de mejoramiento superficial. Finalmente, se abordarán algunos temas de estadística y probabilidad para con todo ello analizar, explicar y entender los resultados de este trabajo.

2.1 Definición de Polímero

2.2 Proceso de Torneado

2.3 Proceso de Bruñido con Bola

2.4 Tecnología CNC

2.5 Metodología de Superficie de Respuesta

2.1. Definición de Polímero

Un polímero se puede definir como una macromolécula construida por una o más moléculas pequeñas repetidas de manera lineal (similar a una cadena), ramificada o interconectada. A estas pequeñas moléculas se les denomina monómeros y se unen mediante un proceso químico denominado reacción de polimerización.

Los polímeros pueden ser inorgánicos, por ejemplo, el vidrio, pero la mayoría de los polímeros de interés industrial son compuestos orgánicos formados por hidrocarburos asociados a diferentes elementos, es decir, moléculas formadas por cadenas de átomos de carbono a los que se unen otros elementos.

Existen diversas maneras de clasificar a los polímeros en función de diferentes criterios como lo es su origen, número de monómeros y según su comportamiento al elevar la temperatura, esta última es la que tomaremos en cuenta para el desarrollo de nuestro trabajo. Para esta clasificación se pueden distinguir 3 tipos generales de polímeros:

- Termoplásticos
- Elastómeros
- Termoestables

Los termoplásticos son aquellos que a temperaturas relativamente altas se derriten o se deforman y cuando se enfrían se endurecen. La gran mayoría de estos materiales son polímeros de alto peso molecular, difieren de los termoestables ya que pueden recalentarse y formar otros objetos.

Los elastómeros se caracterizan por su alta deformación plástica cuando se les aplica una fuerza y vuelven a la normalidad cuando esta es eliminada.

Los termoestables no tienen fluidez, tienen una estructura de tipo reticular y a diferencia de los termoplásticos no pueden recalentarse debido a que se descomponen químicamente.

2.1.1. Termoplásticos y sus características

Como se mencionó anteriormente los termoplásticos son materiales que al momento de alcanzar una temperatura alta se derriten, esto le da una ventaja ya que debido a ello pueden tomar otras formas y ser reciclados. En comparación con los otros tipos de polímeros los termoplásticos se fabrican en mayor cantidad y también son empleados en misma medida, una de las características principales de los termoplásticos es que deben de tener una temperatura de transición vítrea o temperatura de fusión superior a la temperatura ambiente, tienen historial térmico, esto significa que sus propiedades físicas varían dependiendo de la cantidad de veces en que se calienten o se moldeen. En la Tabla 2.1 se presentan algunos de los materiales termoplásticos más utilizados en la industria, sus propiedades y aplicaciones (Beltran, 2011).

2.1.2. UHMWPE

El polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) es un termoplástico que proviene de una familia de polímeros con una composición química simple, tiene cadenas extremadamente largas, con la enumeración del peso molecular en millones, generalmente entre 2 y 6 millones. Esto da lugar a un material muy resistente, con la fuerza de impacto más alta del termoplástico hecho actualmente. Es altamente resistente a los productos químicos corrosivos, con la excepción de ácidos que oxidan. Tiene absorción de la humedad extremadamente baja, coeficiente de la fricción muy bajo, es uno mismo que lubrica y es altamente resistente a la abrasión (15 veces más resistente a la abrasión que el acero de carbón). Es ampliamente utilizado cuando se trata de fabricar piezas maquinadas como engranes, husillos de transporte, juntas, guías, rodillos, bujes, mesas de cortes, ruedas, sinfines, estrellas distribuidoras, placas para troqueladoras, perfiles, etc.

Al principio el UHMWPE se le catalogaba como un polietileno de alta densidad (HDPE), por lo tanto, las referencias previas a ese tiempo son técnicamente precisas debido a que no había la tecnología necesaria para poder observar de cerca el comportamiento a nivel molecular (Kurtz, 2004).

Tabla 2.1 Polímeros comunes en la industria y sus propiedades

<i>Polímero</i>	<i>Resistencia a la tensión (MPa)</i>	<i>Elongación a la ruptura (%)</i>	<i>Módulo de elasticidad (GPa)</i>	<i>Densidad (Mg/m³)</i>	<i>Temperatura de deformación por calor a 455 kPa</i>	<i>Aplicaciones</i>
Polietileno (PE) Baja densidad y alta densidad	8-21 21-38	50-800 15-130	0.1-0.28 0.4-1.20	0.92 0.96	42 85	Embalaje, aislantes eléctricos, artículos del hogar, botellas
Polipropileno (PP)	28-41	10-700	1.1-1.5	0.90	115	Tanques, embalaje, fibras para ropa y sobre envolturas
Polimetilmetacrilato (PMMA)	41-82	2-5	2.4-3.1	1.22	93	Acrilamiento de vehículos, lentes de contacto, pantallas de seguridad, gafas protectoras
Politetrafluoretileno (PTFE)	14-48	100-400	0.41-0.55	2.17	120	Cierres, juntas, válvulas, anillos de estancamiento, recubrimientos antiadherentes
Polioximetileno (Acetales) (POM)	65-83	25-75	3.6	1.42	165	Cojinetes, engranajes, bolígrafos, fijación de cañerías, aletas de ventiladores
Policloruro de vinilo (PVC)	34-62	2-100	2.1-4.10	1.40	-	Tuberías, válvulas, revestimientos de suelos, aislantes eléctricos, revestimientos de automóviles

2.2. Proceso de Torneado

El torneado es un proceso de manufactura que consiste en una herramienta de corte (buril o inserto de corte) que es aproximada a una pieza de trabajo que se encuentra rotando a una velocidad angular w (Figura 2.1), la interacción entre ambas produce un arranque de material llamado viruta que reduce el diámetro original de la pieza (D) con respecto a la profundidad de corte (ap) dando lugar a una modificación en la superficie interna o externa del material. En la figura se puede apreciar que la interacción entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo produce una fuerza de corte (F_c), su velocidad lineal (V) y el avance (f), que se puede definir como la distancia axial que se mueva la herramienta de corte con respecto a una revolución de la pieza de trabajo (Childs *et al.*, 2000).

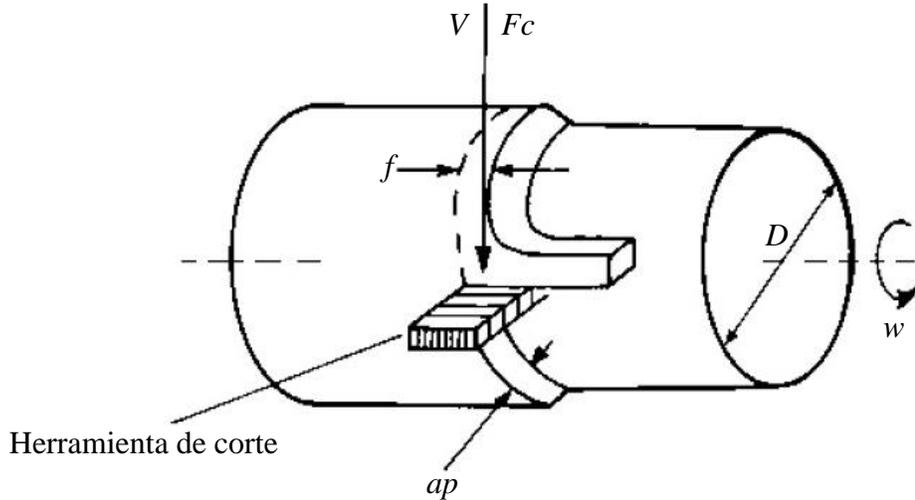
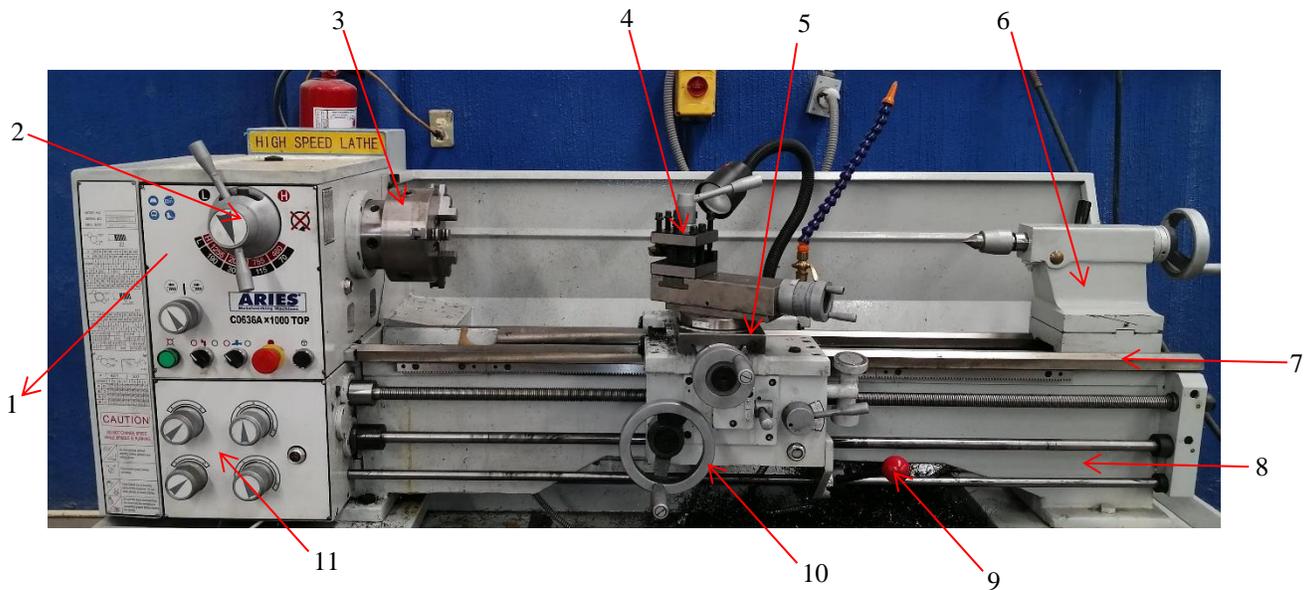


Figura 2.1 El proceso de torneado

Este procedimiento se realiza en un torno una de las maquinas herramienta más versátiles y útiles. El torno es especialmente adecuado para maquinados, fabricación de herramental y mecanizar ejes, husillos, mangas y piezas de disco de tamaño mediano o pequeño. También se pueden usar para cortar roscas imperiales, diametrales y de módulos, y con una construcción compacta y una composición razonable, pueden cortar muy bien. Son fáciles y confiables de operar, fáciles de reparar, de alta eficiencia y bajo nivel de ruido. Los componentes de un torno convencional se muestran en la Figura 2.2.



1.Cabezal

7.Estante

- | | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| 2.Selector de velocidad | 8.Cama |
| 3.Husillo con Chuck | 9.Palanca de mando del husillo |
| 4.Torreta de herramienta | 10.Volante de carrera transversal |
| 5.Cursor transversal | 11.Caja de engranes |
| 6.Contrapunto | |

Figura 2.2 Componentes principales de un torno convencional

Los parámetros más importantes al momento de tornear alguna pieza son la velocidad de corte (V_c), el avance (f) y la profundidad de corte (a_p). La mayoría de estos parámetros son introducidos por el personal que opera el torno para producir los cambios necesarios en la pieza de trabajo, pero también pueden ser calculados de la siguiente manera. La velocidad de corte se determina por la velocidad angular, ω , y el perímetro de la pieza de trabajo:

$$V_c = \omega\pi D \quad (2.1)$$

El avance, como ya se definió anteriormente, es el avance de la herramienta en mm/rev. La razón de avance es la velocidad a la cual se mueve la herramienta longitudinalmente y está dado en mm/min:

$$f_r = f\omega \quad (2.2)$$

La profundidad de corte es el grosor de la cantidad de material removido, también es la cantidad que el operador especifica en inserción de la herramienta de corte:

$$a_p = \frac{D_o - D_f}{2} \quad (2.3)$$

El tiempo de maquinado es el tiempo requerido para cortar una longitud L en la dirección del avance:

$$t_m = \frac{L - L_e}{f_r} \quad (2.4)$$

La razón de remoción de material, MRR , se define como la tasa de material removido de la pieza de trabajo por unidad de tiempo, es un factor que impacta directamente a la productividad:

$$MRR = V_c x a_p x f \quad (2.5)$$

Con los parámetros anteriores es posible realizar varias combinaciones para modificar la calidad superficial de una pieza, para conocer la calidad final es necesario medir varios parámetros como lo son la rugosidad superficial (Ra) y la dureza, a esta afectación se le conoce como *integridad superficial* (Stephenson y Agapiou, 2016).

2.2.1. Rugosidad superficial

En la realidad una superficie perfecta no existe, todas las superficies presentan irregularidades o particularidades que son provocadas por el tipo de maquinado y el tipo de herramienta de corte que se utilizó. Las irregularidades mayores o también llamadas macro geométricas son aquellas asociadas a la variación de tamaño en la pieza, planitud de una superficie, conicidad, redondez y cilindricidad y se miden con instrumentos convencionales. Las irregularidades menores o micro geométricas son la ondulación y la rugosidad.

La rugosidad, está formada por valles y crestas dejadas por los agentes que atacan la superficie en el proceso de mecanizado (herramienta, partículas abrasivas, acción química, etc.), y se encuentra superpuesta al perfil de ondulación. La ondulación o textura secundaria es el conjunto de irregularidades repetidas en ondas de paso mucho mayor que la amplitud y que pueden ocurrir por diferencia en los movimientos de la máquina-herramienta, deformación por tratamiento térmico, tensiones residuales de forja o fundición, etc.

La Figura 2.3 muestra un ejemplo de una superficie real después de realizar algún maquinado, en ella se puede apreciar la extensión de la rugosidad (1) y la extensión de la ondulación (2). La imagen es una vista microscópica del material por ello para poder realizar las mediciones necesarias se necesita de aparatos basados en sistemas de medición que utilizan una pequeña aguja de punta muy aguda para recorrer una muestra de la superficie y definir numérica o gráficamente su perfil.

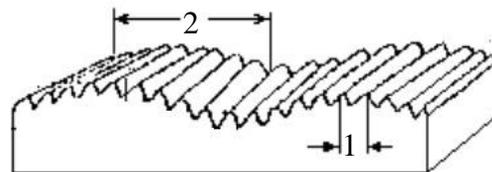


Figura 2.3 Perfil de rugosidad y ondulación.

2.2.1.1. Medición de la rugosidad superficial

La magnitud de la rugosidad se determina mediante la máxima profundidad de rugosidad, R_t , por el valor medio de la rugosidad, R_a , o por la profundidad de rugosidad media R_z .

R_t es la distancia en milímetros entre la cresta más alta y la depresión más profunda dentro de la longitud de medición (l_m). La profundidad de rugosidad media R_z es el promedio de los valores absolutos de las cinco crestas del perfil más altas y de las profundidades de los cinco valles del perfil más bajos, dentro de la longitud de medición. R_a es la media aritmética de todos los valores absolutos de las distancias del perfil de rugosidad respecto a la línea media dentro de la longitud de medición, este último parámetro es el más utilizado a nivel industrial para definir la rugosidad de una superficie.

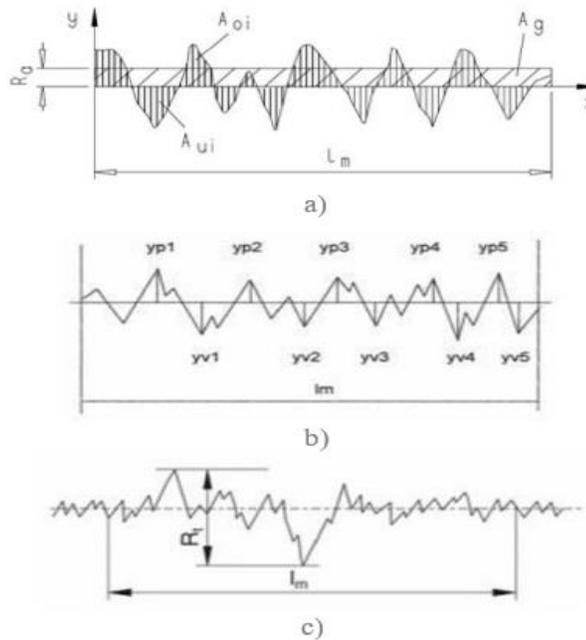


Figura 2.4 Mediciones de los 3 tipos de rugosidad; a) Rugosidad media aritmética (R_a), b) Profundidad de rugosidad media (R_z) y c) Profundidad de rugosidad máxima (R_t)

Las ecuaciones para poder obtener la rugosidad media aritmética y la profundidad de rugosidad media son las siguientes:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \tag{2.6}$$

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5} \quad (2.7)$$

La medida del valor de las rugosidades puede ser expresada en μm o en μin .

2.2.2. Dureza

La dureza de un material no es una propiedad única, sino que es una medida de la reacción del material a oponerse a la deformación local debido al tipo de fuerza perturbadora impuesta. Por lo tanto, la dureza es función del método de prueba, y la naturaleza dinámica del proceso de medición impone un patrón diferente de tensión en la muestra para diferentes rangos de carga. Se ha desarrollado una amplia variedad de procedimientos de prueba de dureza muy diferentes (McColm, 2013):

- Prueba de rayado. - Esta prueba consiste en ver si un material es capaz de rayar otro.
- Prueba de arado. - En esta prueba se carga un material duro y obtuso en forma de diamante y es cargado y empujado contra el material para dejar una marca. El ancho y la profundidad de la marca son una medida de la dureza.
- Prueba de corte. - Se utiliza una herramienta afilada para remover un fragmento del material de ciertas dimensiones.
- Prueba de abrasión. - Una muestra del material se somete a un disco giratorio y la pérdida de peso o la tasa de desgaste se usan como medida de la dureza.
- Prueba de erosión. - Es una variación de la prueba de abrasión, en la cual se disparan granos abrasivos sobre la superficie del material y la pérdida de peso en un momento dado se usa como medida de la dureza.
- Prueba de amortiguación. - Un péndulo con un pivote puntiagudo muy duro se balancea sobre la superficie del material y el tiempo para disminuir la amplitud de la oscilación en un 50% se usa como medida de dureza.

- Prueba de rebote. - Una pelota rebota en la superficie del material y la altura del rebote se usa como medida de dureza.
- Pruebas de indentación. - Por mucho la prueba más utilizada, la más analizada y la más generosa en la amplitud de datos que proporciona. Una bola, cono o pirámide es forzada a una superficie y la carga por unidad de área de impresión se considera la dureza del material. Se conocen varios tipos de tales pruebas: Brinell, Vickers, Rockwell y Knoop.

2.2.2.1. Pruebas de indentación

Estas pruebas fueron definidas previamente, hay varios modelos dependiendo de si una bola, cono o pirámide es forzada a la superficie del material de cualquier manera, en todos los casos la carga por unidad de área de la impresión generada es la medida de la dureza.

En la prueba Brinell, se utiliza una pequeña esfera de acero duro de 1.0 cm de diámetro que se fuerza contra la superficie del material, la carga varía dependiendo del tipo de material con el que se realiza la prueba (plásticos, metales, cerámicos, etc.) y generalmente se aplica por un periodo de tiempo de 30 s. La dureza se calcula a partir del área de contacto, no del área en el plano de la superficie:

$$H_B = \frac{P}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]} \quad (2.8)$$

Donde

P – Carga Aplicada

D – Diámetro de la esfera

d – Diámetro de la impresión dejada en la superficie de la muestra.

La ecuación 2.8 tiene una variante y por lo tanto un valor diferente de la medida de la dureza, se usa cuando el área utilizada es la proyectada en el plano de la superficie, a esta variante se le llama dureza Meyer:

$$H_M = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (2.9)$$

Cuando se utiliza un penetrador de diamante esférico o cónico se conoce como dureza Rockwell. Esta prueba consiste en aplicar una carga preliminar pequeña luego la carga principal es aplicada y eliminada, con ello se mide la profundidad de penetración. Todo lo anterior se indica en un medidor y se referencia como un numero de Rockwell.

En la prueba Vickers se usa una pirámide con vértice de 136° el cual es forzada a la superficie del material y el área de contacto generada se usa para medir la dureza:

$$H_V = \frac{0.322P}{a^2 \sin 136^\circ} \quad (2.10)$$

En esta ecuación, 2a es la longitud diagonal media expresada en micrones de la impresión en forma de diamante realizada en la superficie del material y la carga P se expresa en newtons.

En la prueba de Knoop se usa un indentador de diamante con dos ángulos, uno de 172.5° y el otro de 130°. Esto deja una diagonal 7 veces más larga que la diagonal corta, la dureza Knoop se diferencia de la dureza Vickers porque el área proyectada y no el área de contacto siempre se han utilizado para determinar la dureza.

$$H_K = \frac{2P}{d_l^2 (\cos 172.5^\circ + \tan 130^\circ)} \quad (2.11)$$

Para esta ecuación d_l es la longitud de la diagonal larga de la indentación.

2.3. Proceso de Bruñido con Bola

El proceso de Bruñido se define como una operación que consiste en deformar plásticamente las irregularidades de la superficie de algún material para mejorar el acabado superficial, por la acción de la fuerza ejercida por un cilindro o una bola; para llevar a cabo el proceso se utiliza una herramienta llamada bruñidor, la cual posee como elemento deformante una bola de alta dureza con un diámetro que varía de 3 a 20 mm. El proceso se puede llevar a cabo en un torno convencional, torno CNC y fresadora CNC. Las aplicaciones más usuales de este proceso de manufactura son la fabricación de moldes de inyección de plástico, herramientas para el conformado y corte de metales, ejes, pistones, frenos, engranes, vástagos, acoplamientos, alabes, rotores, así como numerosos componentes para diversos sectores industriales.

El bruñido con bola es un proceso de acabado de elaboración en frío, que se realiza en la superficie de piezas previamente maquinadas, es fácil intuir que este proceso lo que realiza es el desplazamiento y deformación de las crestas y valles superficiales, recolocando el material de estas y obteniendo una superficie más suave y homogénea. El trabajar en la zona de deformación plástica, implica que se debe conocer muy bien las características del material sobre el que se va a trabajar y el acabado superficial que se quiere obtener en la pieza. Estas características van a influir directamente sobre los parámetros que se aplicaran al proceso, como son la fuerza con la que penetra la bola, la velocidad de avance, la velocidad de giro y el número de veces que pasara la bola por la superficie (Saldaña *et al.*, 2017).

El proceso de bruñido con bola permite mejorar la rugosidad, dureza, redondez y las resistencias al desgaste, corrosión y fatiga de piezas manufacturadas, permitiendo sustituir métodos tradicionales. Existen 2 tipos de mecanismos comúnmente usados para el proceso de bruñido con bola (Figura 2.5), el mecanismo por resorte mecánico y el mecanismo de muelle hidrostático, siendo el primero el más utilizado.

La fuerza de bruñido F , que se expresa en Newtons, se puede calcular haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$F_b = 0.89 \frac{\pi}{4} d^2 p \cos(\pi/12) \tag{2.12}$$

Donde “ p ” es la presión y “ d ” el diámetro de la bola del bruñidor

Los parámetros de avance y velocidad de giro se calculan con las ecuaciones 2.1 y 2.2.

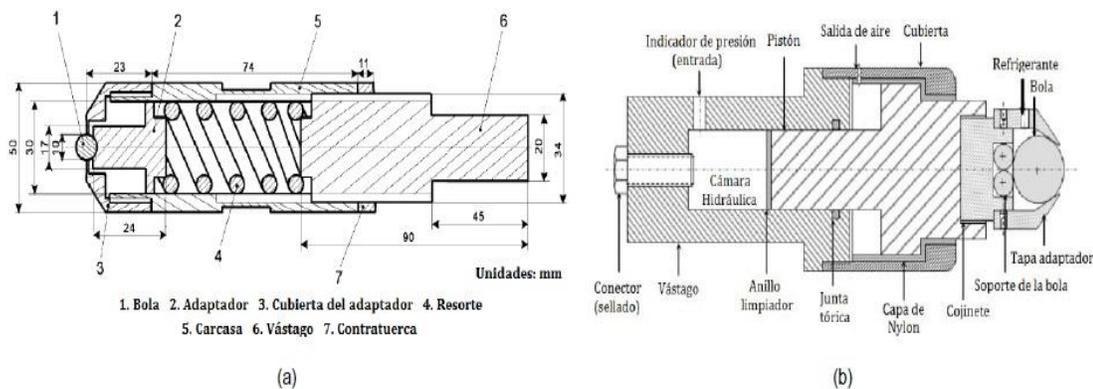


Figura 2.5 Diferentes mecanismos de bruñido con bola; a) Mecanismo de resorte, b) Mecanismo hidrostático (Saldaña *et al.*, 2012)

2.3.1. Ventajas y desventajas del proceso de bruñido con bola

El bruñido con bola es un proceso relativamente novedoso que plantea una mejoría en muchas de las propiedades de los materiales y cuenta con muchas ventajas como lo son:

- Se obtienen muy buenos acabados superficiales.
- Elimina operaciones de acabado o tratamientos térmicos posteriores, ya que, al ser un proceso de deformación plástica superficial hay un cambio en la micro capa comprimida del material.
- Minimiza las marcas o huellas de los mecanizados previos.
- Se obtienen superficies muy precisas. Se pueden obtener tolerancias muy estrechas con medidas exactas. Sin embargo, no hay cambios en las cotas nominales, con lo cual no afecta las medidas de la pieza.
- Puede corregir los defectos que puedan haber aparecido en operaciones previas de mecanizado tales como conicidad, planicidad, falta de circularidad y otros.
- Es un proceso ecológico, pues no se generan desperdicios sólidos al no presentarse arranque de viruta. Tampoco produce altos niveles de ruido.
- Mejora las propiedades físicas y mecánicas de la superficie, logrando aumentar la vida útil de la pieza. Por un lado, aumenta la resistencia al desgaste porque al bruñirse la superficie casi se igualan el tamaño de las crestas y los valles de la topografía, provocando que dicha superficie, al entrar en contacto con otra, reduzca la fricción y con ello el desgaste. Aumenta también la resistencia a la fatiga por la aparición de esfuerzos residuales compresivos que quedan en la capa superficial del material de la pieza, producto del proceso de bruñido. Por otro lado, también aumenta la resistencia a la corrosión al modificar el tamaño de grano superficial en la pieza.

