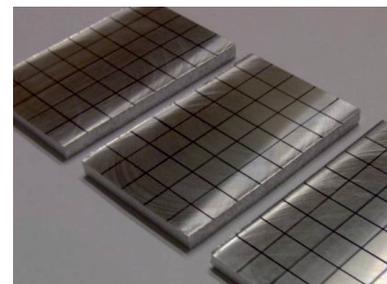


Modelado tridimensional de rugosidad superficial para el proceso de bruñido

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF SURFACE ROUGHNESS FOR BURNISHING PROCESS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7440> | Recibido: 05/11/2014 • Aceptado: 03/02/2015



Alberto Saldaña-Robles, Eduardo Aguilera-Gómez, Héctor Plascencia-Mora, Elías Rigoberto Ledesma-Orozco, Noé Saldaña-Robles y Juan Francisco Reveles-Arredondo

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO. DICIS - DICIVA. Dpto. de Ingeniería Mecánica y Dpto. de Ingeniería Agrícola. Guanajuato. México. Tel.: +52 464 6479940. a.saldana.robles@ugto.mx

ABSTRACT

- Ball burnishing is a plastic deformation process that improves the surface quality of mechanical parts decreasing roughness. The surface roughness is an important parameter to study; it affects friction, lubrication and wear. In this study, a general methodology for finite element and a programming routine based on Parametric Design Language was developed and validated. This methodology is useful to generate parametric models of three-dimensional rough surfaces using a finite element commercial software. The routine produces a random surface roughness using the mean (\bar{x}) and standard deviation (s) of a normal distribution of real surface roughness. The routine was used to generate roughness models of rectangular and cylindrical specimens. The nodal density for generating roughness and the repeatability for a given surface finish were evaluated to optimize the modeled surface roughness. The numerical results show a good correlation to the experimental results. In future, the routine can be used to generate models through the finite element method to simulate any machining process with random roughness thus enabling a less expensive way to study the processes than those of experimental tests.
- **Keywords:** Burnishing process, Surface roughness, Normal distribution, Finishing, Modeling roughness.

RESUMEN

El bruñido con bola es un proceso de deformación plástica que mejora la calidad superficial de las piezas mecánicas reduciendo su rugosidad. La rugosidad de la superficie es un parámetro importante de estudio; se sabe que afecta a la fricción, lubricación y desgaste. En este trabajo, se propone una metodología general para elemento finito y se desarrolla y valida una rutina de programación basada en Lenguaje de Diseño Paramétrico. Esta metodología es útil para generar modelos paramétricos de superficies rugosas tridimensionales en un software comercial de elementos finitos. La rutina produce una rugosidad superficial aleatoria usando la media (\bar{x}) y desviación estándar (s) de una distribución normal de rugosidad de la superficie real. La rutina se utilizó para generar modelos de rugosidad de especímenes rectangulares y cilíndricos. La densidad nodal para generar rugosidad y la repetibilidad para un mismo acabado superficial fueron evaluadas para optimizar el modelado de la superficie rugosa. Los resultados numéricos muestran una buena correlación con los resultados experimentales. En un futuro, la rutina computacional se puede utilizar para generar modelos a través del método de elemento finito para simular cualquier proceso de mecanizado con rugosidad aleatoria, lo cual permite el estudio de los procesos reduciendo los altos costos de las pruebas experimentales.

Palabras clave: Proceso de bruñido, rugosidad superficial, distribución normal, acabado superficial, modelado de rugosidad.

1. INTRODUCCIÓN

Los metales representan una parte importante del consumo mundial de materias primas, siendo utilizados en los procesos de fabricación de diversos sectores industriales [1]. En estos procesos, el acabado de la superficie de muchas de las piezas es de vital importancia, ya que su desempeño se ve afectado por fenómenos físicos, químicos y mecánicos que generalmente inician en la superficie modificando sus propiedades [2].

Los diversos procesos que mejoran el acabado de la superficie pueden clasificarse bajo dos principios: en primer lugar, por arranque o eliminación de material, y en segundo lugar, por medio de deformación plástica superficial (DPS) [3]; este último produce una mayor calidad del acabado superficial. El bruñido de bola es un proceso de DPS simple y de bajo costo [4] que mejora las propiedades físicas y mecánicas tales como: disminución rugosidad [4-8], la cual ofrece una alta

precisión dimensional, aumenta la dureza superficial de la pieza [9,10], introduce tensiones residuales compresivas [11-13], y por tanto, aumenta la resistencia al desgaste [14,15] y a la fatiga [8].