2.4. Tecnología CNC

El CNC o control numérico por computadora es un sistema que permite el control de la posición de un elemento montado en el interior de una máquina-herramienta mediante un software especialmente diseñado para ello. En una máquina CNC, a diferencia de una máquina convencional o manual, una computadora controla la posición y velocidad de los motores que accionan los ejes de la máquina. Gracias a esto, puede hacer movimientos que no se pueden lograr manualmente como círculos, líneas diagonales y figuras complejas tridimensionales.

Las máquinas CNC son capaces de mover la herramienta al mismo tiempo en los tres ejes para ejecutar trayectorias tridimensionales como las que se requieren para el maquinado de complejos moldes y troqueles como se muestra en la imagen.

En una máquina CNC una computadora controla el movimiento de la mesa, el carro y el husillo. Una vez programada la máquina, ésta ejecuta todas las operaciones por sí sola, sin necesidad de que el operador esté manejándola. Esto permite aprovechar mejor el tiempo del personal para que sea más productivo.

Los componentes de un CNC son las instrucciones programadas, en forma de códigos G (Generales) y códigos M (Misceláneos), el controlador, servomotores para cada eje de movimiento y dispositivos de retroalimentación. Algunas de las funciones que se pueden programar en un CNC son:

- Control de movimiento. - Todos los CNC tienen 2 o más direcciones de movimiento o ejes, dependiendo la cantidad de ejes es la complejidad del CNC. Los ejes son un requisito indispensable para que un CNC realice los movimientos necesarios para el proceso de fabricación. Los ejes se denominan con letras, los más comunes son X, Y y Z para los lineales.
- Accesorios Programables. - Un CNC contará con las siguientes funciones programables:
 - a) Cambiador automático de herramienta. Los CNC cuentan con varias herramientas de corte ubicadas en una torreta, se puede

programar para cuando sea necesario colocar automáticamente la herramienta necesaria en el husillo.

- b) Velocidad y activación del husillo. Se puede programar la velocidad en rpm a la cual va a girar el husillo, y si este gira en sentido horario o antihorario.
 - c) Refrigerante. La mayoría de los procesos de corte requieren de refrigerante para lubricar la pieza de trabajo, se puede programar su activación y desactivación durante el ciclo de trabajo.
- Programa CNC. - Es un listado de instrucciones a seguir por la máquina, en ella se deberá incluir toda la información necesaria para realizar el mecanizado de la pieza, dicho programa está escrito en un lenguaje estandarizado por la norma ISO-6983, denominado G y M. El código G describe las funciones de movimiento de la máquina (por ejemplo, movimientos rápidos, avances radiales, ciclos), mientras que el código M describe las funciones misceláneas que se requieren para el mecanizado de la pieza, pero que no corresponden a los movimientos de la máquina (por ejemplo, arranque y paro del husillo, cambio de herramienta, refrigerante, detención del programa).

CÓDIGOS G	CÓDIGOS M
G00: Posicionamiento rápido (sin maquinar)	M00: Parada opcional
G01: Interpolación lineal (maquinando)	M01: Parada opcional
G02: Interpolación circular (horaria)	M02: Reinicio del programa
G03: Interpolación circular (antihoraria)	M03: Hacer girar el husillo en sentido horario
G04: Compás de espera	M04: Hacer girar el husillo en sentido antihorario
G10: Ajuste del valor de offset del programa	M05: Frenar el husillo
G20: Comienzo de uso de unidades imperiales (pulgadas)	M06: Cambiar de herramienta
G21: Comienzo de uso de unidades métricas	M07: Abrir el paso del refrigerante B
G28: Volver al home de la máquina	M08: Abrir el paso del refrigerante A
G32: Maquinar una rosca en una pasada	M09: Cerrar el paso de los refrigerantes
G36: Compensación automática de herramienta en X	M10: Abrir mordazas
G37: Compensación automática de herramienta en Z	M11: Cerrar mordazas
G40: Cancelar compensación de radio de curvatura de herramienta	M13: Hacer girar el husillo en sentido horario y abrir el paso de refrigerante
G41: Compensación de radio de curvatura de herramienta a la izquierda	M14: Hacer girar el husillo en sentido antihorario y abrir el paso de refrigerante
G42: Compensación de radio de curvatura de herramienta a la derecha	M30: Finalizar programa y poner el puntero de ejecución en su inicio
G70: Ciclo de acabado	M31: Incrementar el contador de partes
G71: Ciclo de maquinado en torneado	M37: Frenar el husillo y abrir la guarda
G72: Ciclo de maquinado en frentado	M38: Abrir la guarda
G73: Repetición de patrón	M39: Cerrar la guarda
G74: Taladrado intermitente, con salida para retirar virutas	M40: Extender el alimentador de piezas
G76: Maquinar una rosca en múltiples pasadas	M41: Retraer el alimentador de piezas
G96: Comienzo de desbaste a velocidad tangencial constante	M43: Avisar a la cinta transportadora que avance
G97: Fin de desbaste a velocidad tangencial constante	M44: Avisar a la cinta transportadora que retroceda
G98: Velocidad de alimentación (unidades/min)	M45: Avisar a la cinta transportadora que frene
G99: Velocidad de alimentación (unidades/revolución)	M48: Inhabilitar Spindle y Feed override (maquinar exclusivamente con las velocidades programadas)
	M49: Cancelar M48
	M62: Activar salida auxiliar 1
	M63: Activar salida auxiliar 2
	M64: Desactivar salida auxiliar 1
	M65: Desactivar salida auxiliar 2
	M66: Esperar hasta que la entrada 1 esté en ON
	M67: Esperar hasta que la entrada 2 esté en ON
	M70: Activar espejo en X
	M76: Esperar hasta que la entrada 1 esté en OFF
	M77: Esperar hasta que la entrada 2 esté en OFF
	M80: Desactivar el espejo en X
	M98: Llamada a subprograma
	M99: Retorno de subprograma

Figura 2.6. Códigos G y M más usados para un torno CNC

- Controlador CNC. - Interpreta un programa CNC y acciona la serie de comandos en orden secuencial. A medida que lee el programa, el controlador activa las funciones apropiadas de la máquina, sigue las instrucciones dadas en el programa.
- Programa CAM. - Cuando se dificulta la programación del código para el CNC, por desconocimiento o ante aplicaciones complicadas, se utiliza un programa CAM (fabricación asistida por computadora) que funciona en conjunto con el programa CAD (diseño asistido por computadora).

2.5. Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que son útiles para modelar y analizar problemas en los que una respuesta de interés está influenciada por varias variables y el objetivo del análisis es

optimizar las respuestas. Explora modelos empíricos simples, como los polinomios de bajo grado, para identificar la relación entre la variable de respuesta y un conjunto de variables de entrada sobre una región experimental. La región experimental es un espacio delimitado por los rangos experimentales utilizados en cada factor.

La MSR contempla tres aspectos generales: diseño, modelo y técnica de operación. El diseño consiste en la aplicación de un diseño de experimentos, de manera simple uno que pueda ajustar el modelo de regresión lineal múltiple, debe de ser un experimento apropiado basado en el conocimiento y la experiencia actual de que los resultados y valores a trabajar se encuentren en el punto óptimo. El modelo utiliza el análisis de regresión lineal múltiple, junto con sus elementos básicos que son: parámetros del modelo, modelo ajustado, significancia del modelo, prueba de falta de ajuste, residuos, predichos, intervalos de confianza para predichos y coeficiente de determinación, todo ello para obtener una ecuación matemática que relacione las variables de entrada del proceso con los factores de respuesta del diseño. Por último, la optimización son técnicas matemáticas para poder explorar el modelo matemático con el fin de obtener el punto óptimo.

2.5.1. Modelos

Como se mencionó previamente, los modelos son ecuaciones que se ajustan a los datos experimentales. Los modelos son básicamente polinomios, por ejemplo, el modelo de primer orden se rige por

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \tag{2.13}$$

Mientras que el modelo de segundo orden

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{2.14}$$

Donde

Y – Variable de respuesta

x_i – Variables independientes

β_i – Son los parámetros del modelo que se conocen como coeficientes de regresión (parámetros desconocidos)

ε – Error aleatorio

Se pueden generar modelos gráficos con las ecuaciones 2.13 y 2.14 donde se consideran dos variables de proceso y diferentes valores para los parámetros, las formas que pueden tomar las gráficas dependen de los valores de los coeficientes y de su signo. Para más de dos valores la superficie de respuesta no se puede graficar debido a que se encuentran en más de 3 dimensiones y su forma de graficarlas es demasiado compleja, por lo tanto, cuando se presentan diseños de más de 3 variables se pueden graficar con 2 factores dentro del rango de operación y el otro constante.

2.5.2. Optimización

Una vez obtenido nuestro modelo de regresión exploraremos la superficie descrita por este para así encontrar una combinación de los factores que resulten en un valor óptimo de la respuesta. La técnica de optimización depende del tipo de modelo y existen 3 métodos:

- Escalamiento ascendente. - Se aplica cuando, de acuerdo con la valoración inicial, se cree que se está lejos de la condición óptima, por lo que será necesario explorar una región de experimentación inicial y a partir de ésta determinar una dirección en la cual experimentar fuera de la región inicial.
- Análisis canónico. - Técnica empleada para caracterizar la superficie de segundo orden: las coordenadas del punto estacionario, el tipo de punto y la orientación de la superficie.

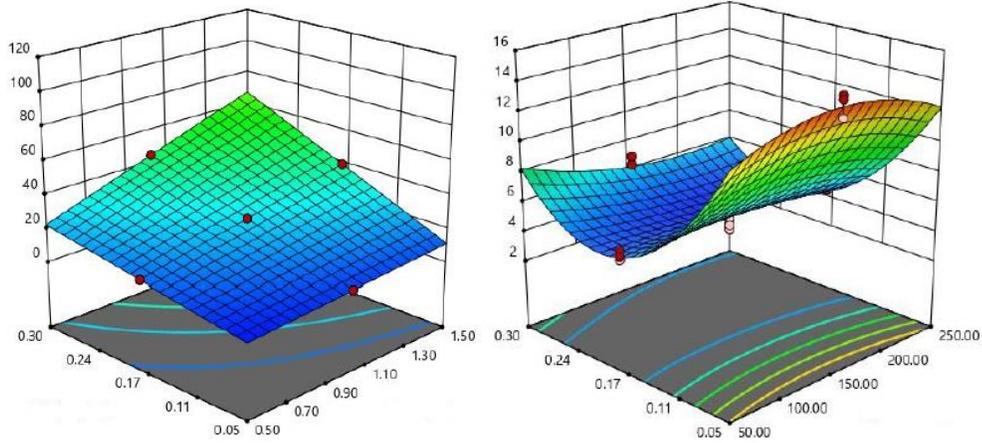


Figura 2.7 Diferentes tipos de superficies de respuesta; a) descrita por un modelo lineal y b) por un modelo cuadrático.

- Análisis de cordillera. - Técnica que se emplea para determinar el mejor punto dentro de la región experimental.

2.5.3. Diseño de experimentos

Son diseños experimentales usados para poder ajustar un modelo que nos describa una superficie de respuesta, estos diseños proporcionan los tratamientos necesarios a realizar para generar datos que permitan ajustar un modelo que describa una variable de respuesta en una región experimental. Los diseños deben de cumplir con las propiedades de ortogonalidad y rotabilidad.

La ortogonalidad sucede cuando las columnas de nuestro diseño son independientes una de otra, lo que hace que el efecto que tiene cada termino sobre la variable de respuesta se pueda evaluar de manera más precisa. La rotabilidad es cuando la varianza de un diseño depende solo de su distancia al centro y no de la dirección en la que este se encuentre.

Los diseños de primer orden se utilizan cuando solo es importante medir los efectos principales, los diseños de primer orden deben de cumplir con ciertos criterios para poder ser seleccionados, uno de los más importantes es que la varianza de la respuesta en un punto debe de ser mínima. Algunos ejemplos de diseños que cumplen con este criterio son:

- Diseños factoriales 2^k
- Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p}

- Diseño de Plackett-Burman
- Diseño simplex

La desventaja de los diseños lineales es que pasan por alto los efectos de interacción de las variables, los efectos de n grado y los de curvatura pura, para ello son necesarios los diseños de segundo orden. Estos diseños se emplean cuando se quiere explorar una región específica dentro de la región experimental o que nuestro valor óptimo se encuentra dentro. Este tipo de diseños deben de tener al menos 3 niveles en cada factor para poder estimar la curvatura de la superficie.

El diseño de composición central es el tipo de diseño más utilizado debido a su flexibilidad, se compone de 3 puntos:

- Una porción factorial, que es una réplica de un diseño factorial.
- 1 o más puntos centrales del diseño.
- Una porción axial, que son 2 puntos sobre cada eje que se ubican a una distancia α del centro.

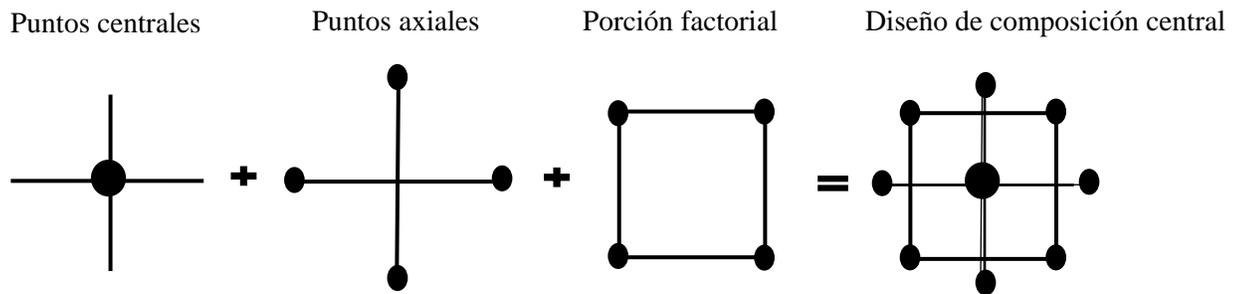


Figura 2.8 Representación del diseño de composición central.

Si se desea que el diseño sea ortogonal y rotatable se debe de cumplir

$$\alpha = (F)^{1/4} \tag{2.15}$$

Donde F es el número de puntos en la parte factorial.

Cuando $\alpha=1$ los puntos axiales se localizan en el centro de las caras, a esta variante se le denomina diseño de composición central centrado en las caras y es una variante

particularmente útil cuando se quiere completar el diseño 2^k o cuando solo se puede trabajar en intervalos precisos.



Capítulo 3

Marco

Metodológico

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para la investigación, la metodología de las pruebas experimentales, las técnicas utilizadas de análisis de datos, los equipos empleados, y la aplicación de ambos procesos de manufactura con parámetros adecuados acorde a literatura para mejorar la integridad superficial.

3.1 Revisión Estado del Arte

3.2 Análisis de deflexión

3.3 Material de Trabajo

3.4 Maquinado Inicial

3.5 Diseño de Experimentos

3.6 Medición de Rugosidad Superficial y RRM

3.7 Uso de Software Estadístico

3.8 Bruñido con Bola

3.1.Introducción

La Figura 3.1 muestra la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo satisfactorio de la presente investigación.



Figura 3.1 Metodología general para el desarrollo del proyecto.

3.2.Análisis de Deflexión

Debido al uso del proceso de torneado y bruñido en este trabajo, que se explicaron en el capítulo anterior, y que diversos análisis han demostrado que el uso del contrapunto ha llegado a generar deflexiones en algunas piezas de trabajo, es necesario analizar la deflexión máxima que se puede presentar en las probetas, por lo anterior, se procedió a hacer un análisis previo para saber si esta deformación es despreciable o si afectaría en nuestros resultados.

Se desarrollaron los siguientes análisis:

1. Probeta en cantiléver, carga máxima, variaciones de L entre 5 y 8 cm.

2. Probeta de 20 cm, considerando la inserción de sujeción para tener la longitud de prueba, apoyada en dos puntos y carga máxima.

Los resultados arrojaron una deformación máxima de 0.2×10^{-3} , si comparamos este valor con respecto a su longitud obtenemos el grado de afectación de la deformación, siendo este de 0.4%. Realizando el mismo análisis, para el segundo caso la deformación máxima es de 0.568×10^{-3} comparándolo con su longitud el grado de afectación es del 0.71%.

Debido a que el grado de afectación de la deformación para cada uno de los casos presentados es muy pequeño podemos concluir que la deformación que se presenta para nuestras probetas será despreciable.

3.3. Material de trabajo

El material utilizado en este trabajo fue el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE). Las propiedades del UHMWPE están dadas en la Tabla 3.1. Las piezas de trabajo se recibieron como barras de 40 mm de diámetro con una longitud de 15 cm.

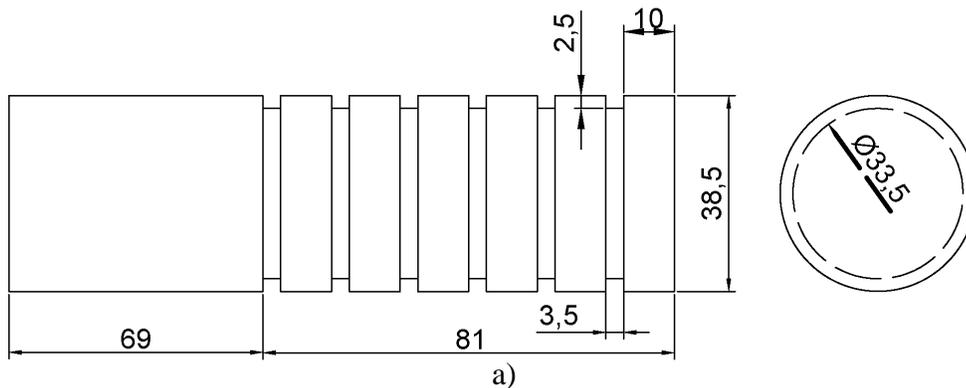
Tabla 3.1 Propiedades del UHMWPE utilizado en este trabajo

<i>Propiedades</i>	<i>Unidades</i>	<i>UHMWPE</i>
Gravedad Específica, 23°C	-	0.93
Resistencia a la tensión, 23°C	MPa	21
Módulo de Elasticidad a la Tensión, 23°C	MPa	827
Elongación a la ruptura, 23°C	%	200
Dureza, Durómetro, Escala Shore “D”, 23°C	-	D68
Coefficiente de Fricción Dinámico (En seco vs acero)	-	0.1-0.14
Coefficiente de Expansión Térmica Lineal (de -40°C a 149°C)	m/m/K	1.98×10^{-4}
Temperatura de Servicio Continuo en Aire (Max.)	°C	82
Absorción de Agua por Inmersión, en 24 Horas	% de peso	0

3.4. Proceso de Torneado

El estudio experimental de torneado se llevó a cabo en un CNC EMCO E65 controlado por sistema FANUC. Se utilizó un inserto de carburo de tungsteno VNMG-160408-DF, de acuerdo con la norma ISO-1832, el inserto se montó en un portaherramientas DVJNL 2020K16. Inicialmente las probetas (barras de UHMWPE) se cilindraron y carearon a una velocidad de 1000 rpm.

El cilindrado se realizó de manera automática empleando un código en el CNC (Tabla 3.2). En el código se indicaron el valor de profundidad de corte (ap), avance (f), velocidad de corte (Vc) y el sentido de giro. Una vez careada y cilindrada la probeta, esta se dividió en secciones de prueba (ver Figura 3.2a), para realizar en cada sección de prueba el proceso de torneado a diferentes parámetros de este. Al igual que el cilindrado, la generación de las secciones de prueba se llevó a cabo mediante otro código para optimizar los tiempos de maquinado (Anexo I).



b)

Figura 3.2 Probeta experimental de UHMWPE, a) Vista ortogonal de la probeta en mm y b) probeta manufacturada en el CNC.

La forma en que se realizó el cilindrado y el maquinado de la probeta se puede apreciar en la Figura 3.3, donde primero debemos de realizar el cilindrado y después el tronzado, todo ello apoyándonos del contrapunto para evitar que haya pandeo en la pieza y tener un mejor agarre de ella.

Tabla 3.2 Descripción del código utilizado para cilindrar nuestra pieza

Programa	Comentario
M21;	Mueve el contrapunto hacia delante
M04 S700;	Hace girar el husillo en sentido contrario a las manecillas del reloj y a una velocidad de 700 rpm
G91 G95;	Desplazamiento en modo incremental o relativo con una velocidad de corte expresada en mm/rev
G1 X-1 F0.1;	Maquinando, se avanza diametralmente 1 mm
Z-90 F0.1;	Con ese mismo avance se cilindra hasta z=-90mm
G0 X+10 Z+90;	Ir velozmente sin maquinar a la posición indicada
M05;	Detiene la rotación del husillo
M20;	Regresa el contrapunto hacia atrás
M30;	Terminar el programa

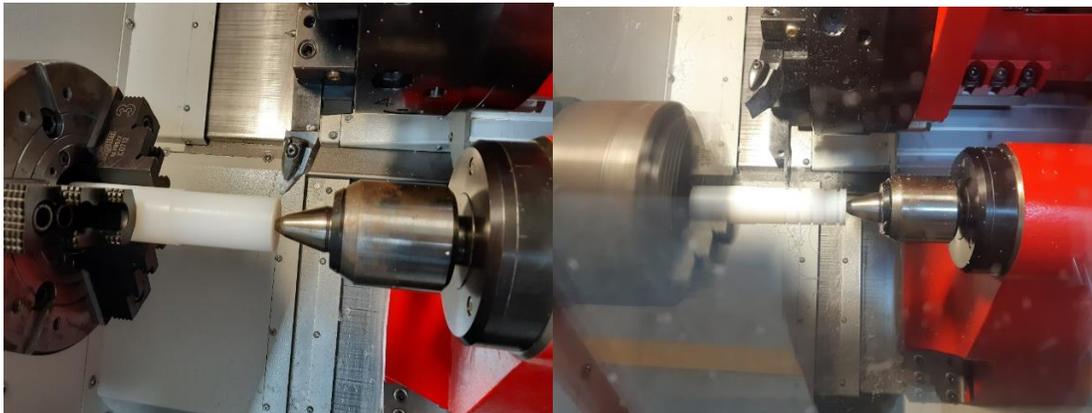


Figura 3.3 Maquinado de la probeta experimental; a) Cilindrado y b) Tronzado

3.4.1. Diseño de experimentos

Como se menciona anteriormente los parámetros para variar son velocidad de corte (V_c), avance (f) y profundidad de corte (ap), el tipo de giro solo se usa para asegurar que la pieza se encuentra rotando hacia el filo de la herramienta de corte. Estos parámetros son los más influyentes en la modificación en la rugosidad superficial (Ra) y la razón de remoción de

material (*RRM*). El objetivo del trabajo es verificar que el proceso de bruñido mejore la integridad superficial del material una vez torneado, pero para ello es necesario primero obtener los parámetros óptimos del proceso de torneado que maximicen la razón de remoción de material y minimicen la rugosidad superficial.

Para llevar a cabo el estudio del impacto de los parámetros V_c , f y ap en la R_a y RRM , se seleccionó un Diseño Central Compuesto (DCC) Centrado en las Caras en combinación con Metodología de Superficie de Respuesta. Los valores de entrada de los parámetros de corte para torneado fueron seleccionados en rangos recomendados por el fabricante del inserto, como se muestra en la Tabla 3.3. El diseño experimental resultó en 48 corridas experimentales, las cuales se realizaron por triplicado y aleatoriamente (Tabla 3.4).

Tabla 3.3 Parámetros de maquinado seleccionados para la investigación de torneado.

<i>Factores</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango de Operación</i>
Velocidad de corte (V_c)	m/min	50 - 250
Avance (f)	mm/rev	0.05 - 0.3
Profundidad de corte (ap)	mm	0.5 - 1.5

Se requirieron 8 probetas para realizar el experimento de 48 corridas, cada probeta con 6 secciones de prueba. La aleatorización de las pruebas nos permite asegurar que las repeticiones no sean consecutivas y poder minimizar el error. Cada barra se maquinó con 6 ranuras de 10 mm de longitud y un espaciado entre ellas de 2 mm (Figura 3.2b). Cada una de estas secciones se utilizó para el corte por torneado a diferentes parámetros del proceso en el orden que indica el Diseño de Experimentos (Tabla 3.4).

Para realizar el proceso de torneado las probetas se sujetaron por su lado liso al Chuck de 3 mordazas fijando el otro extremo con el contrapunto, se utilizó el mismo código de la Tabla 3.2 solo modificando los parámetros necesarios conforme la Tabla 3.4 para tornear a los diferentes parámetros del diseño.

Tabla 3.4 Diseño experimental para torneado resultado del Diseño Central Compuesto Centrado en las Caras.

<i>Prueba aleatoria</i>	<i>Prueba</i>	<i>Vc (m/min)</i>	<i>f (mm/rev)</i>	<i>ap (mm)</i>
13	1	50	0.05	1.5
32	2	150	0.05	1.0
10	3	250	0.3	0.5
47	4	150	0.175	1.0
26	5	50	0.175	1.0
23	6	250	0.3	1.5
43	7	150	0.175	1.0
31	8	150	0.05	1.0
35	9	150	0.3	1.0
2	10	50	0.05	0.5
16	11	250	0.05	1.5
15	12	50	0.05	1.5
33	13	150	0.05	1.0
19	14	50	0.3	1.5
21	15	50	0.3	1.5
41	16	150	0.175	1.5
30	17	250	0.175	1.0
29	18	250	0.175	1.0
1	19	50	0.05	0.5
4	20	250	0.05	0.5
42	21	150	0.175	1.5
36	22	150	0.3	1.0
8	23	50	0.3	0.5
18	24	250	0.05	1.5
20	25	50	0.3	1.5
40	26	150	0.175	1.5
25	27	50	0.175	1.0
11	28	250	0.3	0.5
34	29	150	0.3	1.0
3	30	50	0.05	0.5
14	31	50	0.05	1.5
27	32	50	0.175	1.0
17	33	250	0.05	1.5
37	34	150	0.175	0.5
45	35	150	0.175	1.0
28	36	250	0.175	1.0
48	37	150	0.175	1.0
38	38	150	0.175	0.5
12	39	250	0.3	0.5
9	40	50	0.3	0.5
46	41	150	0.175	1.0
5	42	250	0.05	0.5
39	43	150	0.175	0.5
6	44	250	0.05	0.5
22	45	250	0.3	1.5
24	46	250	0.3	1.5
7	47	50	0.3	0.5
44	48	150	0.175	1.0

3.4.2. Medición de Rugosidad Superficial y RRM

La medición de la rugosidad superficial en las probetas torneadas se registró por medio de un rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-310 y bajo la norma ISO-4287, se realizaron tres mediciones por cada sección de prueba registrando el promedio y su desviación estándar. Para la medición de RRM se utilizó la ecuación 2.5 sustituyendo en ella los valores de V_c, f y ap de la Tabla 3.4. Los resultados de estas mediciones se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados de las mediciones experimentales de Ra y RRM (R1=Primer medición de Ra, R2=Segunda medición de Ra, R3=Tercera medición de Ra, Desv. Std. = Desviación Estándar)

Aleatoria	Corrida	V_c (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	RRM (cm^3/min)	R1	R2	R3	Ra promedio (μm)	Desv. Std.
13	1	50	0.05	1.5	3.75	12.088	11.733	10.522	11.448	0.821
32	2	150	0.05	1.0	7.5	11.530	15.044	14.376	13.650	1.866
10	3	250	0.3	0.5	37.5	5.420	4.826	4.616	4.954	0.417
47	4	150	0.175	1.0	26.25	4.187	4.876	4.329	4.464	0.364
26	5	50	0.175	1.0	8.75	4.846	4.399	5.046	4.764	0.331
23	6	250	0.3	1.5	112.5	4.953	4.758	5.255	4.989	0.250
43	7	150	0.175	1.0	26.25	6.086	5.438	4.962	5.495	0.564
31	8	150	0.05	1.0	7.5	14.251	16.63	14.335	15.072	1.350
35	9	150	0.3	1.0	45	5.582	5.797	5.731	5.703	0.110
2	10	50	0.05	0.5	1.25	11.899	11.289	11.762	11.650	0.320
16	11	250	0.05	1.5	18.75	12.377	10.920	11.005	11.434	0.818
15	12	50	0.05	1.5	3.75	16.647	14.396	12.016	14.353	2.316
33	13	150	0.05	1.0	7.5	14.092	16.664	13.681	14.812	1.617
19	14	50	0.3	1.5	22.5	8.996	8.532	8.645	8.724	0.242
21	15	50	0.3	1.5	22.5	6.457	7.623	7.389	7.156	0.617
41	16	150	0.175	1.5	39.375	4.161	4.211	3.774	4.049	0.239
30	17	250	0.175	1.0	43.75	4.588	4.440	4.491	4.506	0.075
29	18	250	0.175	1.0	43.75	4.438	4.808	4.283	4.510	0.270
1	19	50	0.05	0.5	1.25	10.143	8.980	12.315	10.479	1.693
4	20	250	0.05	0.5	6.25	11.178	11.27	12.587	11.678	0.788
42	21	150	0.175	1.5	39.375	4.018	3.82	3.557	3.798	0.231
36	22	150	0.3	1.0	45	6.004	6.282	6.547	6.278	0.272
8	23	50	0.3	0.5	7.5	6.801	7.040	6.400	6.747	0.323
18	24	250	0.05	1.5	18.75	11.187	11.119	10.231	10.846	0.533
20	25	50	0.3	1.5	22.5	7.880	7.599	8.273	7.917	0.339
40	26	150	0.175	1.5	39.375	4.886	5.219	4.405	4.837	0.409
25	27	50	0.175	1.0	8.75	5.761	5.615	4.775	5.384	0.532
11	28	250	0.3	0.5	37.5	5.186	5.274	4.981	5.147	0.150
34	29	150	0.3	1.0	45	6.685	7.329	6.614	6.876	0.394
3	30	50	0.05	0.5	1.25	11.982	11.009	10.325	11.105	0.833
14	31	50	0.05	1.5	3.75	13.091	12.983	11.872	12.649	0.675
27	32	50	0.175	1.0	8.75	4.891	5.117	5.012	5.007	0.113
17	33	250	0.05	1.5	18.75	12.61	12.394	10.778	11.927	1.001
37	34	150	0.175	0.5	13.125	4.768	4.389	4.789	4.649	0.225
45	35	150	0.175	1.0	26.25	4.198	4.601	4.716	4.505	0.272
28	36	250	0.175	1.0	43.75	4.632	4.493	4.702	4.609	0.106
48	37	150	0.175	1.0	26.25	5.105	5.134	4.813	5.017	0.178

38	38	150	0.175	0.5	13.125	4.615	5.522	4.334	4.824	0.621
12	39	250	0.3	0.5	37.5	5.041	5.273	4.766	5.027	0.254
9	40	50	0.3	0.5	7.5	6.993	7.178	7.376	7.182	0.192
46	41	150	0.175	1.0	26.25	4.226	4.093	4.206	4.175	0.072
5	42	250	0.05	0.5	6.25	11.298	13.343	11.914	12.185	1.049
39	43	150	0.175	0.5	13.125	4.283	4.445	4.782	4.503	0.255
6	44	250	0.05	0.5	6.25	11.998	10.035	12.351	11.461	1.248
22	45	250	0.3	1.5	112.5	6.028	6.418	6.257	6.234	0.196
24	46	250	0.3	1.5	112.5	5.831	5.514	5.066	5.470	0.384
7	47	50	0.3	0.5	7.5	7.728	7.759	7.365	7.617	0.219
44	48	150	0.175	1.0	26.25	4.958	4.474	5.135	4.856	0.342

3.5. Bruñido con Bola

Con los resultados estadísticos y las pruebas de validación (ver Capítulo 4), se obtuvieron los parámetros óptimos de torneado que permiten minimizar la rugosidad superficial dentro del rango experimental en este estudio, siendo estos $V_c=218.48 \text{ m/min}$, $f=0.23 \text{ mm/rev}$ y $ap=0.52 \text{ mm}$. Con estos valores de corte se trabajarán las probetas para el proceso de bruñido con bola asegurando de esta manera que se trabajará con la rugosidad mínima dentro del rango de estudio por torneado y con el objetivo de implementar el bruñido con bola para reducir esta rugosidad mínima lograda por el proceso de torneado.

Para lo anterior, se utilizó una metodología similar a la del proceso de torneado, se elaboraron probetas con las mismas dimensiones que para el estudio experimental de torneado (Figura 3.2a) pero utilizando el código de la Tabla 3.6, el cual contiene los parámetros para automatizar el corte y proporcionar la rugosidad mínima lograda por el proceso de torneado, como rugosidad inicial para el bruñido.

Tabla 3.6 Código utilizado para establecer la rugosidad mínima por torneado antes del bruñido.

Programa	Comentario
M21;	Mueve el contrapunto hacia delante.
M04 S1738.6;	Hace girar el husillo en sentido contrario a las manecillas del reloj y a una velocidad de 1738.6 rpm.
G91 G95;	Desplazamiento en modo incremental o relativo con una velocidad de corte expresada en mm/rev.
G1 X-0.52 F0.23;	Maquinando se avanza diametralmente 0.52 mm.
Z-70 F0.23;	Con ese mismo avance se cilindra hasta $z=-70\text{mm}$.
G0 X+2 Z+70;	Ir velozmente sin maquinar a la posición indicada.
M05;	Detiene la rotación del husillo.
M20;	Regresa el contrapunto hacia atrás.
M30;	Finalizar el programa.

Se colocó el bruñidor en el mandril del torno CNC (Figura 3.4), para esto se utilizaron algunas laines para poder mantener el bruñidor en su lugar y con la ayuda del contrapunto se aseguró que su punta estuviera centrada en dirección radial (Figura 3.5). Con esto es posible comenzar a realizar las pruebas experimentales necesarias, pero, debido a que uno de los parámetros a variar del proceso de bruñido es la fuerza de aplicación (F) es necesario calibrar el desplazamiento del resorte en función de la fuerza estática de bruñido.

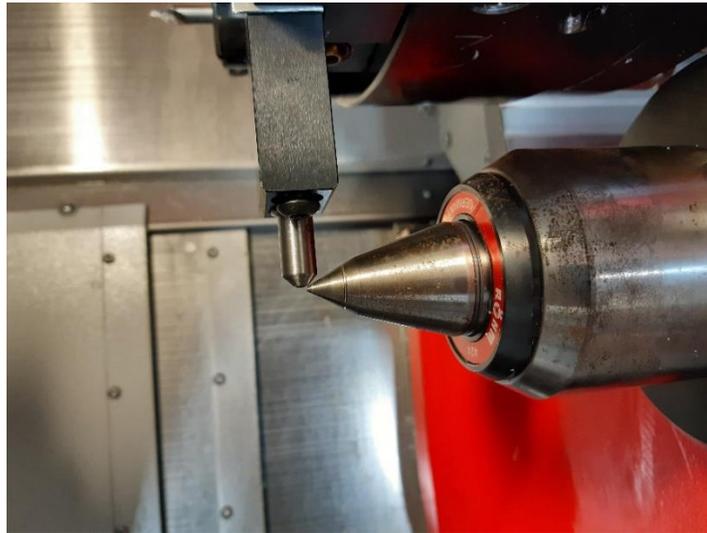


Figura 3.4 Montaje y ajuste del bruñidor en el torno CNC.



Figura 3.5 Centrado del bruñidor con bola.

3.5.1. Linealización

Para realizar la calibración del desplazamiento – fuerza de bruñido estática, se utilizó una celda de carga en “S”. El bruñidor utilizado es un Elliott Tool Technologies S2300, cuenta con un fragmento de diamante natural de 12.7 mm de diámetro el cual se montó en un centro de maquinado FADAL. Para poder llevar esto a cabo, fueron necesarios los siguientes pasos:

1. Se colocó el bruñidor junto con la celda de carga en el identador del centro de maquinado de manera vertical, ajustándolo hasta que el movimiento del bruñidor fuera nulo.
2. Teniendo el identador acoplado con el bruñidor se colocó en la maquina FADAL, como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Bruñidor y celda de carga colocados para la linealización.

3. Se colocó una pieza de UHMWPE y se ajustó hasta que su movimiento fuera nulo, dejando una cara de esta sobresaliente para trabajar en ella (Figura 3.7). Se realizó sobre el material de trabajo, para tener en cuenta el efecto de la microdeformación del material en la calibración.



Figura 3.7 Pieza de UHMWPE para la linealización.

4. Se conecto el display de la celda de carga y se procedió a tomar una medida sin mover el indentador, solo censando el peso del conjunto bruñidor-celda de carga.
5. Una vez colocado todo el sistema se procedió a ubicar la punta del bruñidor en la cara descubierta de la pieza, cuando se estuvo cerca se colocó una hoja de papel entre ambos para que al momento de acercar el bruñidor a la pieza fuera la referencia para que al dejar de moverse nos indicara que el bruñidor está tocando la pieza.
6. Se quita la hoja de papel y se desplaza el indentador lo mismo que el grosor de la hoja de papel para asegurar que se está trabajando sobre la cara de la pieza.
7. Ubicados sobre la pieza se procedió a observar el display del sensor para poder realizar la calibración, se fue avanzando en profundidad de corte y midiendo en saltos de 10 N la distancia recorrida.

La calibración se realizó para aplicar una fuerza de bruñidor en un rango de 0-300 N, esto debido a que la literatura muestra rangos similares de operación (Low y Wong, 2011; Janczewski *et al.*, 2016). Los datos se graficaron (Figura 3.8) para poder observar el comportamiento entre la fuerza de bruñido y la profundidad de corte. Se obtuvo una ecuación de regresión que relaciona la fuerza aplicada con el desplazamiento vertical del bruñidor.

$$y = 0.0134x + 0.3174 \quad (3.1)$$

Donde

x =Fuerza de bruñido (N)

y =Profundidad de corte (mm)

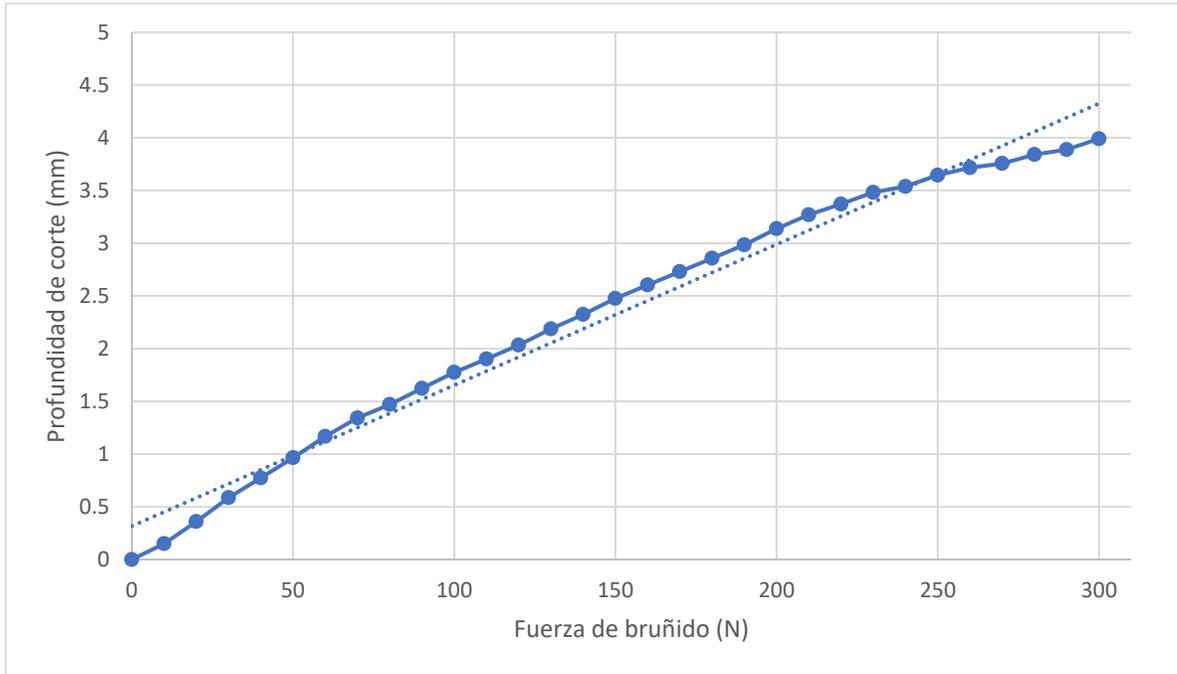


Figura 3.8 Gráfica de calibración entre la fuerza de bruñido y el desplazamiento vertical del bruñidor,

3.5.2. Diseño de Experimentos

Como se mencionó anteriormente el proceso de bruñido con bola mejora la integridad superficial de los materiales, los parámetros que más influyen en este proceso son: la velocidad de corte (V_c), avance (f) y fuerza de bruñido (F). Estos parámetros son los que más afectan la integridad superficial del material, siendo esto la rugosidad superficial (R_a) y la dureza superficial (HV).

Al igual que en el proceso de torneado, se seleccionó un Diseño Central Compuesto Centrado (DCC) en las Caras en combinación con Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para poder analizar el impacto de los parámetros de V_c , f y F . Los valores de entrada de los parámetros de bruñido fueron seleccionados con base en la literatura recabada (El-Tayeb, Low, & Brevern, 2008; Low y Wong, 2011; Janczewski *et al.*, 2016), como se muestra en la

Tabla 3.7. El diseño experimental resultó en 48 corridas experimentales, las cuales se realizaron por triplicado y aleatoriamente (Tabla 3.8).

Tabla 3.7 Parámetros de bruñido

<i>Factores</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango de Operación</i>
Velocidad de corte (V_c)	rpm	100-500
Avance (f)	mm/rev	0.05-0.3
Fuerza de bruñido (F)	N	50-400

El procedimiento por seguir es similar al del utilizado en el proceso de torneado, se maquinan las probetas necesarias para nuestra experimentación (8 probetas). Se colocan las probetas en el Chuck del CNC y se corre el mismo código utilizado, solo con la diferencia de que para poder ingresar la profundidad de corte nos auxiliaremos de la ecuación 3.1.

Tabla 3.8 Diseño experimental para bruñido resultado del Diseño Central Compuesto Centrado en las Caras.

<i>Aleatorio</i>	<i>Corrida</i>	<i>Vc (rpm)</i>	<i>F (N)</i>	<i>f (mm/rev)</i>
3	1	100	50	0.05
39	2	300	225	0.05
36	3	300	400	0.175
6	4	500	50	0.05
22	5	500	400	0.3
16	6	500	50	0.3
24	7	500	400	0.3
15	8	100	50	0.3
19	9	100	400	0.3
21	10	100	400	0.3
33	11	300	50	0.175
44	12	300	225	0.175
30	13	500	225	0.175
47	14	300	225	0.175
2	15	100	50	0.05
38	16	300	225	0.05
5	17	500	50	0.05
25	18	100	225	0.175
7	19	100	400	0.05
27	20	100	225	0.175

46	21	300	225	0.175
45	22	300	225	0.175
9	23	100	400	0.05
48	24	300	225	0.175
18	25	500	50	0.3
29	26	500	225	0.175
17	27	500	50	0.3
23	28	500	400	0.3
42	29	300	225	0.3
31	30	300	50	0.175
41	31	300	225	0.3
26	32	100	225	0.175
1	33	100	50	0.05
14	34	100	50	0.3
40	35	300	225	0.3
35	36	300	400	0.175
34	37	300	400	0.175
43	38	300	225	0.175
32	39	300	50	0.175
12	40	500	400	0.05
37	41	300	225	0.05
10	42	500	400	0.05
28	43	500	225	0.175
8	44	100	400	0.05
11	45	500	400	0.05
20	46	100	400	0.3
13	47	100	50	0.3
4	48	500	50	0.05

3.5.3. Medición de Rugosidad Superficial y Dureza

La medición de la rugosidad superficial en las probetas bruñidas se registró por medio de un rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-310 y bajo la norma ISO-4287, se realizaron tres mediciones por cada sección de prueba registrando el promedio y su desviación estándar. Las mediciones de dureza se obtuvieron empleando un microdurómetro MATSUZAWA MMT-X (Figura 3.9), el tipo de ensayo será mediante la dureza Vickers que calcula la carga entre el área de contacto, para ello se utilizó una carga de 1000 gr durante un tiempo de indentación de 15 s. Los resultados de estas mediciones se muestran en la Tabla 3.9.

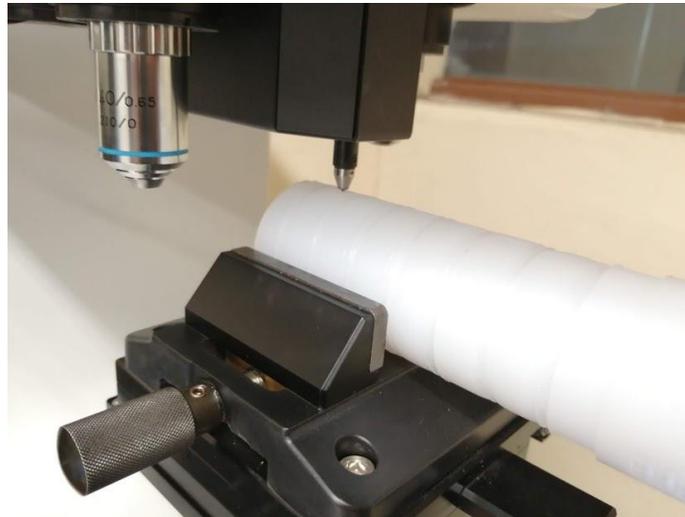


Figura 3.9 Prueba de Dureza Vickers.

3.6. Uso de Software Estadístico

Para poder interpretar los resultados de las mediciones experimentales de ambos procesos y como los parámetros afectan a las variables de respuesta se utilizaron los métodos estadísticos explicados en el capítulo anterior. Estos métodos estadísticos son más fáciles de aplicar si nos auxiliamos de un software estadístico, para esta investigación se utilizó el software estadístico Design Expert 12. En este software, tanto para el proceso de torneado como el de bruñido, se obtuvieron su análisis de varianza, análisis de regresión, diagnóstico de su comportamiento (normalidad, residuos, predichos vs actuales), sus gráficas de contornos, superficie de respuesta y finalmente se les aplicó una optimización para obtener los valores óptimos de cada parámetro que minimicen la rugosidad superficial y maximicen la razón de remoción de material (este último para el proceso de torneado únicamente). Lo anterior se presenta en el capítulo 4.

Tabla 3.9 Resultados de las mediciones experimentales de Ra y Dureza (Desv. Std. =Desviación Estándar)

<i>Aleatoria</i>	<i>Corrida</i>	<i>Vc (rpm)</i>	<i>F (N)</i>	<i>f (mm/rev)</i>	<i>Ra (μm)</i>	<i>Desv. Std</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Desv. Std.</i>
3	1	100	50	0.05	3.562	0.0875	2.4667	0.3215
39	2	300	225	0.05	2.921	0.1670	3.2667	0.2887
36	3	300	400	0.175	3.694	0.0727	3.2000	0.1000
6	4	500	50	0.05	3.567	0.1085	3.5667	0.2309
22	5	500	400	0.3	3.427	0.0667	3.9000	0.1000
16	6	500	50	0.3	4.188	0.1596	3.6000	0.2000
24	7	500	400	0.3	3.780	0.1437	3.5333	0.1155

15	8	100	50	0.3	4.480	0.1365	3.5000	0.6928
19	9	100	400	0.3	3.346	0.0133	3.6333	0.2517
21	10	100	400	0.3	3.088	0.1070	3.3667	0.2309
33	11	300	50	0.175	3.741	0.1545	3.4667	0.2082
44	12	300	225	0.175	3.206	0.0415	3.9333	3.9333
30	13	500	225	0.175	3.220	0.1346	2.9000	0.0000
47	14	300	225	0.175	3.206	0.0415	3.9333	3.9333
2	15	100	50	0.05	3.487	0.2739	3.3667	0.3055
38	16	300	225	0.05	3.070	0.1156	3.5000	0.2000
5	17	500	50	0.05	3.656	0.1944	4.1333	0.1528
25	18	100	225	0.175	3.609	0.1455	3.0000	0.1000
7	19	100	400	0.05	3.259	0.0552	3.3667	0.2517
27	20	100	225	0.175	3.087	0.0961	3.6000	0.2000
46	21	300	225	0.175	3.241	0.1367	4.1000	4.1000
45	22	300	225	0.175	3.448	0.0812	3.2667	3.2667
9	23	100	400	0.05	2.838	0.1093	4.0000	0.2000
48	24	300	225	0.175	3.448	0.0812	3.2667	3.2667
18	25	500	50	0.3	4.603	0.0670	3.3333	0.1528
29	26	500	225	0.175	3.243	0.0790	3.7667	0.3786
17	27	500	50	0.3	4.128	0.0908	3.0333	0.2082
23	28	500	400	0.3	3.253	0.1492	3.7667	0.1155
42	29	300	225	0.3	3.295	0.0427	4.3333	0.7095
31	30	300	50	0.175	3.448	0.1140	3.7000	0.1000
41	31	300	225	0.3	3.762	0.0403	4.7333	0.5508
26	32	100	225	0.175	3.285	0.0893	3.4667	0.4041
1	33	100	50	0.05	3.543	0.1131	2.9667	0.4163
14	34	100	50	0.3	4.382	0.1413	3.6667	0.1528
40	35	300	225	0.3	3.497	0.1802	3.5667	0.2082
35	36	300	400	0.175	3.386	0.0982	3.4667	0.3055
34	37	300	400	0.175	3.668	0.1342	4.0667	0.5859
43	38	300	225	0.175	3.241	0.1367	4.1000	4.1000
32	39	300	50	0.175	3.835	0.1074	3.4333	0.6658
12	40	500	400	0.05	4.860	0.1163	3.6667	0.1528
37	41	300	225	0.05	2.904	0.1105	3.5667	0.3215
10	42	500	400	0.05	5.220	0.0904	3.7667	0.2517
28	43	500	225	0.175	3.254	0.1304	3.4000	0.3464
8	44	100	400	0.05	3.243	0.1411	3.3000	0.2646
11	45	500	400	0.05	4.902	0.1113	4.2000	0.0000
20	46	100	400	0.3	3.539	0.0535	3.7000	0.3606
13	47	100	50	0.3	4.572	0.2580	4.3333	0.2517
4	48	500	50	0.05	3.661	0.1908	4.3333	0.4163



Capítulo 4

Resultados y Discusión

En este capítulo se expondrán todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación desde el proceso de torneado hasta el proceso de bruñido, cada uno con sus respectivas ecuaciones de regresión, sus superficies de respuesta, valores óptimos, sus ANOVA para cada caso y una discusión de los resultados obtenidos.