El bruñido de bola es un proceso de elaboración en frío; el elemento deformante es una esfera, la cual ejerce una fuerza normal lo suficientemente alta para producir una pequeña deformación plástica que desplaza el material de las crestas (picos) a los valles (depresiones) de las micro-irregularidades en la superficie de la pieza de trabajo.

En el pasado, la mayoría de los estudios referentes al proceso de bruñido de bola se enfocaron más en el aspecto experimental [4-8, 16-19]; determinando parámetros específicos; entre ellos la rugosidad antes y después del proceso. En años recientes diversos investigadores han desarrollado modelos 2D y 3D mediante el método de elemento finito (MEF) [9, 10, 20-25], para predecir, estudiar y analizar la influencia de los parámetros del proceso de bruñido de bola, permitiendo reducir los altos costos de las pruebas experimentales. El estudio de los modelos se ha centrado más en la predicción de las tensiones residuales compresivas, y la predicción de la rugosidad antes y después del proceso mediante simulación ha sido poco estudiada. En algunas investigaciones no se considera el perfil de rugosidad en el modelo de elemento finito [20,23-25], en otros estudios se consideró como un perfil periódico semicircular [9,10] o triangular [22], ambos con características similares correspondientes a las del proceso de mecanizado previo al bruñido; en otro estudio se utilizó interpolación lineal entre puntos de rugosidad medidos experimentalmente para obtener un perfil de rugosidad 2D [21]. Los diversos procesos de fabricación generan irregularidades de diversas amplitudes y patrones, por lo que, para predecir el acabado superficial mediante MEF, la simulación de la geometría de estas irregularidades aún debe ser investigada.

En este trabajo se ofrece una alternativa para generar modelos 3D de rugosidad superficial. Una metodología general basada en MEF y una rutina computacional basada en el lenguaje ANSYS® 14.0 Parametric Design Language (APDL) se han desarrollado y validado. Esta rutina es útil para generar modelos paramétricos tridimensionales de superficies rugosas en especímenes rectangulares y cilíndricos mediante una distribución normal, la cual aparece frecuentemente en fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación [26]. La parametrización mediante APDL permite generar especímenes de diferentes tamaños y acabados superficiales.

Los modelos rectangulares se comparan con resultados experimentales y los modelos cilíndricos se comparan con datos experimentales reportados en la literatura; ambos modelos mostraron una buena aproximación. Además, el valor óptimo de densidad nodal para generar rugosidad (para una superficie dada) fue determinado para lograr buenos modelos de rugosidad superficial y la repetibilidad de la rugosidad superficial se verificó.

La rutina paramétrica desarrollada puede ser utilizada en futuras investigaciones para modelar una superficie con rugosidad superficial antes del proceso de bruñido o cualquier otro proceso de mecanizado, mejorando su comprensión, con el fin de reducir los altos costos de las pruebas experimentales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE RUGOSIDAD

Con la finalidad de evaluar si la rugosidad superficial puede ser modelada de acuerdo a una distribución normal en la fabricación de piezas por fresado, torneado y bruñido, el siguiente procedimiento se llevó a cabo: a) en especímenes rectangulares la rugosidad superficial se determinó a través de pruebas experimentales, y b) en especímenes cilíndricos se utilizaron datos experimentales reportados por Brostow *et al.* [27]. Esto fue importante porque una distribución normal del acabado superficial real permite determinar los parámetros necesarios para ejecutar la rutina que genera los especímenes rectangulares y cilíndricos con rugosidad.

2.1.1 Especímenes Rectangulares

La Fig. (1) muestra tres especímenes rectangulares de aluminio 6061 con dimensiones de 80mm x 50mm x 7mm; estos fueron mecanizados en un centro de maquinado vertical KIWA COLT 510. Una fresa vertical de 50.8 mm de diámetro con 5 filos se utilizó como un elemento de corte. La velocidad de corte se fijó en $300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, velocidad recomendada para este material y proceso de fabricación [28]. La velocidad de alimentación ($0,053 \text{ mm} \cdot \text{rev}^{-1}$) de la fresa se determinó mediante ecuaciones establecidas para el proceso [29]. Se realizaron dos pases por espécimen (desbaste y pulido), cada uno de 0,5 mm de profundidad de corte.