4.1 Proceso de Torneado

4.2 Proceso de Bruñido

4.1. Proceso de Torneado

4.1.1. Análisis de Varianza (ANOVA)

Con los resultados experimentales que nos muestra la Tabla 3.5 se realiza un análisis de varianza en el software Design Expert 12, la Tabla 4.1 representa los resultados del ANOVA para la variable de respuesta de rugosidad superficial (Ra). En dicha tabla se aprecia que el factor del avance (f) es el más influyente sobre la Ra , su contribución es del 18.02%. Se observa también que los parámetros de velocidad de corte (Vc) y profundidad de corte (ap) no son significativos. La interacción ($Vc \times f$) y los productos (ap^2), ($Vc^2 \times f$), ($Vc^2 \times ap$) tienen una contribución menor al 2%. La situación más interesante es el producto cuadrático del avance (f^2) que tiene una contribución del 38.23%. Los demás términos se asumen que no son significantes, debido a que su valor de P es mayor a 0.1. Esto resulta interesante ya que, las investigaciones realizadas por diversos autores en otros polímeros (Chabbi *et al.*, 2017; J. Paulo Davim, 2004; Kaddeche, Chaoui y Yallese, 2012) expresan que son más de un solo factor los que influyen, aunque el que siempre prevalece es el avance (f).

El valor F del Modelo es de 111.58, esto implica que el modelo es significativo. Solo hay una probabilidad del 0.01% de que un valor F tan grande pueda ocurrir debido al ruido. El valor F de la Falta de Ajuste es de 2.43, esto implica que la Falta de Ajuste no es significativa en relación con el Error Puro. Existe una probabilidad del 12.82% de que el valor F de la Falta de Ajuste sea tan grande debido al ruido. Que la Falta de Ajuste no sea significativa es algo bueno ya que eso significa que nuestro modelo se ajusta y eso es lo que se busca a la hora de hacer cualquier tipo de experimentación.

Una posible explicación del porque el avance es el único factor influyente en nuestro modelo puede deberse a que su aumento genera surcos en la pieza de trabajo resultantes de la forma de la herramienta. Estas ranuras son más profundas y anchas cuando f tiene valores altos. De hecho, la cantidad de material removido en cada vuelta aumenta a medida que aumenta la velocidad de avance, lo que aumenta la cantidad de calor producido. La deformación plástica de la pieza de trabajo es, generalmente, proporcional a la cantidad de calor producido y esto conlleva a la degradación de la rugosidad superficial (Jiang, Zhang, y Pittolo, 2000; Bouchelaghem *et al.*, 2007; Vijaya y Chincholkar, 2010). En otras palabras, con avances pequeños la herramienta de corte permanece más tiempo en contacto con el material y el

calentamiento producido de esta interacción prolongada degrada el material ocasionando un incremento en la rugosidad, mientras que, con avances altos, este calentamiento no afecta a la rugosidad superficial del material.

Tabla 4.1 ANOVA para la variable de respuesta Ra ($SC=$ Suma de Cuadrados, $GDL=$ Grados de Libertad, $MC=$ Media Cuadrada)

<i>Fuente</i>	<i>SC</i>	<i>GDL</i>	<i>MC</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Valor de P</i>	<i>Contribución %</i>	<i>Observaciones</i>
Modelo	550.38	13	42.34	111.58	<0.0001	-	-
A-Vc	0.39	1	0.39	1.03	0.32	0.07	No significante
B-f	101.5	1	101.5	267.5	<0.0001	18.02	Significante
C-ap	0.28	1	0.28	0.73	0.4	0.05	No significante
AB	5.39	1	5.39	14.2	0.001	0.96	Significante
AC	2.05	1	2.05	5.41	0.03	0.36	Significante
BC	0.003	1	0.003	0.01	0.93	5.32×10^{-4}	No significante
A ²	1.17	1	1.17	3.07	0.09	0.21	No significante
B ²	215.37	1	215.37	567.62	<0.0001	38.23	Significante
C ²	4.3	1	4.3	11.33	0.002	0.76	Significante
ABC	1.33	1	1.33	3.5	0.07	0.24	No significante
A ² B	10.01	1	10.01	26.38	<0.0001	1.78	Significante
A ² C	1.43	1	1.43	3.76	0.06	0.25	No significante
AB ²	0.76	1	0.76	2.01	0.17	0.14	No significante
Residual	12.9	34	0.38			2.29	
Falta de Ajuste	0.8864	1	0.8864	2.43	0.1282	0.15	No significante
Error puro	12.01	33	0.3641			2.13	
Total	563.28	47					

Los perfiles de rugosidad obtenidos para diferentes valores de avance (f) corroboran lo antes mencionado (Figura 4.1). En la Figura 4.1a se puede apreciar que el valor de avance más bajo (0.05 mm/rev) de la prueba experimental número 8 obtiene un valor de $Ra=14.93 \mu\text{m}$, mostrando visualmente la degradación sufrida por el avance lento, también no es posible observar ningún patrón generado por la herramienta de corte arrojando un perfil no uniforme de rugosidad. Por otro lado, las Figuras 4.1b y 4.1c muestran que conforme el avance incrementa, logra apreciarse un perfil uniforme de rugosidad. La Figura 4.1 también muestra

que un incremento en el avance f de 0.05 mm/rev a 0.18 mm/rev permite reducir la rugosidad superficial de 14.93 μm a 3.81 μm . Sin embargo, si se continúa incrementando el avance hasta 0.30 mm/rev, la rugosidad superficial incrementa también hasta 6.68 μm degradando el material.

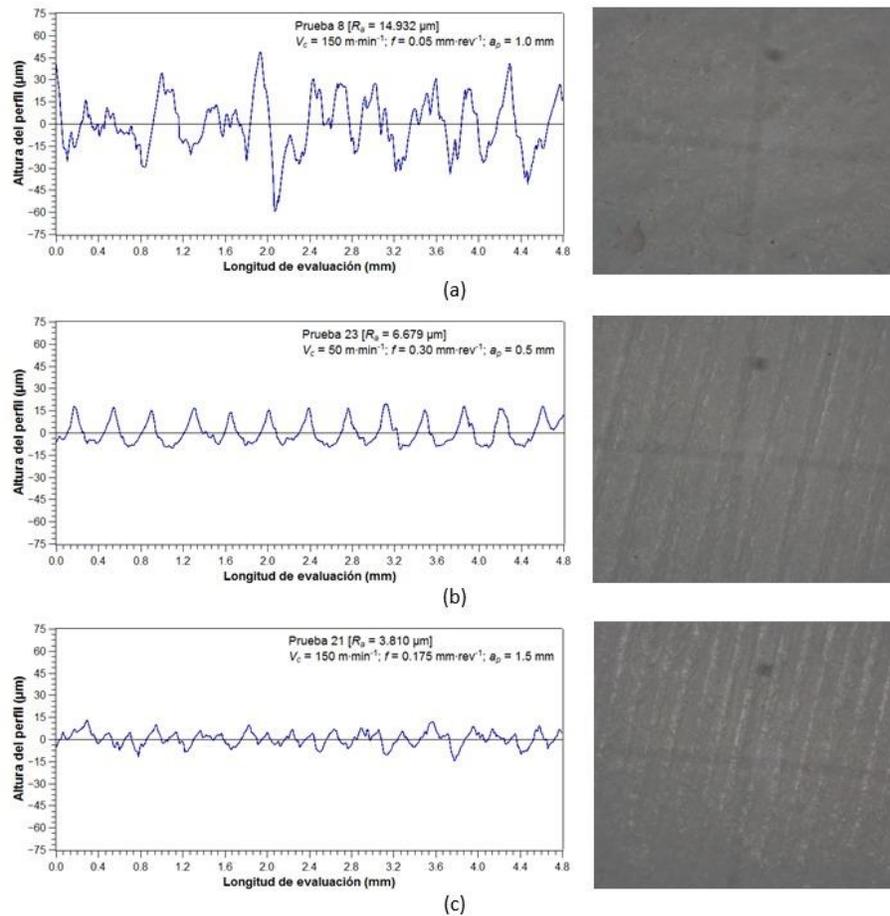


Figura 4.1 Perfiles de rugosidad y micrografías (amplificación de 15X) para los ensayos experimentales (a)8, (b)23 y (c)21.

En la Tabla 4.2 se presenta el ANOVA para la razón de remoción de material (RRM), en ella se puede observar que los valores con la contribución más alta son el avance (f) con un 31.44% y la velocidad de corte (V_c) con un 27.39%, le sigue la profundidad de corte (a_p) con 15.4% y la interacción ($V_c \times f$) con 11.18%. Las interacciones ($V_c \times a_p$, $f \times a_p$) tienen una contribución menor al 7%.

En la Tabla 4.2 se puede apreciar que todos los parámetros son significativos en nuestro rango de operaciones, pero esto era obvio debido a que la obtención de su valor numérico fue mediante la ecuación 2.5 y no por medición experimental como fue el caso de la *Ra*. Lo importante del ANOVA para la *RRM* es la aportación de cada uno de los parámetros, con el fin de poder tener una mejor interpretación de los valores y realizar una buena optimización.

Tabla 4.2 ANOVA para la variable de respuesta *RRM* (*SC*=Suma de Cuadrados, *GDL*=Grados de Libertad, *MC*=Media Cuadrada)

Fuente	SC	GDL	MC	Valor de F	Valor de P	Cont. %	Observaciones
Modelo	32599.22	6	5433.20	237.61	< 0.0001		
A-Vc	9187.5	1	9187.5	401.8	< 0.0001	27.40	Significante
B-f	10546.88	1	10546.88	461.25	< 0.0001	31.45	Significante
C-ap	5167.97	1	5167.97	226.01	< 0.0001	15.41	Significante
AB	3750	1	3750	164	< 0.0001	11.18	Significante
AC	1837.5	1	1837.5	80.36	< 0.0001	5.48	Significante
BC	2109.38	1	2109.38	92.25	< 0.0001	6.29	Significante
Residual	937.5	41	22.87				
Total	33536.72	47					

El valor del coeficiente de regresión (R^2) es de 0.9683 para la *Ra* y 0.9680 para la *RRM*, este valor mientras más cercano a 1.0 no indica que el modelo de predicción es más acertado. El R^2 es una herramienta estadística que mide la proporción de variabilidad en los datos experimentales (Gutiérrez Pulido y De la Vara Salazar, 2008). Las ecuaciones 4.1 y 4.2 son las ecuaciones de regresión para la rugosidad superficial y la razón de remoción de material, obtenidas por un modelo de regresión cubico modificado para la *Ra* y un modelo 2FI para la *RRM*.

$$\begin{aligned}
 Ra = & 9.3004 + 0.1135 \times V_c - 125.6623 \times f + 9.8169 \times a_p - 0.3329 \times V_c \times f - 0.0451 \times V_c \times \\
 & a_p - 5.8333 \times f \times a_p - 3.4957 \times 10^{-4} \times V_c^2 + 372.2078 \times f^2 - 2.9483 \times a_p^2 + 0.0376 \times V_c \times f \times \\
 & a_p + 1.1553 \times 10^{-3} \times V_c^2 \times f + 1.0901 \times 10^{-4} \times V_c^2 \times a_p - 0.2549 \times V_c \times f^2
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
 MRR = & 26.25 - 0.175 \times V_c - 150 \times f - 26.25 \times a_p + V_c \times f + 0.175 \times V_c \times a_p + 150 \times f \times \\
 & a_p
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Los modelos anteriores sirven para predecir tanto la rugosidad superficial como la razón de remoción de material dentro del rango de operaciones estudiado en este trabajo.

4.1.2. Herramientas de Diagnostico

Para poder comprobar la validez de los resultados obtenidos por el análisis de varianza es necesario verificar que se cumplan los supuestos del modelo para la *Ra*. Para ello, se verificarán su normalidad, varianza constante e independencia. No se realizará este diagnostico al ANOVA de la *RRM* debido a que su calculo fue mediante una ecuación, como ya se explico anteriormente, y no es necesario la corroboración por medios estadisticos de la vericidad de una ecuación ya existente.

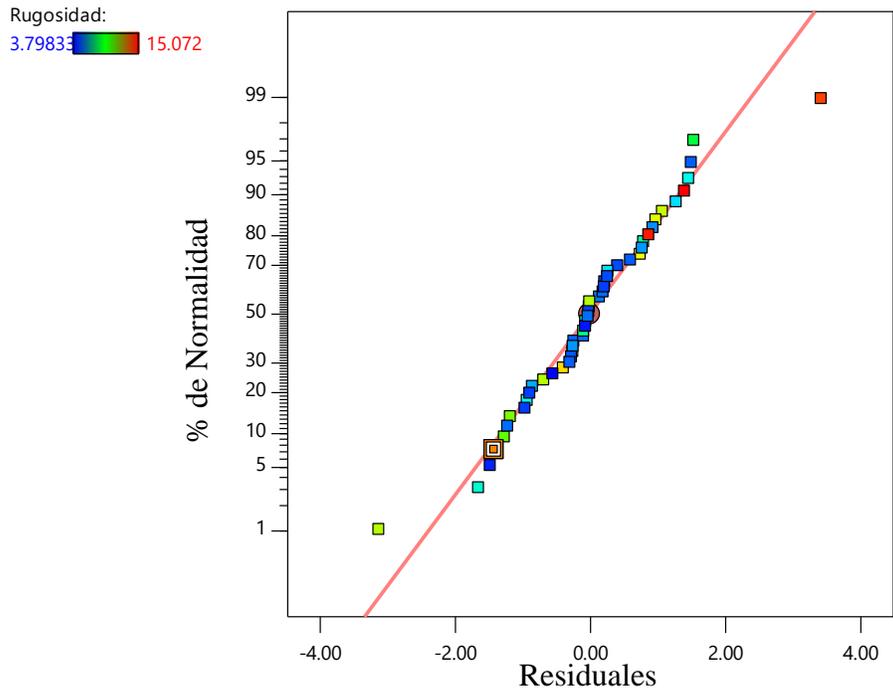


Figura 4.2 Gráfica de probabilidad normal para la *Ra*.

El diagnostico de normalidad nos indica si los residuos siguen una distribución normal, o sea, una línea recta. Cabe mencionar que el ajuste de los residuos a la línea recta no sea perfecto, dado a que es normal algunas pequeñas variaciones y desviaciones, solo se deben de buscar patrones definidos que no cumplan con el seguimiento de una línea recta. La Figura 4.2 muestra como los valores de los residuales si caen dentro de una línea recta, por ende, se puede decir que la *Ra* cumple con el supuesto de normalidad para nuestro rango de operaciones.

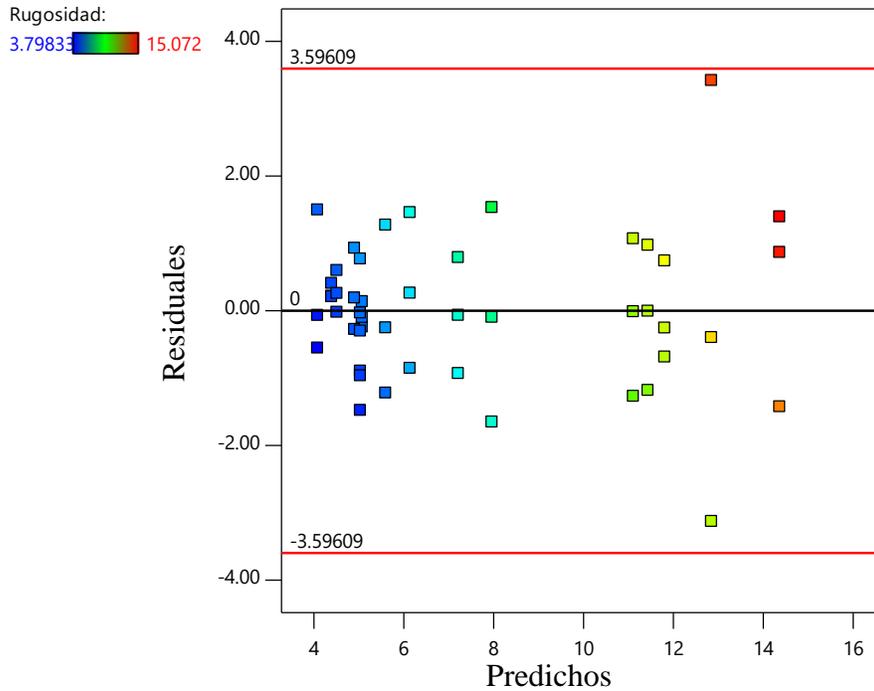


Figura 4.3 Gráfica de supuesto de varianza para la Ra .

Para poder validar el diagnostico de varianza constante es necesario graficar los predichos contra los residuales y si el comportamiento de los puntos es aleatorio en una banda horizontal, o sea, que no tiene algún tipo de patrón este diagnóstico se cumple. La Figura 4.3 nos muestra la gráfica de predichos contra residuales para la Ra , se puede apreciar que no se forma ningún tipo de patrón definido, por ende, se puede decir que la Ra cumple con el supuesto de varianza constante para nuestro rango de operaciones.

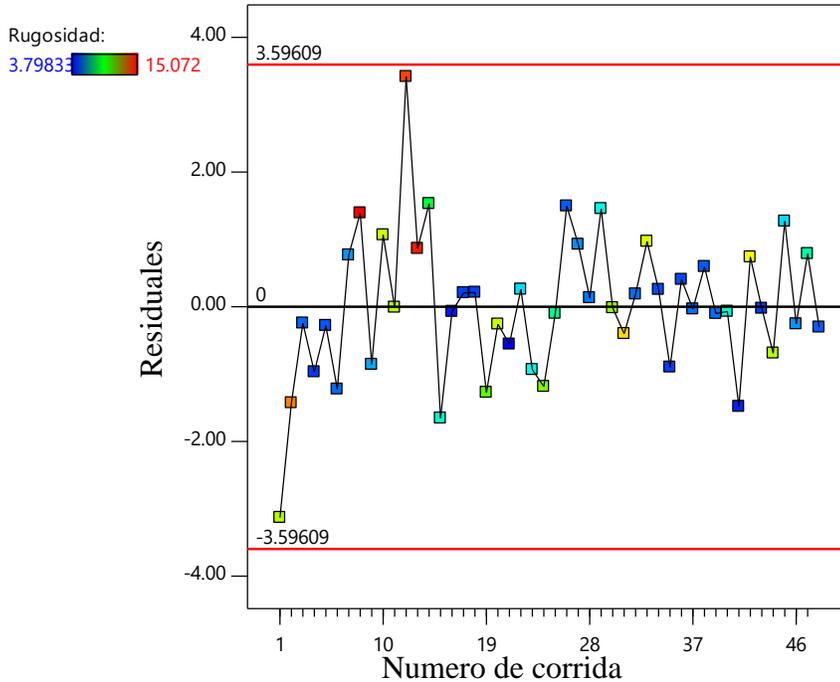


Figura 4.4 Gráfica de independencia para Ra .

El supuesto de independencia se verifica al graficar el número de corrida experimental contra los residuales, si en esta gráfica se muestra una tendencia o patrón definidos, entonces el supuesto no se cumple en caso contrario el supuesto se cumple. La Figura 4.4 presenta la gráfica del supuesto de independencia, en ella se aprecia que los puntos no siguen una tendencia entre ellos sino más bien saltos entre uno y otro, por ende, se puede decir que la Ra cumple con el supuesto de independencia para nuestro rango de operaciones.

4.1.3. Pruebas de Validación

Con el objetivo de validar la ecuación 4.1, se llevaron a cabo cuatro pruebas experimentales, con parámetros de torneado que no se utilizaron como parte del estudio inicial, pero, que se encuentran dentro del rango de operaciones. Los valores seleccionados se introdujeron como parámetros en el CNC y se sustituyeron en la ecuación, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.3. La comparativa de los resultados experimentales con los calculados se aprecian en la Figura 4.5. El porcentaje de error más alto fue de 9.21%, siendo esto una diferencia aceptable entre el resultado experimental y el obtenido por el modelo de predicción para Ra .

Tabla 4.3 Resultados de las pruebas experimentales de validación del modelo de Ra

No. de prueba	Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/rev)	Ra experimental (μm)	Ra calculado (μm)	Error %
Caso 1	100	0.8	0.24	5.054	4.5882	9.21
Caso 2	218	0.52	0.23	3.297	3.3972	3.04
Caso 3	248	0.66	0.23	3.804	3.5274	7.27
Caso 4	200	1.25	0.24	3.980	3.8272	3.84

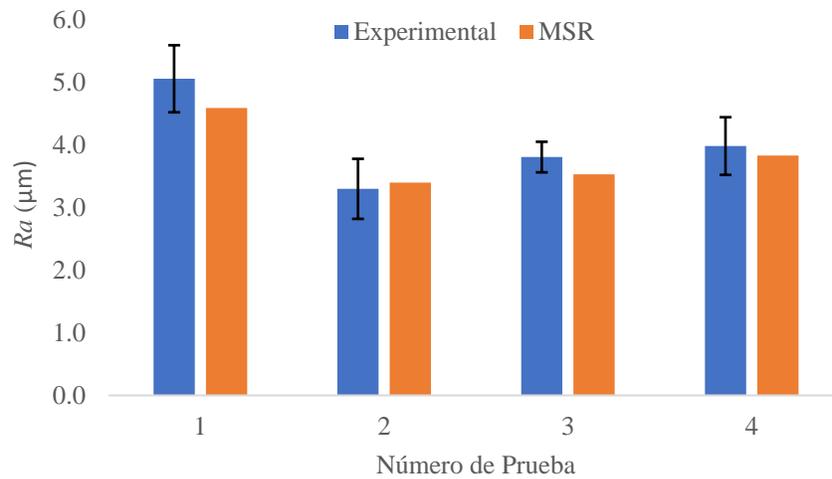


Figura 4.5 Gráfica comparativa de los resultados experimentales con los de la MSR.

4.1.4. Gráficas 3D y de Contornos

En orden de entender mejor el efecto de interacción de las variables del proceso de torneado (Vc, f, ap) sobre Ra y MRR , se presentan las gráficas de superficie y de contorno (Figuras 4.6 y 4.7) basadas en las ecuaciones de regresión 4.1 y 4.2. Debido a que cada modelo cuenta con tres variables, una variable se mantuvo constante en el nivel central para cada gráfica.

En la Figura 4.6a se muestra que la velocidad de corte en el rango de 50 a 250 m/min no es un parámetro que presente un efecto significativo en la Ra , apenas presenta una ligera variación. Sin embargo, el avance (f) muestra un efecto significativo sobre Ra , si mantenemos constante la Vc a 50 m/min, a medida que el avance se reduce de 0.30 a 0.17 mm/rev la Ra disminuye sustancialmente de 8.18 a 4.94 μm sin embargo, al seguir disminuyendo el avance por debajo de 0.17 y hasta 0.05 mm/rev la Ra vuelva a incrementar de 4.94 a 12.65 μm .

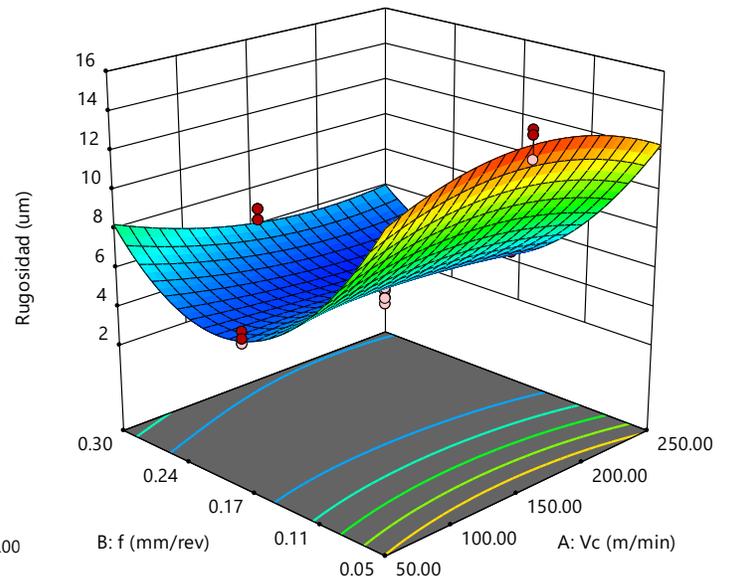
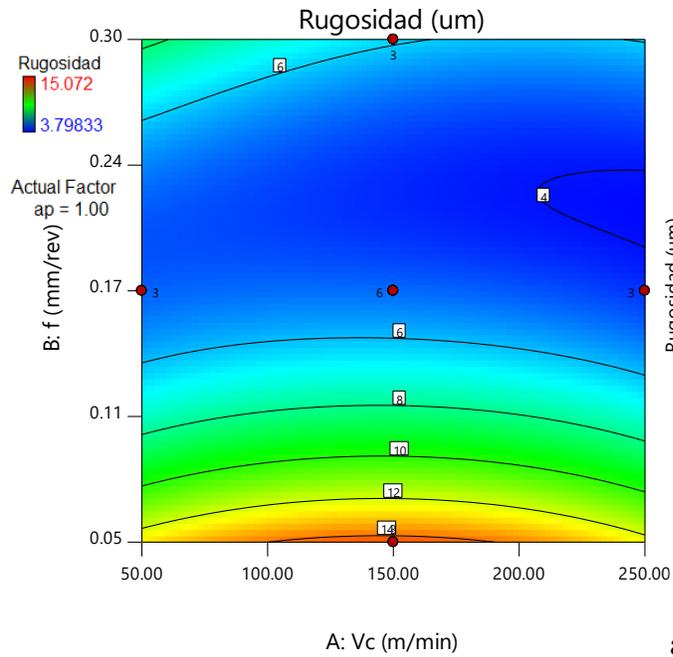
La Figura 4.6b corrobora el efecto significativo del avance (f), se observa el mismo efecto que se observó en la Figura 4.6a para el avance. Por otro lado, la variación de la Ra para las diferentes profundidades de corte (ap) es mínima, lo que demuestra que la ap entre 0.5 a 1.5 mm no tiene un efecto significativo en la Ra .