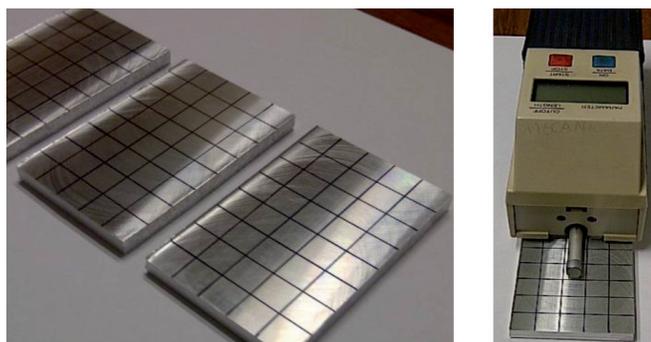


Fig. 1: Especímenes de Aluminio 6061 (izquierda) y Perfilómetro Mitutoyo (derecha)

Una vez mecanizados los especímenes, la superficie de cada espécimen se dividió en una cuadrícula de 40 cuadros de 10 milímetros. Se registraron dos de los parámetros más representativos (R_a y R_z) para describir la rugosidad de la superficie (Fig. (2)); estos parámetros son definidos en la norma ISO 4287 y fueron registrados en la misma dirección de avance del proceso de fresado mediante un Perfilómetro Mitutoyo® Suftest-211 como se muestra en la Fig. (1). Seis mediciones de rugosidad se registraron por división (240 por cada espécimen) con una longitud de evaluación de 0.8 mm [30], estas mediciones se promediaron para obtener 40 datos de cada indicador de rugosidad por espécimen. R_a y R_z se utilizaron para evaluar si la variable rugosidad puede ser modelada como una variable proveniente de una distribución normal, requiriendo un mínimo de 30 lecturas por cada evaluación.

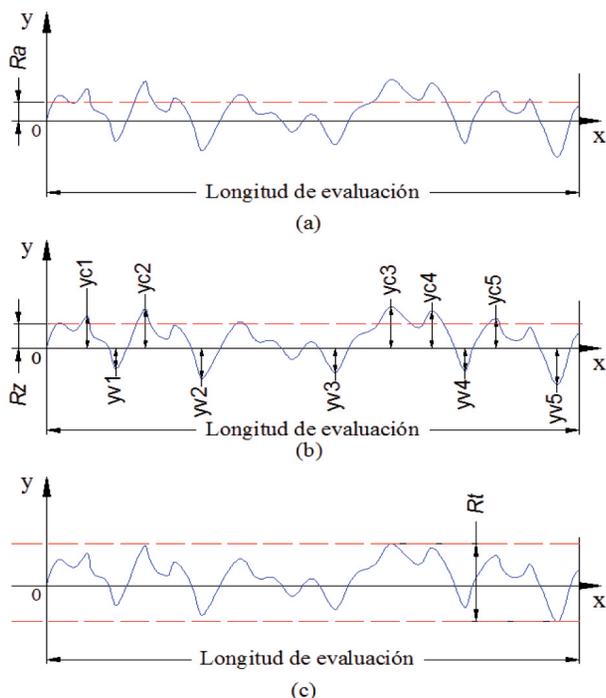


Fig. 2: Indicadores de rugosidad; (a) R_a ; (b) R_z ; (c) R_t

Las ecuaciones (1), (2) y (3) [31] se utilizan frecuentemente por perfilómetros para determinar los valores de R_a (media aritmética de rugosidad), R_z (media aritmética de los 5 valores sucesivos de rugosidad máxima), y R_t (altura máxima), respectivamente, para una longitud de evaluación l . Donde n es el número de evaluaciones, y_i es la altura del pico o la profundidad del valle en un punto i , y_{vi} es la profundidad del valle en un punto i , y_{ci} es la altura del pico en un punto i , $y_{v\min}$ es el valle mínimo y $y_{ci\max}$ es el pico máximo.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \tag{1}$$