En la Figura 4.6c se presenta la gráfica de superficie y contorno para la Ra en función de ap y Vc , la cual permite visualizar de mejor manera que ambas variables en nuestro rango de operación no tienen un efecto significativo sobre la Ra .

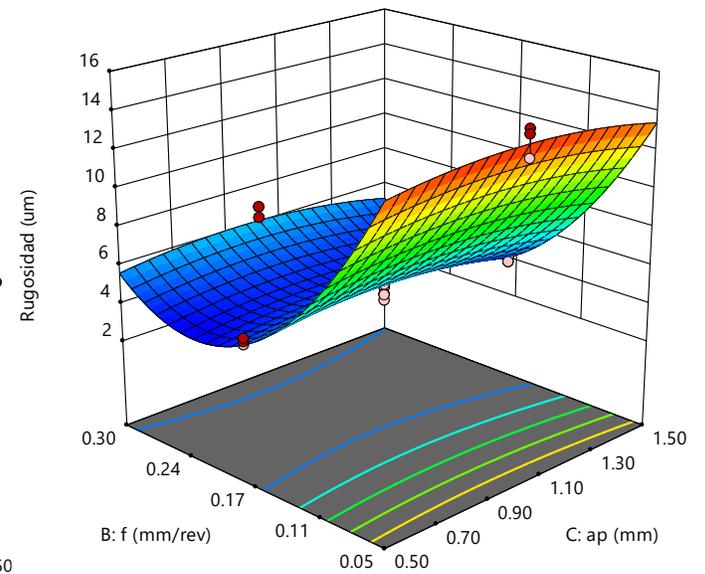
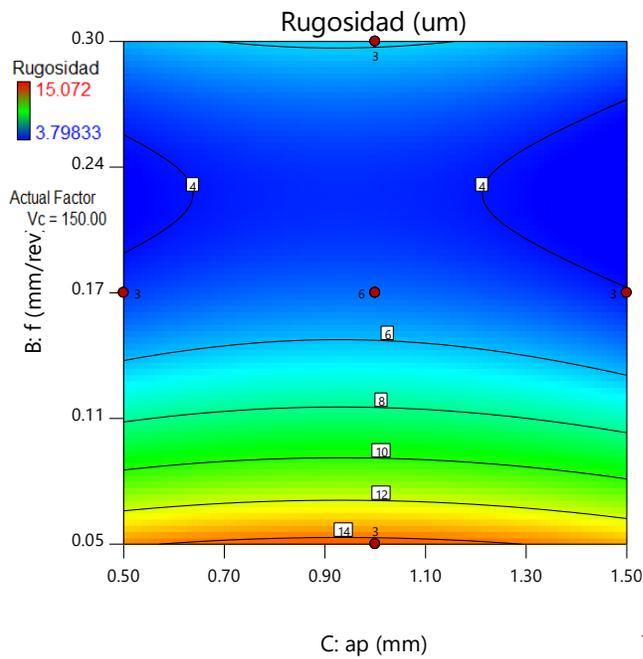
En la Figura 4.7 se muestran las gráficas de superficie y contorno para la variable de respuesta RRM . En ellas se observa un comportamiento lineal, como era de esperarse ya que la ecuación 2.5 es lineal, lo interesante es como la aportación de cada uno de los parámetros afecta a la RRM . La Figura 4.7a muestra la interacción de la Vc y el f , se puede apreciar que esta interacción nos arroja un mínimo de $RRM = 2.7067$ y un máximo de $RRM = 72.6987$ para una $ap = 1.0$ mm.

En la Figura 4.7b la interacción de los parámetros $ap \times Vc$ muestran un comportamiento similar a la Figura 4.7a pero, si dejamos la $Vc = 50$ m/min se puede observar que el incremento en la RRM por parte de la ap es muy poco (de 5.7131 hasta 13.9739 cm^3/min) corroborando que su aportación es de las más bajas en comparación con las otras 2 variables. Si dejamos la $ap = 0.5$ mm el incremento de la RRM por parte de la Vc es más significativo yendo desde 5.7131 hasta 22.0304 cm^3/min lo que nos ayuda a comprobar su porcentaje de aportación obtenido en el ANOVA.

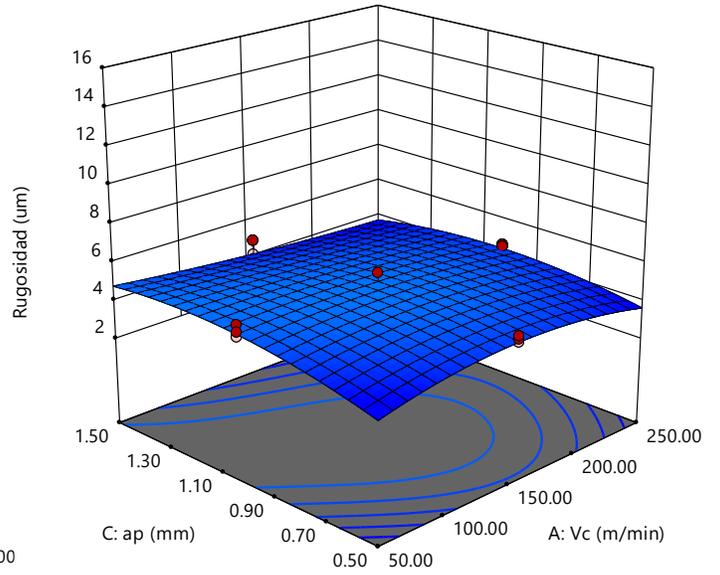
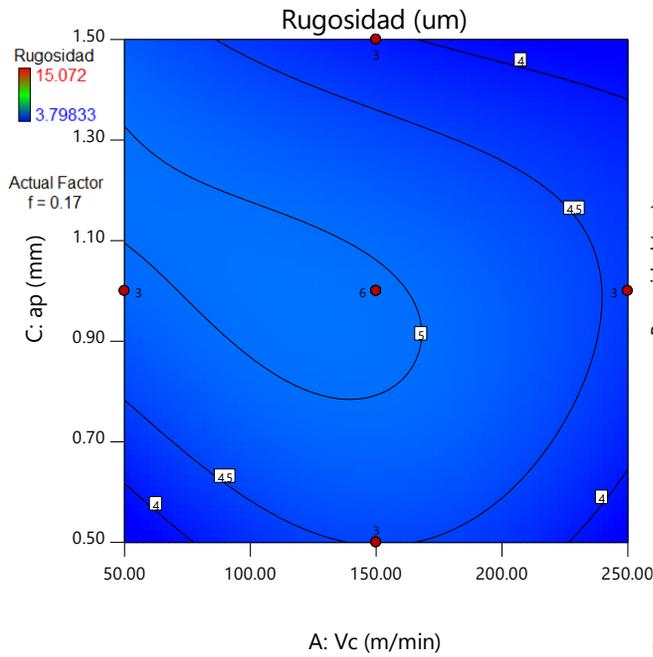
En la Figura 4.7c si dejamos la ap en su valor mínimo podemos observar que el incremento en la RRM debido a f va desde 4.8439 hasta 23.3078 cm^3/min esto corrobora que es el parámetro que más afecta a la RRM por otro lado, la ap tiene el mismo comportamiento que la Figura 4.7b dando una aportación muy pequeña al incremento de RRM .



a)

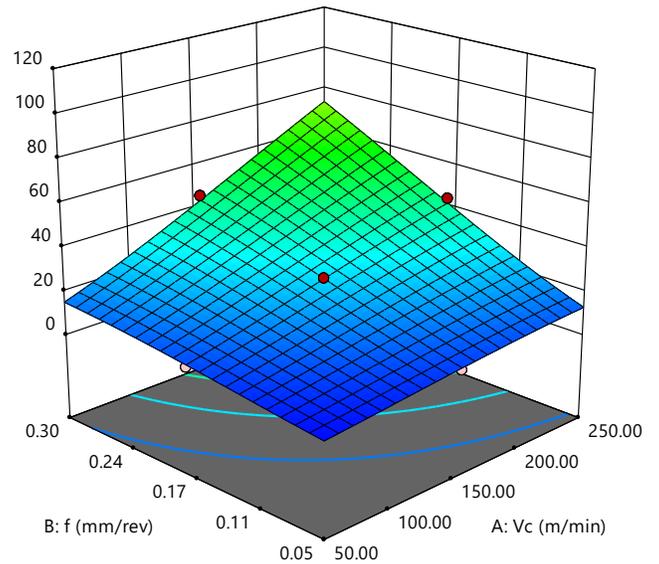
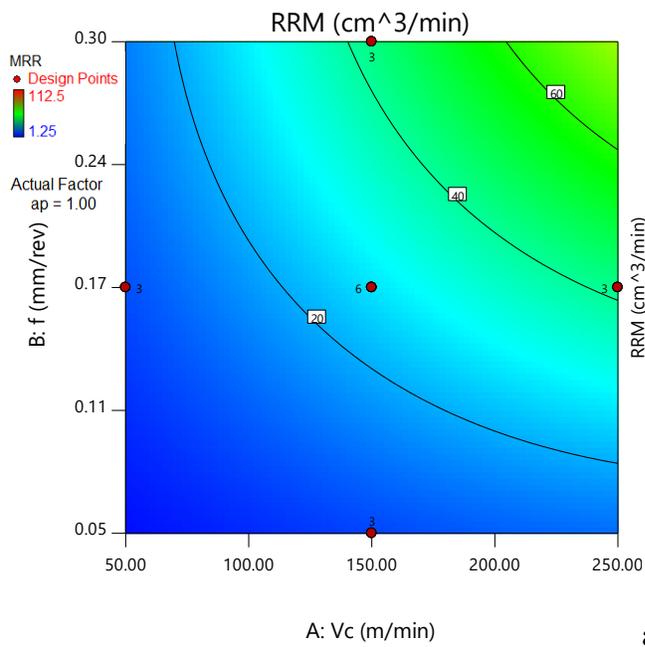


b)



c)

Figura 4.6 Gráficas de superficie de respuesta para la Ra , de contorno (derecha), 3D (izquierda).



a)

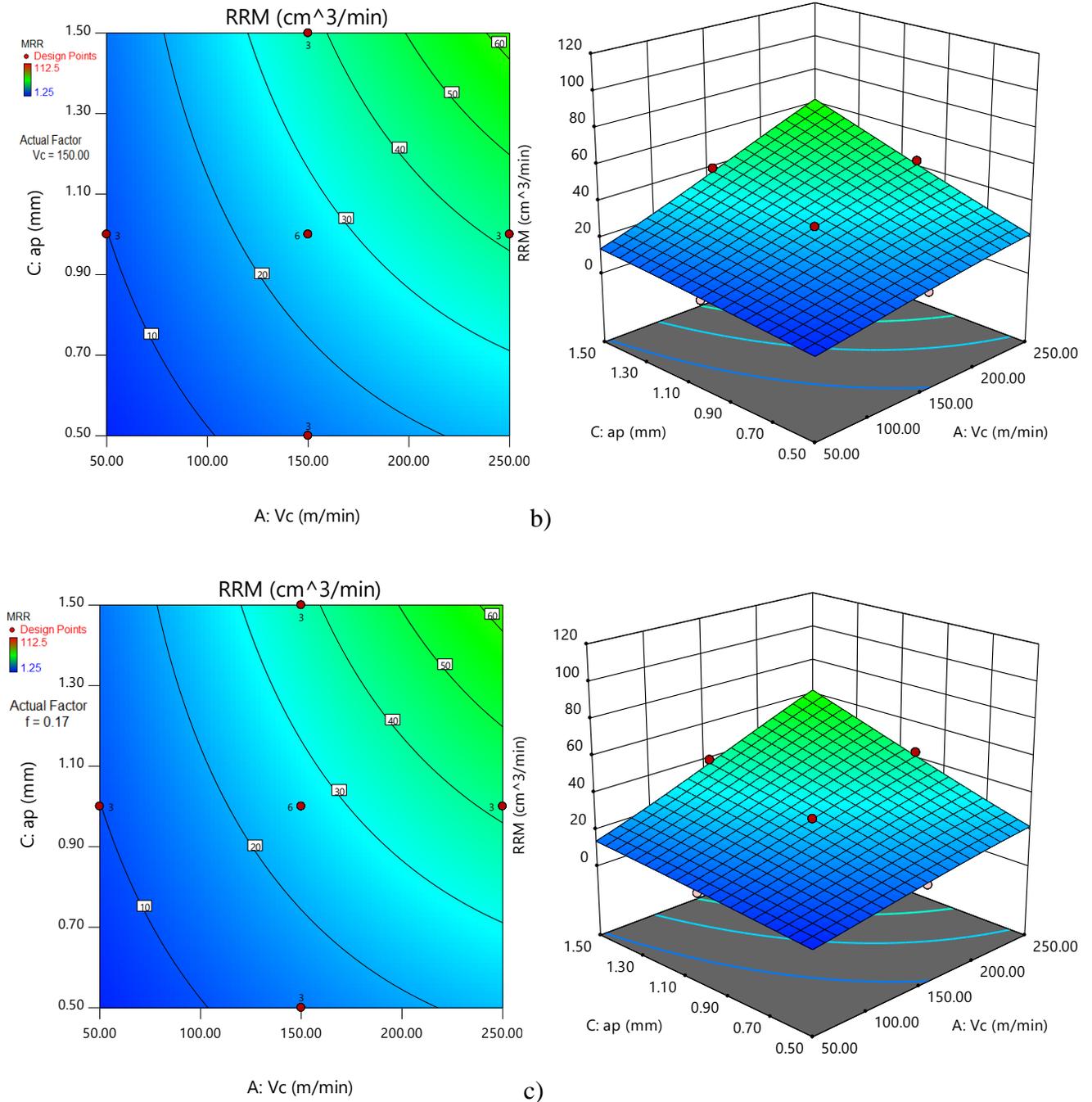


Figura 4.7 Gráficas de superficie de respuesta para la MRR, de contorno (derecha), 3D (izquierda).

4.1.5. Optimización de la Ra y RRM

Como el objetivo de este trabajo es la mejora de la integridad superficial del UHMWPE es necesario realizar una optimización de la Ra, lo que comúnmente se conoce como “optimización de calidad”, también de la RRM, “optimización de producción”, y por último

la optimización en conjunto de ambas variables de respuesta. El método de optimización consiste en encontrar los valores óptimos de V_c , ap y f que conlleven al valor mínimo de la Ra con el valor máximo de RRM . El rango de los factores definidos para la optimización se encuentra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Rangos de optimización para la calidad, producción y su combinación

<i>Nombre</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>	<i>Peso inferior</i>	<i>Peso superior</i>	<i>Importancia</i>		
						<i>Calidad</i>	<i>Producción</i>	<i>Combinación</i>
V_c (m/min)	En rango	50	250	1	1	3	3	3
f (mm/rev)	En rango	0.05	0.3	1	1	3	3	3
ap (mm)	En rango	0.5	1.5	1	1	3	3	3
Ra (μm)	Minimizar	3.7983	15.072	1	1	5	No	5
RRM (cm^3/min)	Maximizar	1.25	112.5	1	1	No	5	5

Comenzaremos con el primer caso que compete a la optimización de calidad, el objetivo de esta optimización es minimizar el valor de Ra , el resultado nos arroja 100 combinaciones posibles de los valores de V_c , ap y f dentro del rango de operación, los resultados más importantes se muestran en la Tabla 4.5. La Figura 4.8 muestra las gráficas de contornos de deseabilidad (izquierda de la figura) para el caso 10, y en el lado derecho se puede apreciar donde se ubica el resultado de la Ra dentro de nuestro rango de operaciones.

Tabla 4.5 Resultados para la optimización de calidad

<i>Numero</i>	<i>Vc (m/min)</i>	<i>f (mm/rev)</i>	<i>ap (mm)</i>	<i>Ra (μm)</i>	<i>Deseabilidad</i>
1	56.455	0.173	0.518	3.780	1.000
2	111.766	0.221	1.486	3.682	1.000
3	199.779	0.214	0.625	3.793	1.000
4	131.221	0.226	0.508	3.780	1.000
5	170.989	0.218	0.547	3.759	1.000
6	133.589	0.210	1.397	3.771	1.000
7	55.205	0.211	0.537	3.640	1.000
8	166.667	0.196	1.483	3.511	1.000
9	52.165	0.184	0.544	3.646	1.000
10	218.480	0.23	0.52	3.793	1.000

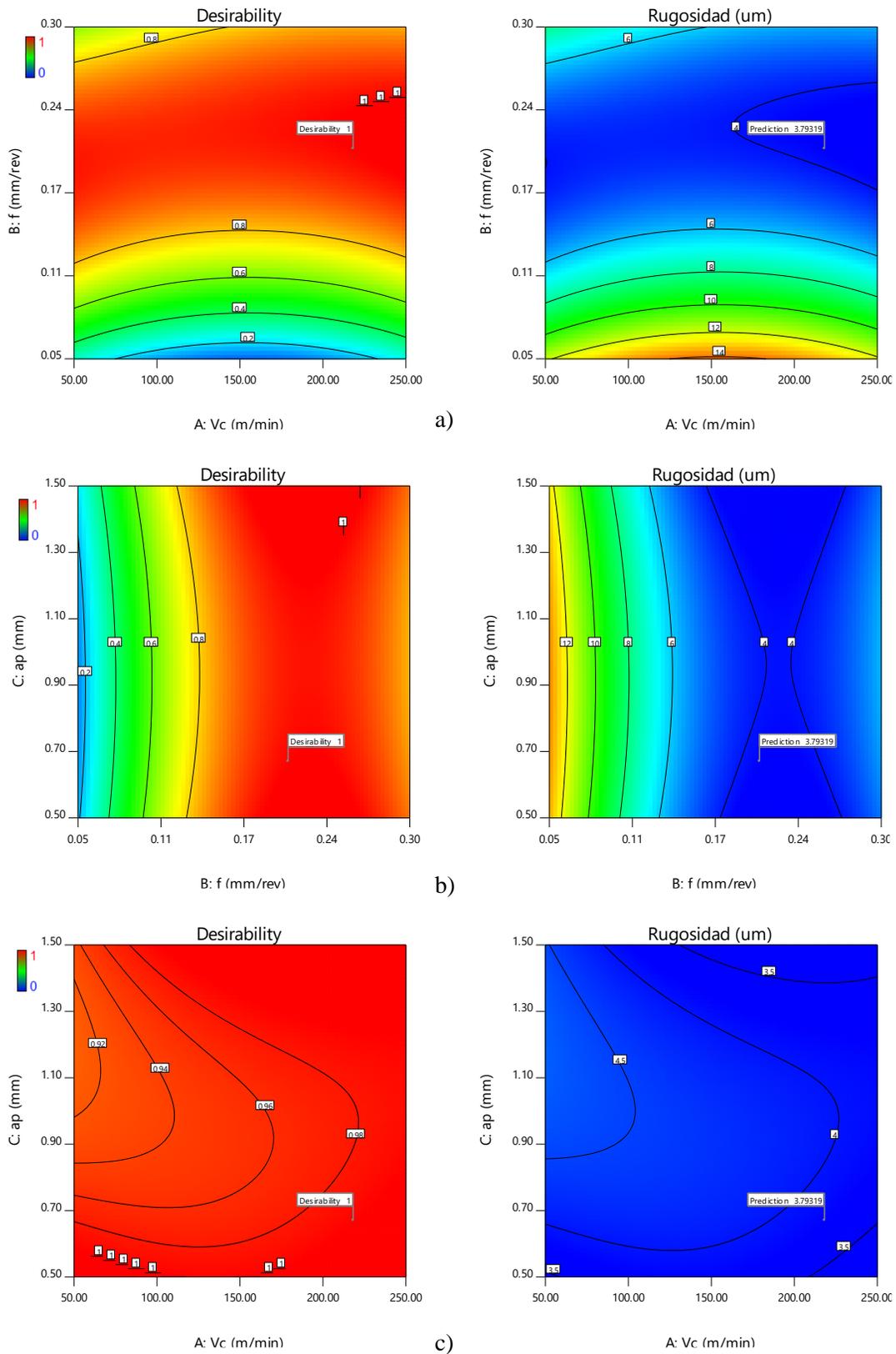


Figura 4.8 Gráficas de contorno para la deseabilidad y R_a para las diferentes interacciones a) $V_c \times f$, b) $a_p \times f$ y c) $V_c \times a_p$.

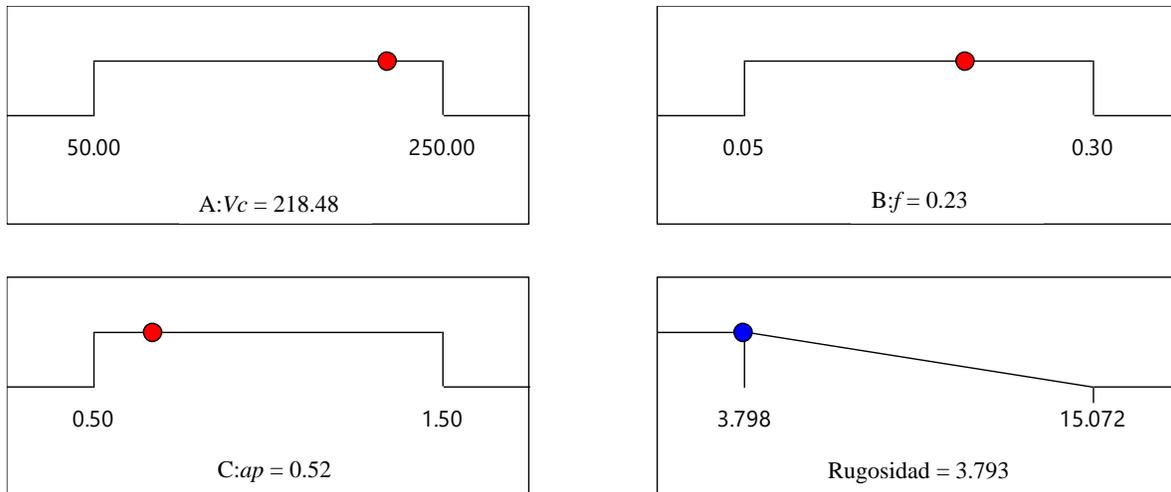


Figura 4.9 Gráfica de rampa para los valores óptimos de Ra .

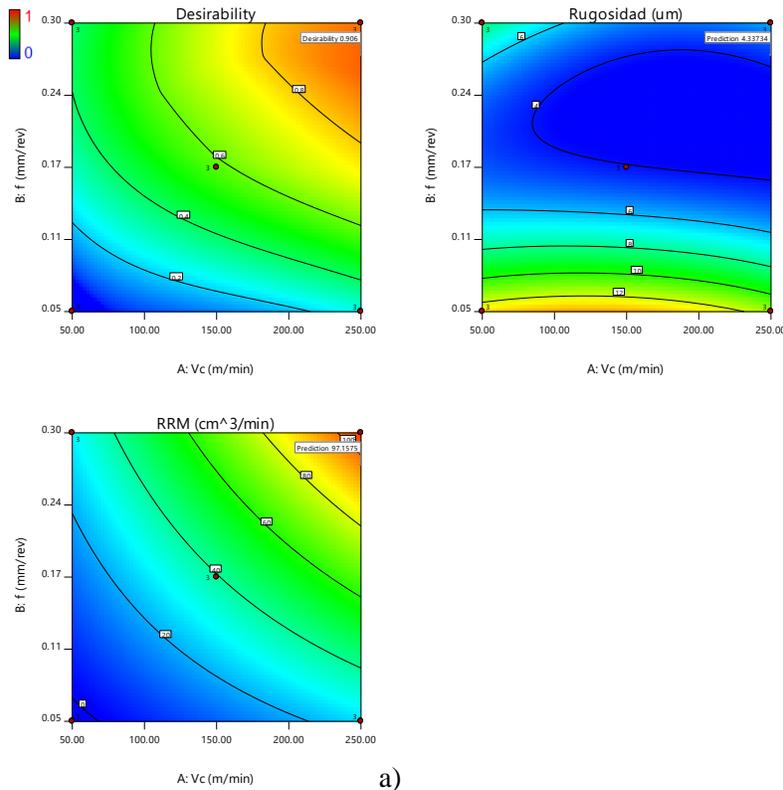
Los valores de optimización obtenidos se muestran en la Figura 4.9, se puede apreciar como el valor de respuesta se encuentra en su punto mínimo y, conforme a la Tabla 4.5, sus valores de deseabilidad son igual a 1 que nos asegura que el resultado es el mínimo. Los valores óptimos de torneado que minimizan la Ra para el polímero UHMWPE son los siguientes: $Vc = 218.48$ m/min, $ap = 0.52$ mm y $f = 0.23$ mm/rev obteniendo como resultado una $Ra = 3.793$ μm .

Para la optimización de la RRM no es necesario realizar este método por lo mismo de que todo se evalúa mediante la ecuación 2.5, el conjunto de valores que optimicen su respuesta son los puntos máximos de nuestro rango de operación ($Vc = 250$ m/min, $f = 0.3$ mm/rev y $ap = 1.5$) obteniendo como resultado una $RRM = 112.5$ cm^3/min .

Por otro lado, si es necesario aplicar este método para poder optimizar el caso combinado de las variables de respuesta, el objetivo de esta optimización es minimizar el valor de Ra y maximizar el valor de RRM , el resultado nos arroja más de 40 combinaciones posibles de los valores de Vc , ap y f dentro del rango de operación, los resultados más importantes se muestran en la Tabla 4.6. La Figura 4.10 muestra las gráficas de contornos de deseabilidad, Ra y RRM para el caso 10, donde se puede apreciar la ubicación de los resultados de las variables de respuesta dentro de nuestro rango de operaciones.

Tabla 4.6 Resultados para la optimización del caso combinado.

Numero	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	Ra (μm)	MRR (cm ³ /min)	Deseabilidad
1	250.00	0.2717	1.5	4.3259	97.0558	0.9060
2	250.00	0.2708	1.5	4.2949	96.7750	0.9060
3	250.00	0.2694	1.5	4.2454	96.3209	0.9059
4	250.00	0.2736	1.5	4.3961	97.6559	0.9059
5	250.00	0.2747	1.5	4.4381	98.0339	0.9059
6	250.00	0.2673	1.5	4.1725	95.6285	0.9056
7	250.00	0.2773	1.5	4.5401	98.8843	0.9055
8	250.00	0.2657	1.5	4.1197	95.1108	0.9053
9	249.43	0.2757	1.5	4.4661	98.1420	0.9052
10	250.00	0.2792	1.5	4.6143	99.4826	0.9050



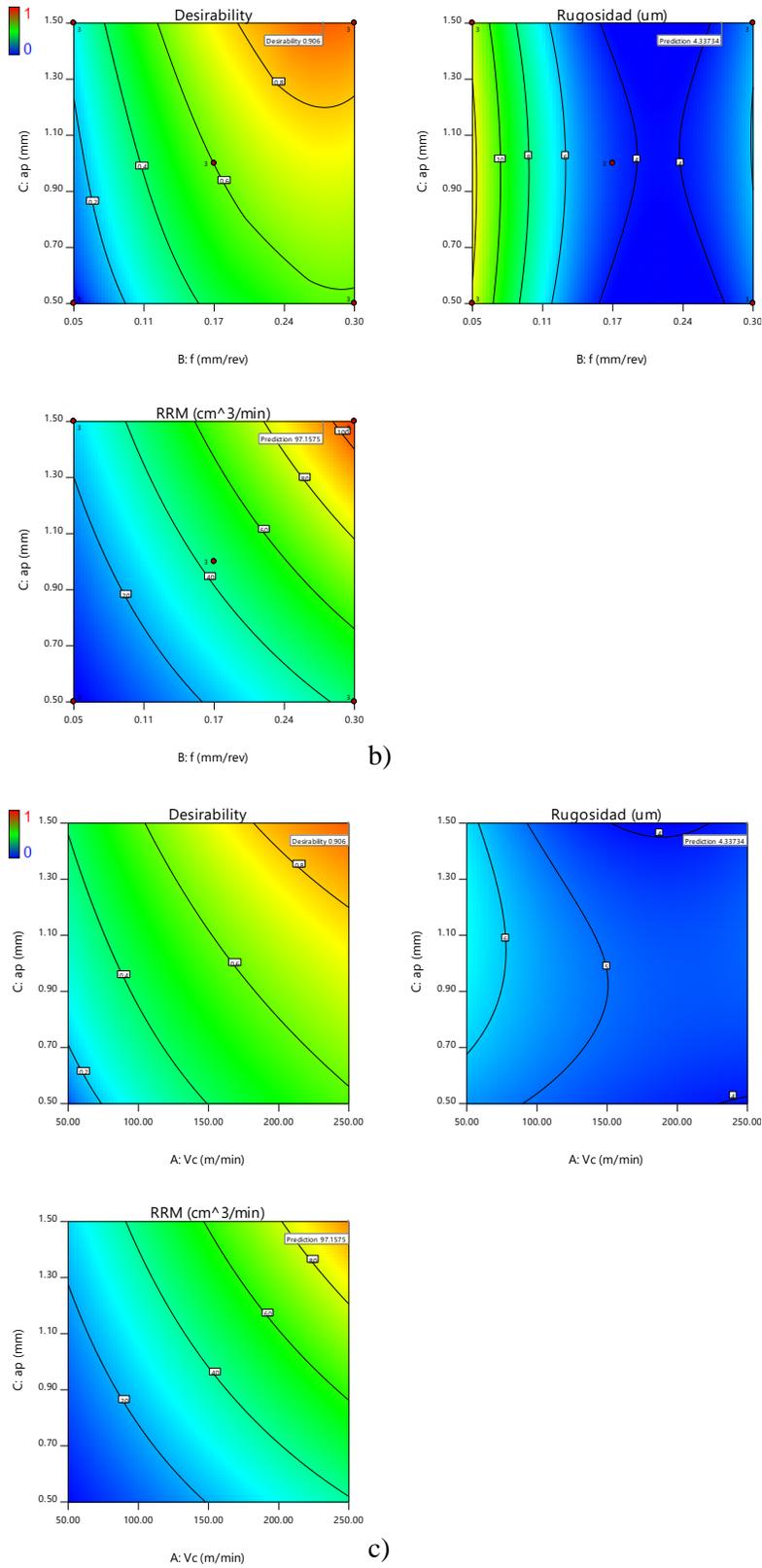


Figura 4.10 Gráficas de contorno para la deseabilidad, Ra y RRM para las diferentes interacciones a) $Vc \times f$, b) $ap \times f$ y c) $Vc \times ap$.

Los valores de optimización obtenidos se muestran en la Figura 4.11, y se puede apreciar como dichos valores de respuesta se aproximan bastante al caso mínimo para la Ra y al máximo para la RRM . La Figura 4.12 muestra la gráfica de barras de deseabilidad del caso combinado de optimización, mientras alguno de los parámetros se aproxime a 1 estaremos obteniendo su valor máximo (RRM) o mínimo (Ra). Los valores óptimos de torneado con máxima remoción de material y una rugosidad mínima para el polímero UHMWPE son los siguientes: $Vc = 250$ m/min, $ap = 1.5$ mm y $f = 0.27$ mm/rev obteniendo como resultado los valores optimizados de $Ra = 4.3373$ μm y $RRM = 97.1575$ cm^3/min .

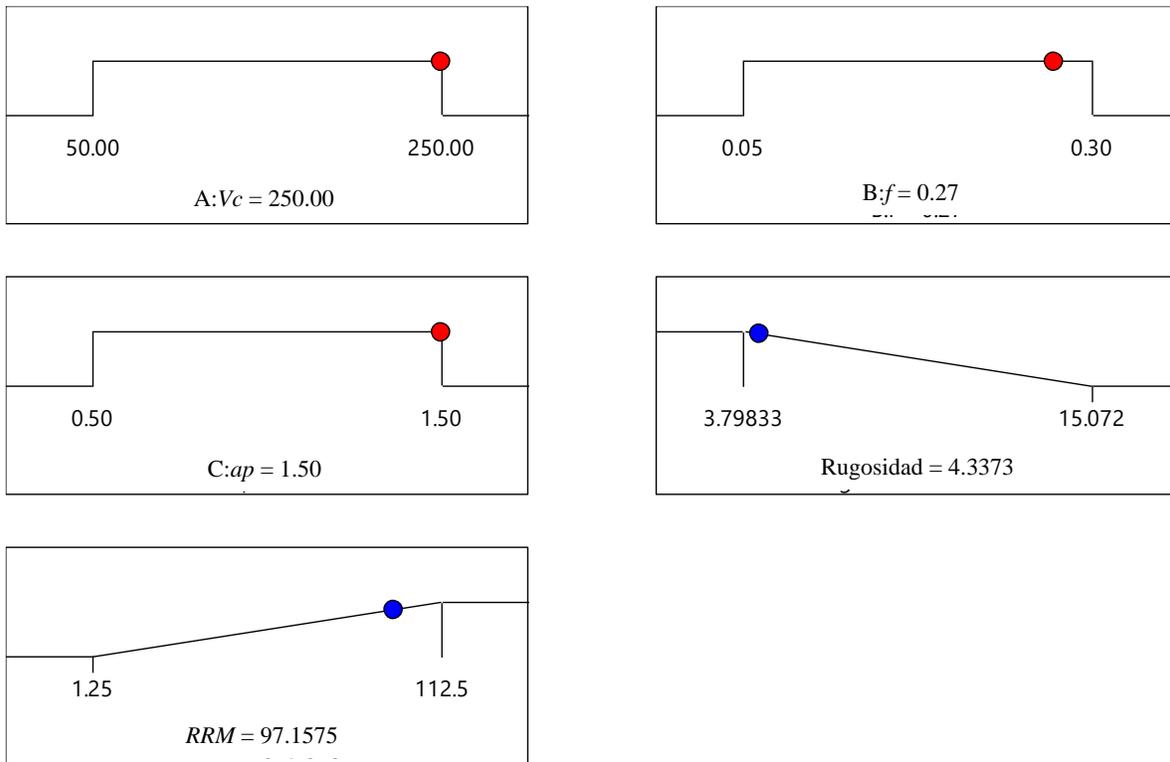


Figura 4.11 Gráfica de rampa para los valores óptimos de Ra y RRM .

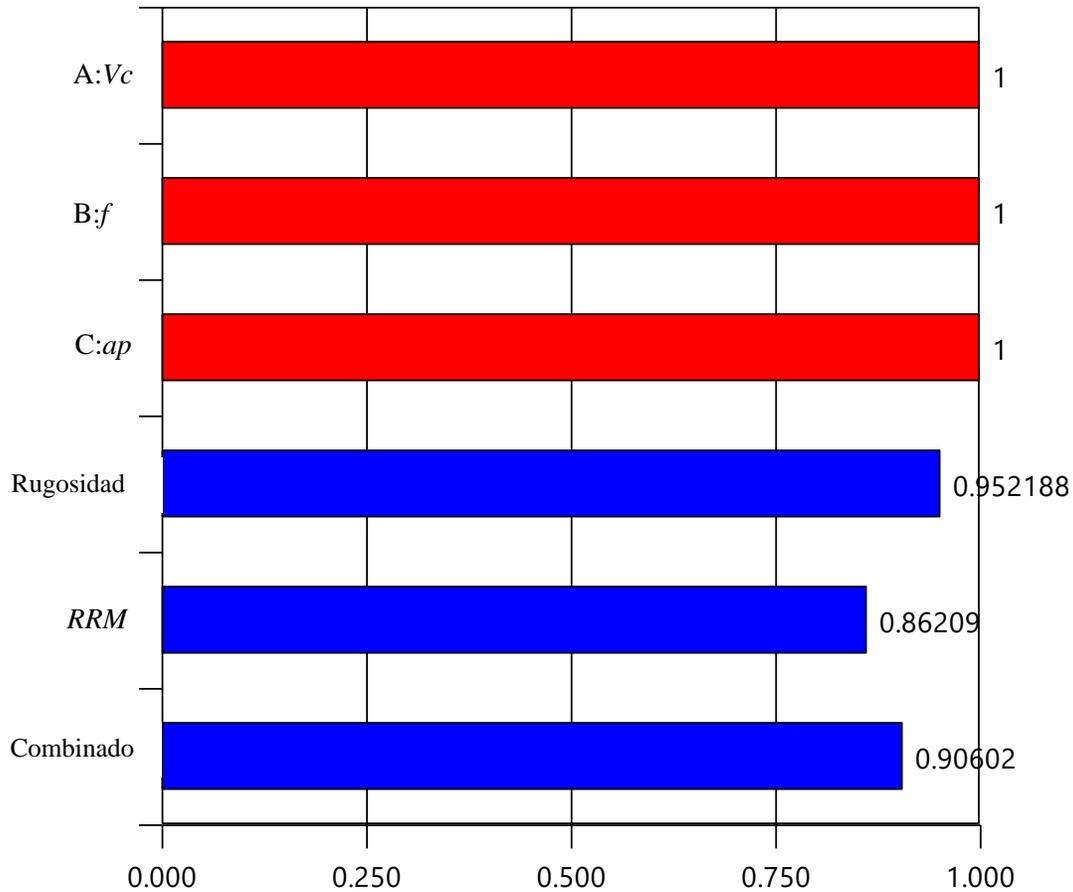


Figura 4.12 Gráfica de barras de la deseabilidad para el caso combinado.

4.2. Proceso de Bruñido con Bola

4.2.1. Análisis de Varianza (ANOVA)

Con los resultados experimentales que nos muestra la Tabla 3.9 se realiza un análisis de varianza en el software Design Expert 12, la Tabla 4.7 representa los resultados del ANOVA para la variable de respuesta de rugosidad superficial (Ra). Se puede observar que el avance (f) es el único parámetro independiente que es significativo para la variable de respuesta, su contribución es de 11.62%. Los parámetros de Vc y ap no son significativos, este comportamiento es similar al proceso de torneado. La interacción de $Vc \times F$ y $Vc \times f$ tienen una contribución de 11.90% y 10.48%, el caso más interesante es la interacción $F \times f$ que tiene una contribución del 22.67% convirtiéndola en el parámetro con más aportación al modelo. La interacción de los tres parámetros es de 5.58% y los productos $Vc^2 \times f$ y $Vc \times F^2$ tienen una contribución menor al 3%.

Tabla 4.7 ANOVA para la variable de respuesta *Ra*

<i>Fuente</i>	<i>SS</i>	<i>GDL</i>	<i>MC</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Valor de P</i>	<i>Contribución %</i>	<i>Observaciones</i>
Modelo	12.96	13	0.99	29.55	< 0.001		Significante
A-Vc	0.01	1	0.01	0.34	0.56	0.08	No Significante
B-F	0.01	1	0.01	0.37	0.54	0.09	No Significante
C-f	0.45	1	0.45	13.60	0.0008	3.25	Significante
AB	1.68	1	1.68	49.84	< 0.001	11.90	Significante
AC	1.48	1	1.48	43.90	< 0.001	10.48	Significante
BC	3.20	1	3.20	94.90	< 0.001	22.67	Significante
A ²	0.09	1	0.09	2.80	0.10	0.66	No Significante
B ²	1.64	1	1.64	48.48	< 0.001	11.62	Significante
C ²	0.03	1	0.03	1.08	0.30	0.25	No Significante
ABC	0.78	1	0.78	23.34	< 0.001	5.58	Significante
A ² B	0.03	1	0.03	0.95	0.33	0.22	No Significante
A ² C	0.26	1	0.26	7.88	0.0082	1.88	Significante
AB ²	0.40	1	0.40	11.98	0.0015	2.86	Significante
Residual	1.15	34	0.03			8.15	
Falta de Ajuste	0.07	1	0.07	2.31	0.13	0.53	No Significante
Error Puro	1.07	33	0.03			7.58	
Total	14.11	47					

La razón por la cual la interacción de $F \times f$ es el parámetro que más afecta al modelo se debe a que si la fuerza de bruñido incrementa incrementará también la deformación plástica ocasionando un aumento en la penetración del material, si esta interacción dura demasiado debido a un avance pequeño el calor generado incrementara aún más la deformación plástica del material (como se discutió previamente) al punto de ablandar la capa superficial lo suficiente para comenzar a degradarla ocasionando un incremento en la *Ra*. En el mejor de los casos solo se verá afectada la *Ra*, pero, en varias pruebas experimentales la degradación llevo a tal grado que comenzó a generar rebaba en un proceso que no conlleva remoción de material.

El valor del coeficiente de regresión (R^2) es de 0.9187 para la Ra , la ecuación 4.3 es la ecuación de regresión para la rugosidad superficial obtenida por un modelo de regresión cubico modificado.

$$4.1637 - 0.007577 x Vc - 0.003125 x F + 0.400420 x f + 5.1804 \times 10^{-7} x Vc x F + 0.027616 x Vc x f - 0.004276 x F x f + 0.000014 x Vc^2 + 6.3857 \times 10^{-7} x F^2 + 4.34063 x f^2 - 0.000041 x Vc x F x f - 1.171 \times 10^{-8} x Vc^2 x F - 0.000047 x Vc^2 x f + 4.7369 \times 10^{-8} x Vc x F^2 \quad (4.3)$$

4.2.2. Herramientas de Diagnostico

Usando una metodología similar al proceso de torneado verificaremos que se cumplan los supuestos del modelo para la Ra . Para ello, se verificarán su normalidad, varianza constante e independencia.

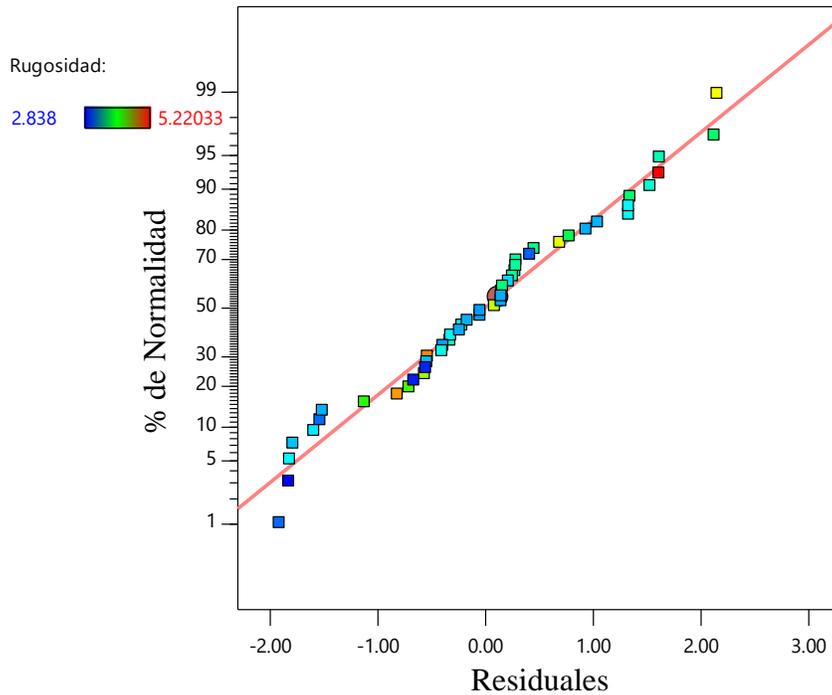


Figura 4.13 Gráfica de probabilidad normal para la Ra .

El diagnostico de normalidad nos indica si los residuos siguen una distribución normal, o sea, una línea recta. La Figura 4.13 muestra como los valores de los residuales si caen dentro de una línea recta, por ende, el supuesto de normalidad se cumple para la Ra dentro de nuestro rango de operaciones.

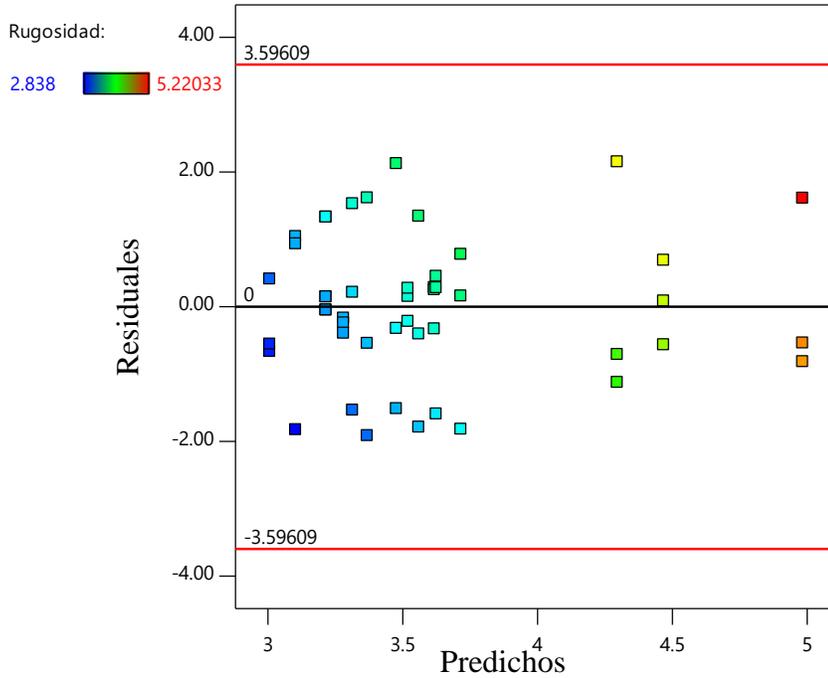


Figura 4.14 Gráfica de supuesto de varianza para la *Ra*.

La Figura 4.14 nos muestra la gráfica de predichos contra residuales para la *Ra*, se puede observar que no hay ningún tipo de patrón, por ende, la *Ra* cumple con el supuesto de varianza constante para nuestro rango de operaciones.

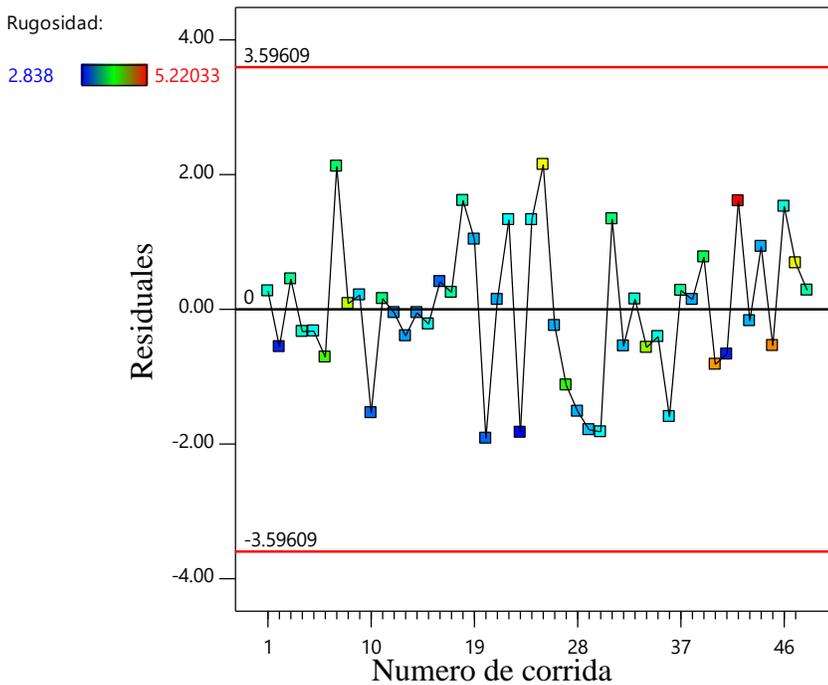


Figura 4.15 Gráfica de independencia para *Ra*.

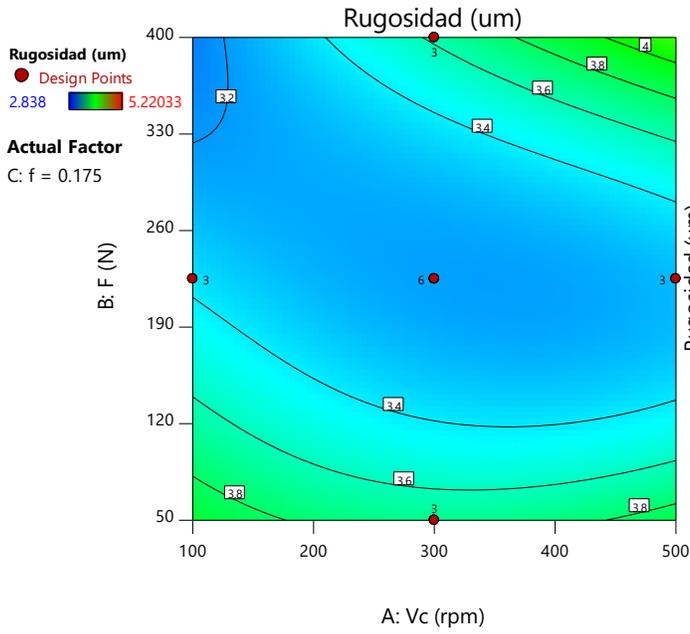
En la Figura 4.15 la gráfica del supuesto de independencia muestra que los puntos no siguen una tendencia entre ellos sino más bien saltos entre uno y otro, por ende, se puede decir que la Ra cumple con el supuesto de independencia para nuestro rango de operaciones. Los puntos 25-30 parecen formar una curva, pero, para poder descartar que no cumpla con este supuesto todos los puntos deben de tener ese comportamiento

4.2.3. Gráficas 3D y de Contornos

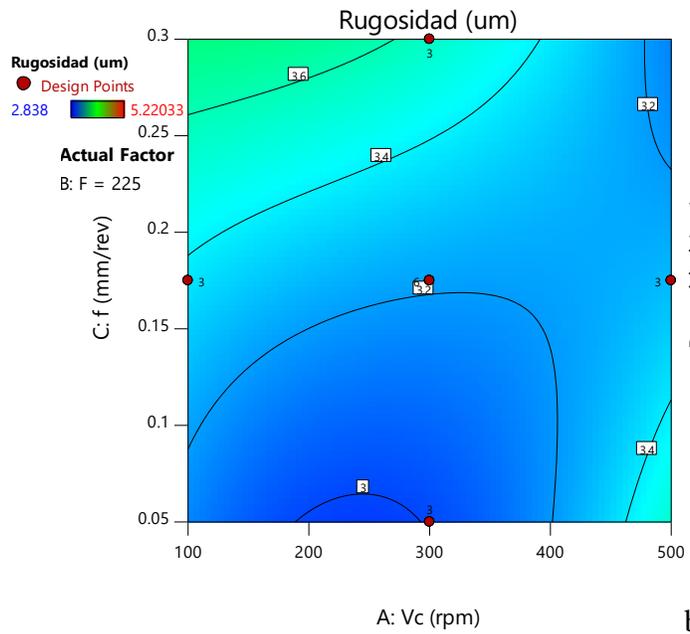
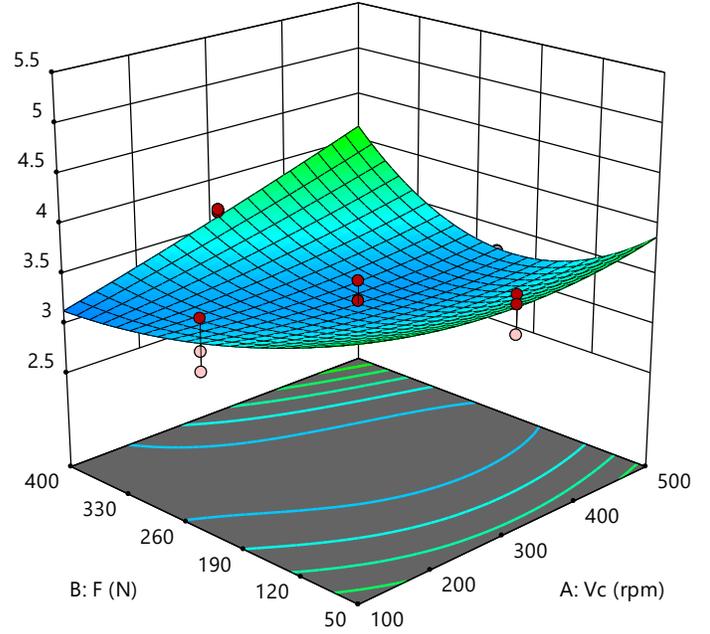
La Figura 4.16a muestra la gráfica de contornos de la interacción entre la Vc y la F , en ella se puede apreciar que la combinación de los valores más altos de estos parámetros conlleva a un incremento en la $Ra = 4.12 \mu\text{m}$, también se observa que la Vc en el rango de operaciones no muestra un cambio significativo en la variable de respuesta mientras que la F muestra una variación de 3.14 a $3.87 \mu\text{m}$ para el valor máximo y mínimo respectivamente, de nuestro rango de operaciones.