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^{5n} |y_{ci}| + \sum_{i=1}^{5n} |y_{vi}|}{5} \tag{2}$$

$$R_t = y_{ci\max} + y_{v\min} \tag{3}$$

Para el análisis estadístico se utilizó el software STATGRAPHICS Centurion XVI®. El gráfico de probabilidad normal se elaboró para los indicadores de rugosidad R_a y R_z de cada prueba, este gráfico es parte del procedimiento utilizado para juzgar si un conjunto de datos numéricos proviene de una distribución normal. Si los datos son muestras aleatorias de una distribución normal, deben aproximarse a lo largo de una línea recta [32]. Además, se realizaron cuatro diferentes pruebas normalidad [33]: Chi-cuadrado, estadístico W de Shapiro-Will, puntuación Z para asimetría y puntuación Z para curtosis. Las pruebas se realizaron para las lecturas de R_a y R_z de cada muestra, obteniendo así las funciones experimentales de rugosidad para cada indicador.

2.1.2 Espécimenes cilíndricos

La rutina desarrollada fue utilizada para generar especímenes cilíndricos con rugosidad superficial fabricados de dos diferentes aceros, Vanadis 6 y 10, que son ampliamente utilizados en la fabricación de herramientas de trabajo en frío. La rutina para generar superficies rugosas tridimensionales se inicializa con la rugosidad media y la desviación estándar obtenidas a partir de pruebas experimentales realizadas en especímenes cilíndricos por Brostow *et al.* [27], las cuales fueron preparadas mediante el proceso pulvimetalúrgico y expuestas a dos procesos de mecanizado antes de aplicar un recubrimiento. El primer proceso fue un torneado longitudinal aplicado de igual forma en dos especímenes; uno de Vanadis 6 y otro de Vanadis 10. Este proceso mejora la geometría de la superficie pero afecta la rugosidad y la calidad de la pieza.

El segundo proceso fue bruñido de bola, que permitió mejorar la calidad de la rugosidad del proceso anterior. El bruñido se llevó a cabo en el centro de torneado-fresado y se empleó un bruñidor de bola con una esfera de diamante policristalino sintético de 1,5 mm de radio; se aplicó solo un pase de bruñido. La velocidad de bruñido mantenida a lo largo de los experimentos fue de $30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Una combinación de tres fuerzas bruñido (80, 130 y 180 N) con tres velocidades de alimentación ($0,02, 0,04$ y $0,06 \text{ mm} \cdot \text{rev}^{-1}$) se utilizó resultando nueve pruebas. La Fig. (3) muestra las vistas ortogonales del espécimen cilíndrico con nueve superficies torneadas-bruñidas así como sus dimensiones. Las tablas 1 y 2 muestran los valores experimentales de rugosidad (R_a, R_z y R_t) obtenidos por Brostow *et al.* [27]; estos valores se muestran para am-

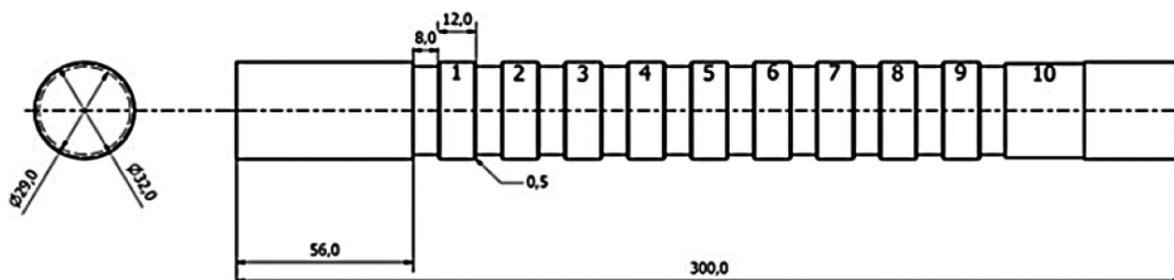


Fig. 3: Vistas ortogonales de la barra de prueba (1 a 9 son torneadas y bruñidas; 10 es solo torneada) [27]

Los procesos de mecanizado (torneado y bruñido) y para las nueve secciones de prueba. Las tablas 1 y 2 muestran también el índice del cambio de rugosidad (KR_a) para cada prueba, el cual puede determinarse mediante la Ec. (4) [27], donde R'_a es la rugosidad media antes del bruñido y R_a después de él.

$$KR_a = \frac{R'_a}{R_a} \quad (4)$$

mediante una distribución normal. Para generar una rugosidad tridimensional sin considerar ondulación y/o lay; la rutina requiere de la media (\bar{x}) y la desviación estándar (s) de una distribución normal de rugosidad real. Además, la rutina requiere el valor de densidad nodal y las dimensiones del espécimen.