En la gráfica de 3D de la Figura 4.16b, se puede apreciar que la combinación de los valores mínimos de Vc y f nos arrojan una $Ra = 3.14 \mu\text{m}$, también se logra apreciar que conforme incrementamos el valor de f la Ra incrementa también. La gráfica también muestra que la combinación de un avance pequeño con un punto medio de Vc conlleva a un valor mínimo de $Ra = 2.99 \mu\text{m}$.

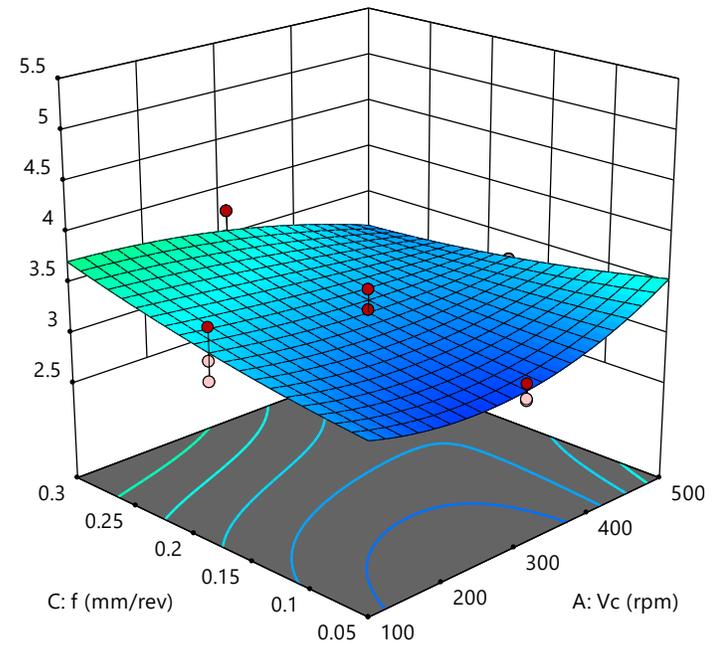
La Figura 4.16c nos muestra la interacción de los parámetros de F y f que resultaron ser los más significativos mediante el ANOVA, en ella podemos observar que se presenta un valor alto y un valor mínimo de $Ra = 4.42$ y $Ra = 2.95 \mu\text{m}$ respectivamente. Se puede apreciar una variación más significativa en comparación con las Figuras 4.16a y 4.16b, por ejemplo, la Ra varía desde 3.14 a 4.42 conforme incrementa f y se mantiene $F = 50 \text{ N}$ y la combinación de $f = 0.05 \text{ mm/rev}$ y una F aproximadamente de 160 N conlleva a el valor más bajo de Ra mencionado previamente.



a)



b)



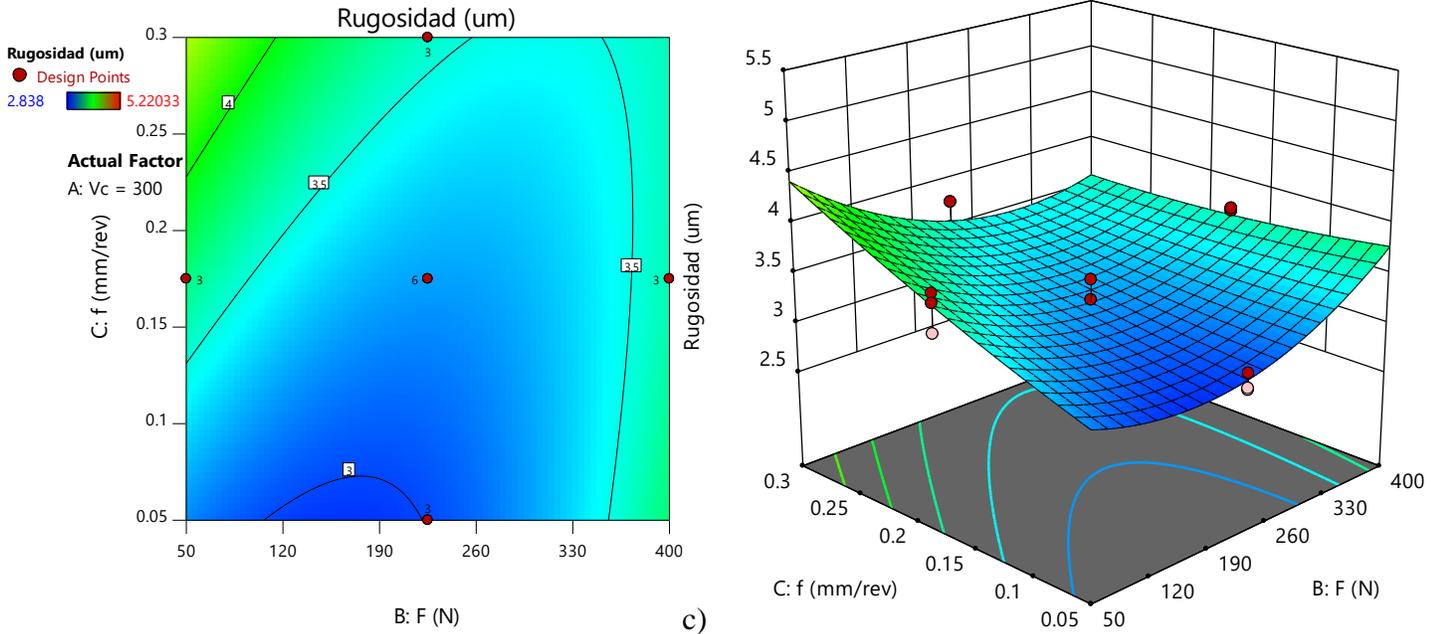


Figura 4.16 Gráficas de superficie de respuesta para la Ra , de contorno (derecha), 3D (izquierda).

4.2.4. Dureza

Los resultados experimentales de la dureza muestran un aumento del 50% después del proceso de bruñido (Figura 4.17). Esto se debe a una mayor compresión de las imperfecciones a una presión más alta que conduce a un aumento en la deformación plástica de la superficie. Hubo varios parámetros que conllevaron a incremento en comparación con la pieza virgen (Tabla 4.8) pero aquellos que conllevaron al resultado máximo de dureza son: $Vc = 500$ rpm, $F = 50$ N y $f = 0.3$ mm/rev.

Tabla 4.8 Parámetros que conllevaron a un aumento en la dureza

	Vc (rpm)	F (N)	f (mm/rev)
<i>Caso 1</i>	500	400	0.3
<i>Caso 2</i>	100	400	0.05
<i>Caso 3</i>	300	225	0.175
<i>Caso 4</i>	500	400	0.05
<i>Caso 5</i>	100	50	0.3
<i>Caso 6</i>	500	50	0.05
<i>Caso 7</i>	300	225	0.3
<i>Caso 8</i>	500	50	0.3

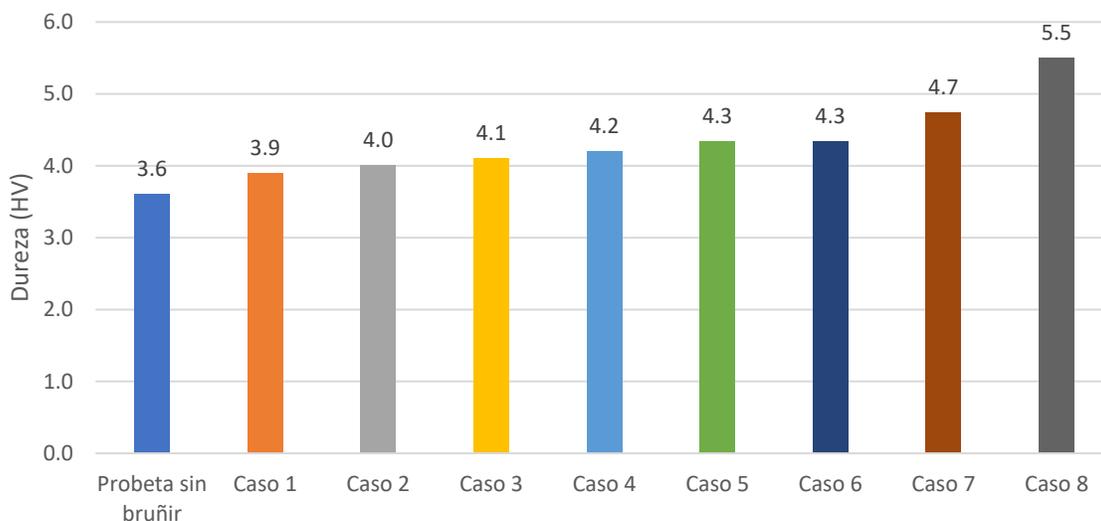


Figura 4.17 Casos en los cuales condujeron a un incremento en la dureza.

4.2.5. Optimización de la Ra y Dureza

Con la finalidad de lograr el objetivo de este trabajo es necesario realizar una optimización de la Ra, dureza y la combinación de ambos. El rango de los factores definidos para la optimización se encuentra en la Tabla 4.9.

Comenzaremos con el primer caso que compete a la optimización de Ra, el resultado nos arroja 30 combinaciones posibles de los valores de Vc, ap y f dentro del rango de operaciones, los resultados más importantes se muestran en la Tabla 4.10. La Figura 4.18 muestra las gráficas de contornos de deseabilidad (izquierda de la figura) para el caso 4, y en el lado derecho se puede apreciar donde se ubica el resultado de la Ra dentro de nuestro rango de operaciones.

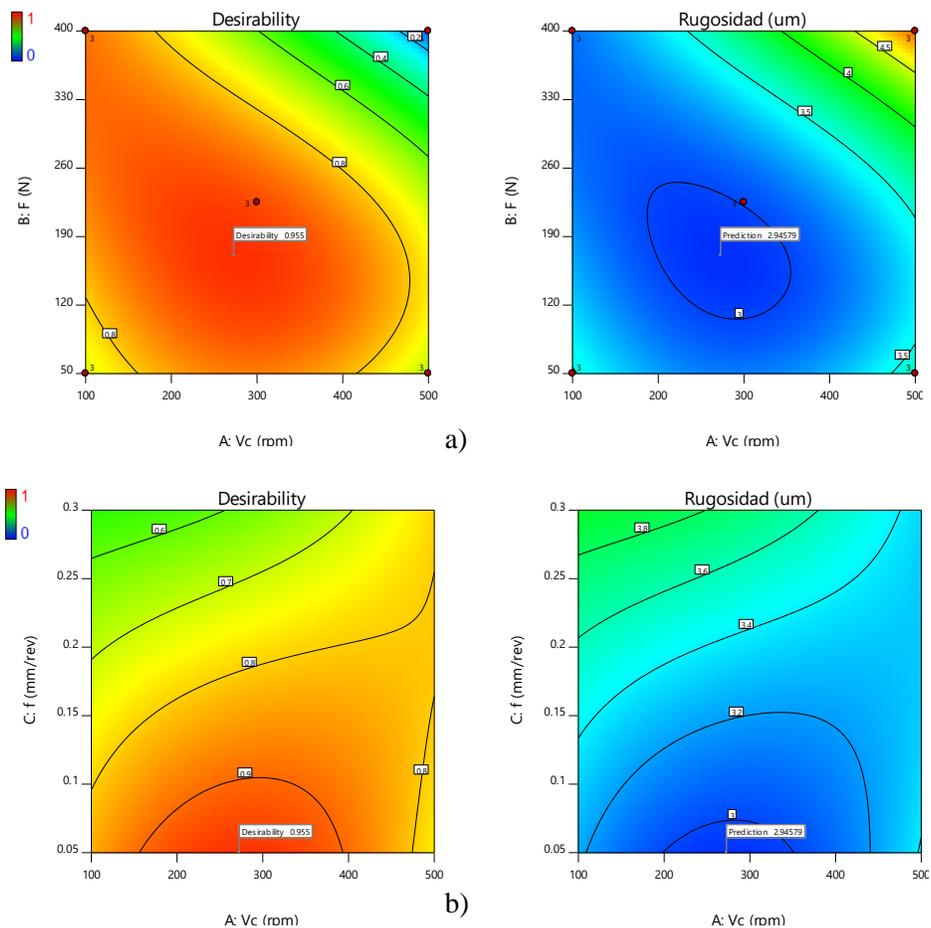
Tabla 4.9 Rangos de optimización para la Ra, dureza y su combinación

Nombre	Objetivo	Límite inferior	Límite superior	Peso inferior	Peso superior	Importancia		
						Calidad	Dureza	Combinación
Vc (rpm)	En rango	100	500	1	1	3	3	3
f (mm/rev)	En rango	0.05	0.3	1	1	3	3	3
F (N)	En rango	50	400	1	1	3	3	3
Ra (µm)	Minimizar	2.838	5.220	1	1	5	No	5
Dureza (HV)	Maximizar	2.466	4.733	1	1	No	5	5

Tabla 4.10 Resultados para la optimización de Ra

Número	V_c (rpm)	F (N)	F (mm/rev)	Rugosidad	Deseabilidad
1	274.673	170.303	0.050	2.946	0.955
2	274.919	170.021	0.050	2.946	0.955
3	276.425	169.563	0.050	2.946	0.955
4	272.674	170.539	0.050	2.946	0.955
5	271.627	168.558	0.050	2.946	0.955
6	269.516	169.956	0.050	2.946	0.955
7	270.215	174.487	0.050	2.946	0.955
8	266.952	174.451	0.050	2.946	0.955

Los valores de optimización obtenidos se muestran en la Figura 4.19, se puede apreciar como el valor de respuesta se acerca al mínimo, conforme a la Tabla 4.10. Los valores óptimos de bruído que minimizan la Ra para el polímero UHMWPE son los siguientes: $V_c = 272.6$ rpm, $F = 170.539$ N y $f = 0.05$ mm/rev obteniendo como resultado una $Ra = 2.946$ μm (Figura 4.19).



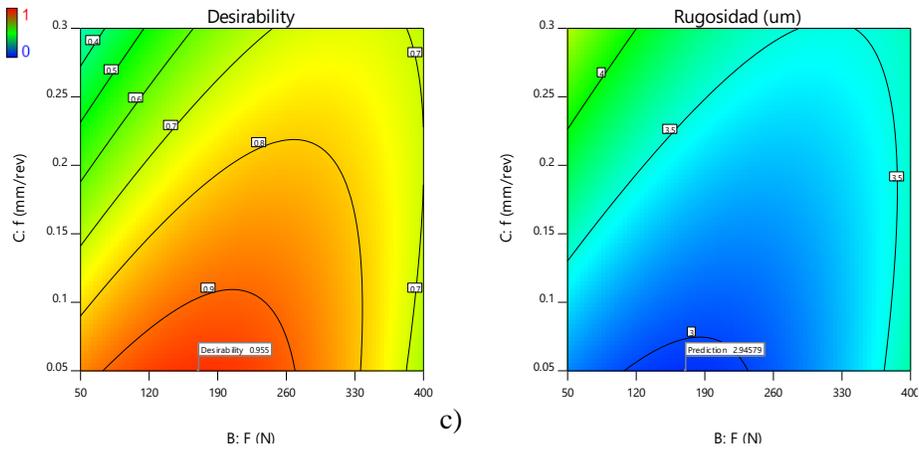


Figura 4.18 Gráficas de contorno para la deseabilidad y Ra para las diferentes interacciones a) V_c x F , b) V_c x f y c) F x f

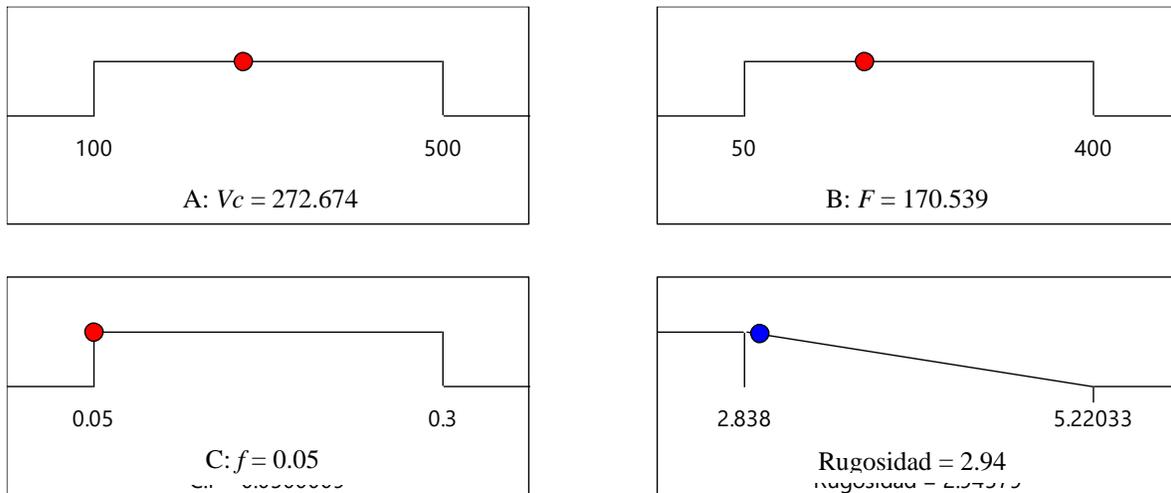


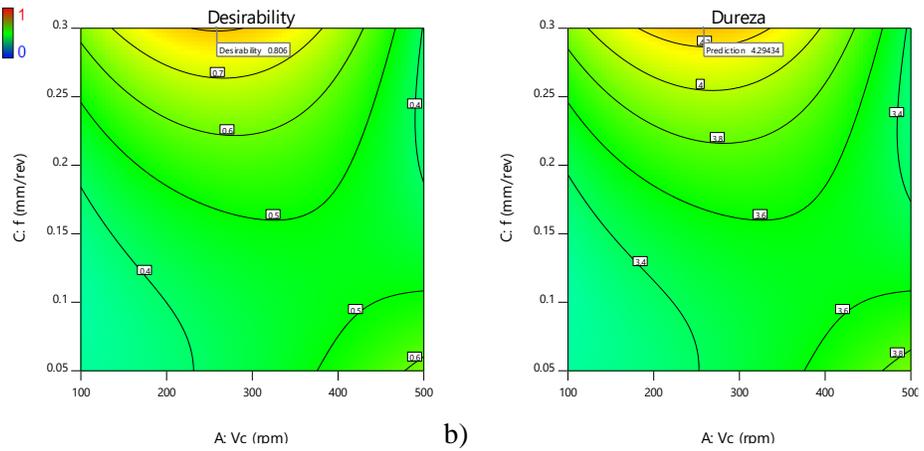
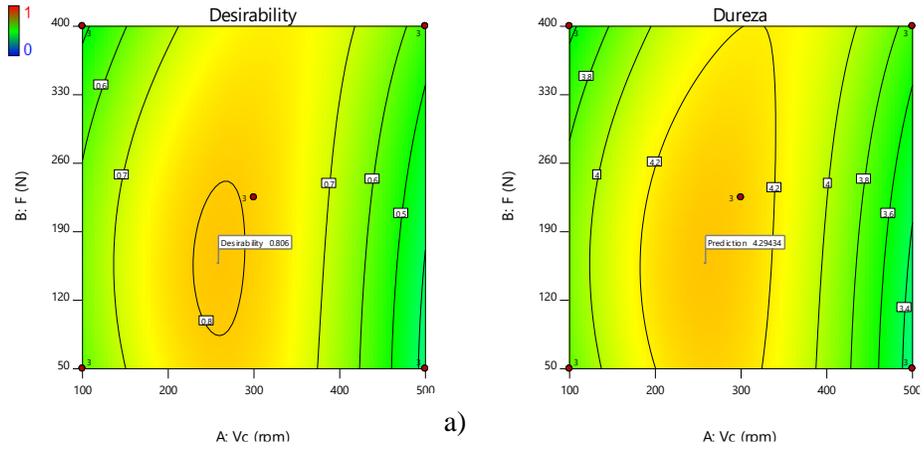
Figura 4.19 Gráfica de rampa para la optimización de la Ra.

Ahora realizaremos el mismo procedimiento, pero, el objetivo ahora será maximizar la dureza, la Tabla 4.11 muestra los resultados más importantes obtenidos de la optimización. La Figura 4.20 muestra la gráfica de contorno de deseabilidad y ubicación del valor de dureza para nuestro rango de operaciones. Los valores óptimos que conllevan al valor máximo de dureza son: $V_c = 258.615$ rpm, $F = 157.447$ N y $f = 0.3$ mm/rev (Figura 4.21).

Tabla 4.11 Resultados para la optimización de dureza

Número	V_c (rpm)	F (N)	F (mm/rev)	Rugosidad	Deseabilidad
1	259.187	161.644	0.300	4.294	0.806
2	258.709	160.272	0.300	4.294	0.806
3	258.972	163.390	0.300	4.294	0.806

4	259.871	158.828	0.300	4.294	0.806
5	258.847	165.449	0.300	4.294	0.806
6	258.615	157.447	0.300	4.294	0.806
7	261.468	167.676	0.300	4.294	0.806
8	259.109	151.241	0.300	4.294	0.806



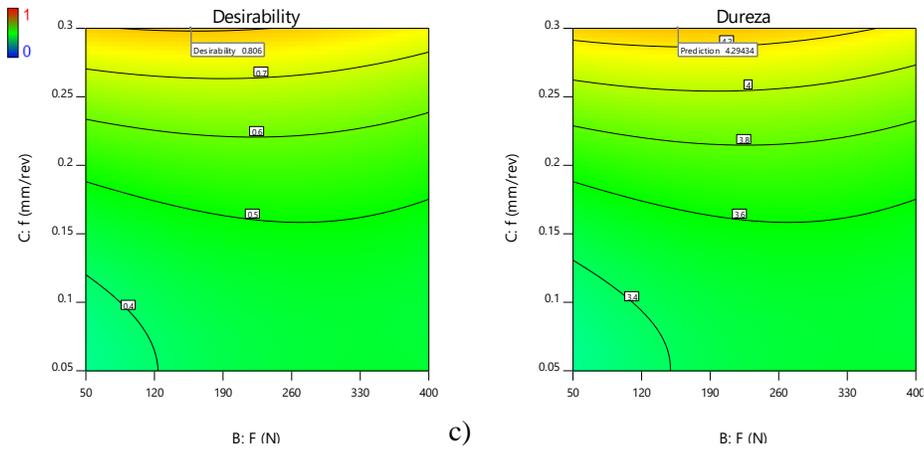


Figura 4.20 Gráficas de contorno para la deseabilidad y dureza para las diferentes interacciones a) $V_c \times F$, b) $V_c \times f$ y c) $F \times f$.

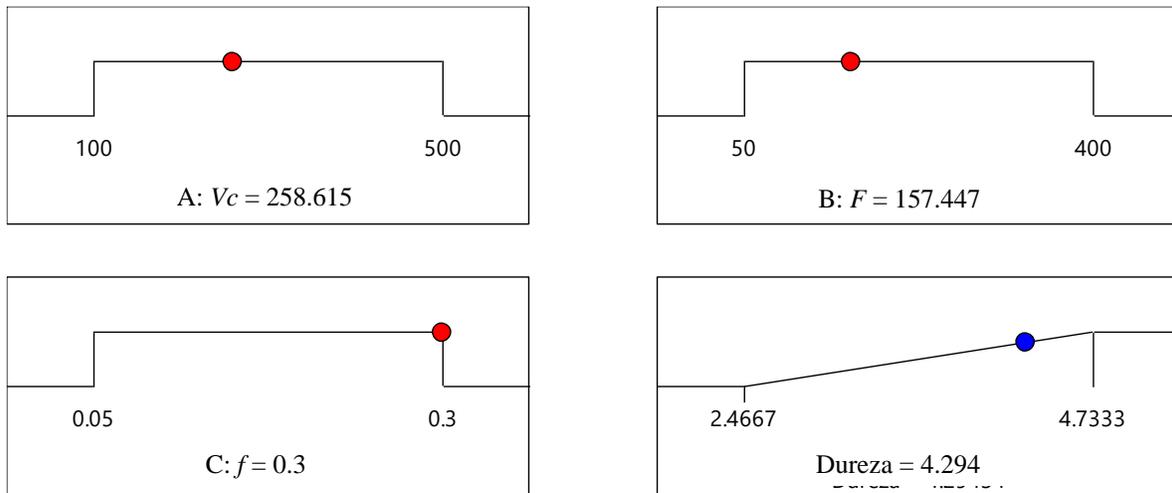
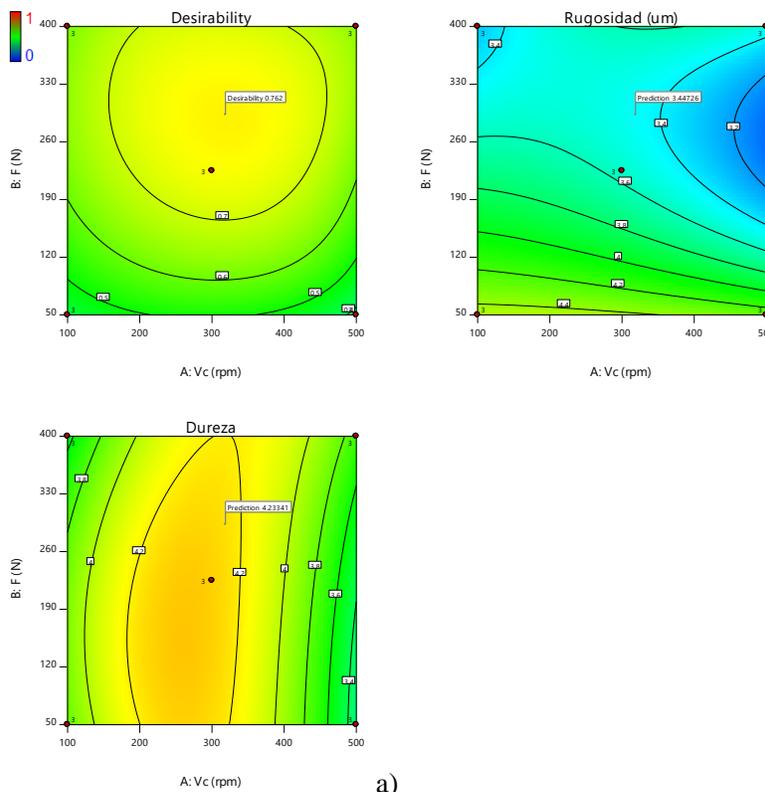


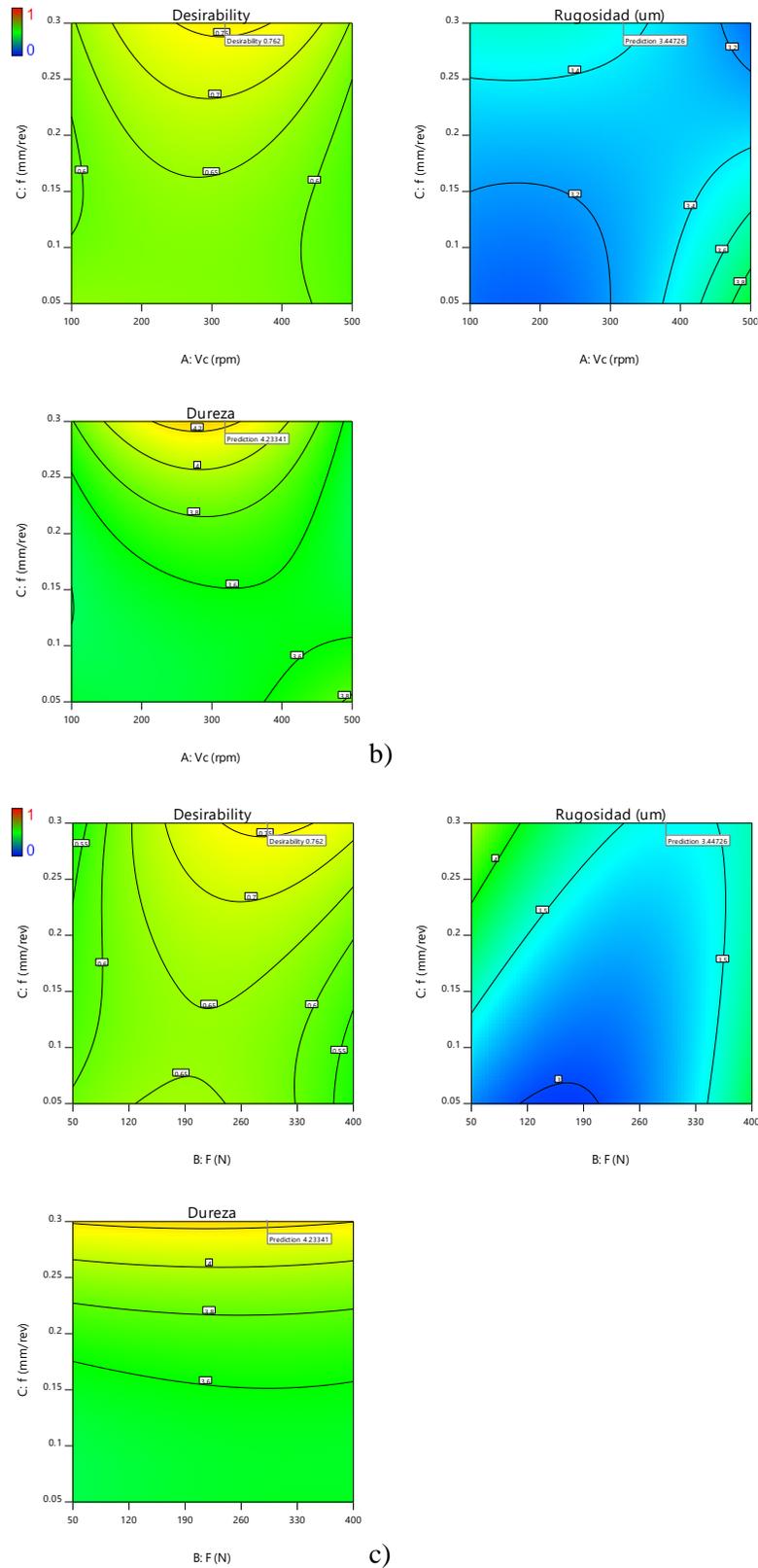
Figura 4.21 Gráfica de rampa para la optimización de la Dureza.

Por último, realizaremos la optimización del caso combinado donde se busca obtener el valor mínimo de Ra con el valor máximo de dureza, el resultado nos arroja 29 combinaciones posibles de los valores de V_c , ap y f dentro del rango de operación, los resultados más importantes se muestran en la Tabla 4.12. La Figura 4.22 muestra las gráficas de contornos de deseabilidad, Ra y dureza para el caso 1, donde se puede apreciar la ubicación de los resultados de las variables de respuesta dentro de nuestro rango de operaciones.

Tabla 4.12 Resultados para la optimización del caso combinado

Número	Vc (rpm)	F (N)	F (mm/rev)	Rugosidad	Deseabilidad
1	318.729	292.852	0.300	3.447	4.233
2	320.709	292.928	0.300	3.445	4.231
3	316.579	294.022	0.300	3.450	4.236
4	316.073	292.656	0.300	3.451	4.237
5	317.625	295.282	0.300	3.448	4.234
6	318.138	290.114	0.300	3.449	4.235
7	316.419	295.577	0.300	3.450	4.236
8	323.772	290.912	0.300	3.441	4.227





b)

c)

Figura 4.22 Gráficas de contorno para la deseabilidad, R_a y dureza para las diferentes interacciones a) $V_c \times F$, b) $V_c \times f$ y c) $F \times f$.

Los valores de optimización obtenidos se muestran en la Figura 4.23, y se puede observar cómo los valores de respuesta se aproximan bastante al caso mínimo para la Ra y al máximo para la dureza. La Figura 4.24 muestra la gráfica de barras de deseabilidad del caso combinado de optimización, mientras alguno de los parámetros se aproxime a 1 estaremos obteniendo su valor máximo (dureza) o mínimo (Ra). Los valores óptimos de bruñido con máxima dureza y una rugosidad mínima para el polímero UHMWPE son los siguientes: $V_c = 318.729$ rpm, $F = 292.852$ N y $f = 0.3$ mm/rev obteniendo como resultado los valores optimizados de $Ra = 3.4472$ μm y dureza = 4.2334 HV.

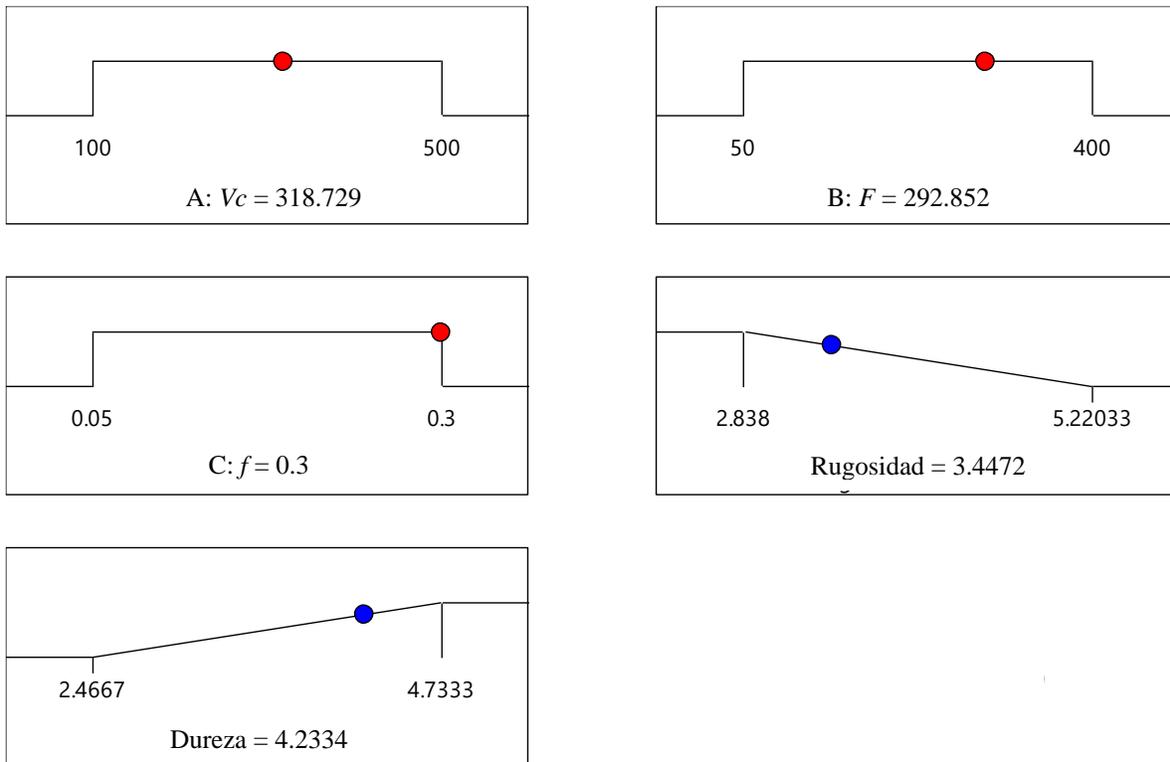


Figura 4.23 Gráfica de rampa para la optimización del caso combinado.

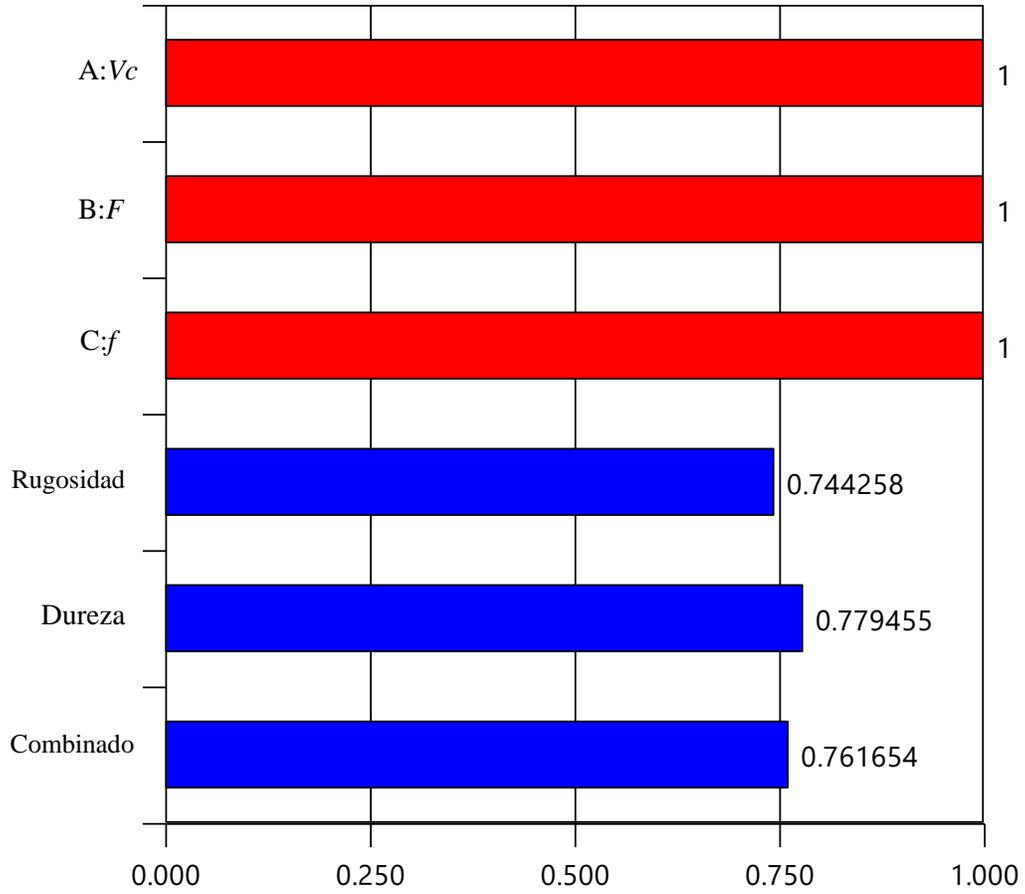


Figura 4.24 Gráfica de barras para la optimización del caso combinado.



Capítulo 5

Conclusiones

La realización de este trabajo cumplió con los objetivos generales y específicos. Se logró obtener modelos de predicción de la calidad superficial en función de los parámetros de torneado y bruñido, mediante los resultados obtenidos por métodos estadísticos se obtuvieron los parámetros óptimos de torneado y bruñido que mejoran la calidad superficial del polímero UHMWPE. Con toda la información obtenida a lo largo de este trabajo se logró estudiar los efectos de los diferentes parámetros de torneado y bruñido sobre la calidad superficial. La discusión de resultados ha generado diferentes conclusiones las cuáles serán muy útiles en trabajos futuros.

- Los resultados mostrados por el ANOVA, tanto del proceso de torneado como el de bruñido, prueban que el factor que más influye para la Ra es el f , mientras que Vc y ap no afectan de manera significativa nuestro modelo.
- El ANOVA del proceso de bruñido muestra que las interacciones de los parámetros de Vc , F y f son más significativos que por sí solos, lo que nos indica que una obtención de parámetros óptimos si influye mucho de la combinación correcta de valores.
- Los resultados del ANOVA para la RRM nos ayudan a comprender qué tipo de contribución tiene cada uno de los parámetros de trabajo, demostrando que no todos afectan de igual manera a la variable de respuesta.
- Los modelos de predicción encontrados presentan coeficientes de regresión de 96.83% para la Ra en el proceso de torneado y de 91.87% para el proceso de bruñido. Lo anterior, muestra que los modelos permiten predecir la Ra en función de las variables de corte por torneado y bruñido de manera confiable.
- Se llevo a cabo la validación de los modelos de predicción para el proceso de torneado utilizando pruebas experimentales adicionales con un error máximo aceptable del 9.0 %. Estos modelos pueden ser utilizados para la manufactura de piezas cilíndricas en los diversos sectores industriales con una rugosidad superficial y tasa de remoción deseada dentro del rango experimental de estudio.

- Los parámetros óptimos de torneado que permiten el mínimo de la rugosidad superficial son: $V_c = 218.48$ m/min, $ap = 0.52$ mm y $f = 0.23$ mm/rev. Para la máxima razón de remoción de material (RRM), los parámetros óptimos de corte son: $V_c = 250$ m/min, $ap = 1.5$ mm y $f = 0.3$ mm/rev. Por último, para el caso en el que se desea la mínima Ra con la máxima RRM los parámetros óptimos de corte son: $V_c = 250$ m/min, $ap = 1.5$ mm y $f = 0.27$ mm/rev.
- Los parámetros óptimos de bruñido que permiten el mínimo de la rugosidad superficial son: $V_c = 272.674$ rpm, $F = 170.539$ N y $f = 0.05$ mm/rev. Para la máxima dureza, los parámetros óptimos de corte son: $V_c = 258.615$ rpm, $F = 157.447$ N y $f = 0.3$ mm/rev. Por último, para el caso en el que se desea la mínima Ra con la máxima dureza los parámetros óptimos de corte son: $V_c = 318.729$ rpm, $F = 292.852$ N y $f = 0.3$ mm/rev.
- El estudio experimental permitió observar que, para el proceso de torneado, valores de avance pequeños (0.05 mm/rev), el material sufre degradación por calentamiento afectando la Ra . Además, para este avance, se observó un incremento en la temperatura del material de trabajo.
- Las pruebas experimentales del proceso de bruñido permitieron analizar que para valores de avance pequeños (0.05 mm·rev⁻¹) en combinación con fuerzas de bruñido altas (400 N), el material sufre degradación por incremento en la deformación plástica que conlleva a un calentamiento en la pieza, debido a la pequeña área de contacto entre el bruñidor y la pieza de trabajo, afectando la Ra .
- Se observó que la dureza mejoró un 50% su valor con el proceso de bruñido, mostrando la ventaja de este tipo de proceso.
- La Ra mejoró un 29% después del proceso de bruñido con bola, lo que nos ayuda a concluir que el proceso de bruñido con bola si mejora la calidad superficial del polímero UHMWPE.



Capítulo 5

Trabajos Futuros

El desarrollo de este trabajo comprendió la obtención de parámetros óptimos del proceso de torneado y bruñido para mejorar la calidad superficial de piezas cilíndricas del polímero UHMWPE, así como la comprensión del efecto de dichos parámetros sobre la calidad superficial. Pero al haber sido realizadas sobre superficies cilíndricas es necesario realizar, como futuro trabajo, la implementación de estos parámetros en superficies complejas e inclusive realizar un nuevo estudio de afectación.

Durante el desarrollo del trabajo se observó que al realizar las pruebas experimentales a diferentes épocas del año (invierno y primavera) hubo un cambio sustancial en la obtención de la *Ra* deseada, por ende, se puede decir que la temperatura ambiente también es un factor que puede afectar a las variables de respuesta, lo que nos indica que, como trabajo futuro, se puede realizar un análisis similar pero incluyendo el parámetro de temperatura ambiente para integrarlo a los valores óptimos o descartarlo.



Referencias

Referencias

- A. Chabbi, M. Y. (2017). Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods. *The international Journal of Advance Manufacturing Technology*, 2267-2290.
- Ansari, M., Sharma, D., & Nikam, S. (2014). Study of cutting forces and surface roughness in turning. *Int J Adv Mech Eng*, 4(2), 151-160.
- Beltran, M. I. (2011). Tema 2. Tipos de plásticos, aditivación y mezclado. En *Tecnología de los Polímeros*.
- Billmeyer, F. W. (1975). *Ciencia de los polímeros*. Reverté.
- Bougharriou, A., Sai, K., & Bouzid, W. (2010). Finite element modelling of burnishing process. *Material Technology*, 25(1), 56-62.
- Childs, T. H., Maekawa, K., Obikawa, T., & Yamane, Y. (2000). *Metal machining: theory and applications*. Butterworth-Heinemann.
- El-Tayeb, N. S., Low, K. O., & Brevern, P. V. (2008). The influence of roller burnishing process on hardness and roughness of cylindrical polymer surfaces. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part j: journal of engineering tribology*, 222(7), 947-955.
- El-Tayeb, N., Low, K., & Brevern, P. (2007). Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of aluminium 6061. *Journal of materials processing technology*, 186(1-3), 272-278.
- El-Tayeb, N., Low, K., & Brevern, P. (2008). The influence of roller burnishing process on hardness and roughness of cylindrical polymer surfaces. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part j: journal of engineering tribology*, 222(7), 947-955.
- Fetecau, C., & Stan, F. (2012). Study of cutting force and surface roughness in the turning of polytetrafluoroethylene composites with a polycrystalline diamond tool. *Measurement*, 45, 1367-1379.

Referencias

- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. McGraw-Hill.
- Hamadache, H., Laouar, L., Zeghib, N., & Chaoui, K. (2006). Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1-3), 130-136.
- Hassan, A. M., & Al-Dhifi, S. Z. (1999). Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 96(1-3), 73-80.
- Hassan, A., & Maqableh, A. (2000). The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components. *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1-3), 115-121.
- Holden, G. (1987). *Thermoplastic elastomers*. Boston, MA: Springer.
- Janczewski, L., Tobała, D., Brostow, W., Czechowski, K., Lobland, H., Kot, M., & Zagorski, K. (2016). Effects of ball burnishing on surface properties of low density polyethylene. *Tribology International*, 93, 36-42.
- Kaddeche, M., Chaoui, K., & Yallese, M. (2012). Cutting parameters effects on the machining of two high density polyethylene pipes resins. *Mechanics & Industry*, 13, 307-316.
- Keresztes, R., Kalácska, G., Zsidai, L., & Dobrocsi, Z. (2011). Machinability of engineering polymers. *Sustainable Construction and Design*, 2(1), 106.
- Klocke, F., Bäcker, V., Wegner, H., & Zimmermann, M. (2011). FE-analysis of the roller burnishing process for fatigue resistance increase of engine components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(1), 2-11.
- Kurtz, S. M. (2004). *The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement*. Elsevier.

Referencias

- Lazarević, D., Madić, M., Janković, P., & Lazarević, A. (2011). Surface roughness minimization of polyamide PA-6 turning by Taguchi method. *Journal of Production Engineering*, 15(1), 36-39.
- López Carrasquero, F. (2004). *Fundamentos de polímeros*. Mérida: Escuela Venezolana para la enseñanza de la Química.
- Low, K., & Wong, K. (2011). Influence of ball burnishing on surface quality and tribological characteristics of polymers under dry sliding conditions. *Tribology International*, 44(2), 144-153.
- Low, K., & Wong, K. (2011). Tribological effects of polymer surface modification through plastic deformation. *Bulletin of Materials Science*, 34(7), 1549-1555.
- McColm, I. J. (2013). *Ceramic Hardness*. Springer Science & Business Media.
- Salahshoor, M., & Guo, Y. (2011). Surface integrity of biodegradable Magnesium–Calcium orthopedic implant by burnishing. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 4(8), 1888-1904.
- Saldaña Robles, A., Flores Ortega, A., Saldaña Robles, A., Saldaña Robles, N., & Gutierrez Vaca, C. (2007). Bruñido con bola como proceso de acabado superficial y mejoramiento de propiedades físico-mecánicas de piezas manufacturadas. *Temas de ciencia y tecnología*, 41-49.
- Saldaña, R., Aguilera, G., Plascencia, M., Ledesma, O., & Alcántar, C. (2014). Análisis teórico-numérico de esfuerzos generados para bruñido de bola sobre cilindros rotativos. *XX Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Juriquilla, Querétaro, México, (Vol. 24)*.
- Saldaña, R., Diosdado, D., Balvantín, G., Aguilera, G., Plascencia, M., & Saldaña, R. (2017). El proceso de bruñido con bola: estado del arte de una tecnología en desarrollo. *DYNA* 92, 28-33.
- Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2016). *Metal cutting theory and practice*. CRC press.
- Tabor, D. (1970). The hardness of solids. *Review of physics in technology*, 1(3), 145.

Referencias

- Tushar, U., & Hemant, A. (2015). Machining of plastics: a review. *Int J Eng Gen Sci*, 3, 577-581.
- Xiao, K., & Zhang, L. (2002). The role of viscous deformation in the machining of polymers. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 2317–2336.
- Yen, Y., Sartkulvanich, P., & Altan, T. (2005). Finite element modeling of roller burnishing process. *CIRP annals*, 54(1), 237-240.



ANEXOS

ANEXO I Código de CNC para maquinar las probetas

ANEXOS

%

O0078;

G71;

G0 T0303;

M21;

G97 S1000 M03;

G0 X42.4 Z-10.;

G95 G1 X36.85 F.05;

X35.3;

X33.75;

G0 X42.4;

Z-23.5;

G1 X36.85 F.1;

X35.3;

X33.75;

G0 X42.4;

Z-37.;

G1 X36.85;

X35.3;

X33.75;

G0 X42.4;

Z-50.5;

G1 X36.85;

ANEXOS

X35.3;

X33.75;

G0 X42.4;

Z-64.;

G1 X36.85;

X35.3;

X33.75;

G0 X42.4;

Z-77.5;

G1 X36.85;

X35.3;

X33.75;

G0 X42.4;

Z-91.;

G1 X36.85;

X35.3;

X33.75;

G0 X42.4;

M05;

M20;

M30;

%

Salamanca, Gto., a 28 de Julio del 2020.

M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTIN
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) César Oswaldo Aguilera Ojeda del *Programa de Maestría en* Ingeniería Mecánica y cuyo número de *NUA* es: 387547 del cual soy director. El título de la tesis es: "Estudio del efecto de los parámetros de torneado y bruñido sobre la integridad superficial del polímero UHMWPE"

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE



Dr. Agustín Vidal Lesso
NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO



Dr. Agustín Vidal Lesso
NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS



Dr. Israel Enrique Herrera Díaz
NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE



Dr. Israel Martínez Ramírez
NOMBRE Y FIRMA
VOCAL