La rutina computacional utiliza el paquete de elementos finitos ANSYS®/LS-DYNA® para generar puntos clave (*keypoints*) cuya localización es determinada a partir de la distribución normal seleccionada, posteriormente, se utilizan estos *keypoints* para generar líneas que sirven de base para

No. de prueba	Fuerza de Bruñido F/N	Alimentación f/mm rev ⁻¹	Parámetros después de torneado			Parámetros después de bruñido			KR_a
			R'_a (μm)	R'_z (μm)	R'_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)	
1	80	0.02	1.01	5.07	5.15	0.41	3.11	3.47	2.46
2	80	0.04	0.99	5.00	5.23	0.37	2.89	3.26	2.68
3	80	0.06	0.97	4.77	4.85	0.36	2.34	2.56	2.69
4	130	0.02	0.99	4.87	4.95	0.27	2.01	2.29	3.67
5	130	0.04	0.97	4.71	4.83	0.26	1.65	1.83	3.73
6	130	0.06	0.88	4.83	5.00	0.27	1.83	2.11	3.26
7	180	0.02	0.97	5.21	5.13	0.18	1.48	1.60	5.39
8	180	0.04	0.96	4.93	5.18	0.26	1.76	1.91	3.69
9	180	0.06	0.92	4.65	4.76	0.37	2.50	2.72	2.49

Tabla 1: Resultados experimentales de los indicadores de rugosidad utilizando Vanadis 6 [27]

No. de prueba	Fuerza de Bruñido F/N	Alimentación f/mm rev ⁻¹	Parámetros después de torneado			Parámetros después de bruñido			KR_a
			R'_a (μm)	R'_z (μm)	R'_t (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)	
1	80	0.02	0.94	4.73	4.81	0.54	3.27	3.42	1.74
2	80	0.04	0.96	4.84	4.94	0.48	3.32	3.65	2.00
3	80	0.06	0.98	4.74	4.83	0.50	3.43	3.71	1.96
4	130	0.02	1.00	4.99	5.13	0.47	3.29	3.49	2.13
5	130	0.04	0.94	4.96	5.07	0.43	2.93	3.21	2.19
6	130	0.06	0.97	5.05	5.15	0.47	3.18	3.34	2.06
7	180	0.02	0.87	4.96	5.31	0.57	3.59	4.01	1.53
8	180	0.04	0.90	4.89	4.86	0.21	1.79	2.41	4.29
9	180	0.06	0.87	4.56	4.69	0.32	2.21	2.35	2.72

Tabla 2: Resultados experimentales de los indicadores de rugosidad utilizando Vanadis 10 [27]

2.2 DESARROLLO DE MACRO PARA GENERAR RUGOSIDAD

Para generar superficies tridimensionales con rugosidad en especímenes rectangulares y cilíndricos (Fig. (4)), se desarrolló una rutina computacional en el lenguaje APDL, con la cual modelos paramétricos pueden ser creados. Esta rutina es una herramienta útil para modelar especímenes de diferentes tamaños y acabados superficiales. La parametrización de la rugosidad y la geometría del espécimen permiten la creación de los modelos. La rutina utiliza una metodología similar a la propuesta por Thompson [34] para generar superficies rugosas, permitiendo modelar de forma probabilística la rugosidad

obtener las áreas no coplanares que representan la superficie rugosa del espécimen. Las áreas son extruidas para definir volúmenes, los cuales son discretizados para obtener la malla de elementos finitos; esta malla puede ser utilizada para simular procesos de manufactura tales como bruñido. El procedimiento ejecutado por la rutina para generar un espécimen con rugosidad superficial se muestra en el diagrama de flujo de la Fig. (5).

Para modelar especímenes rectangulares y cilíndricos se utiliza una metodología similar; la diferencia radica en el sistema coordenado y las dimensiones específicas de la geometría del modelo.

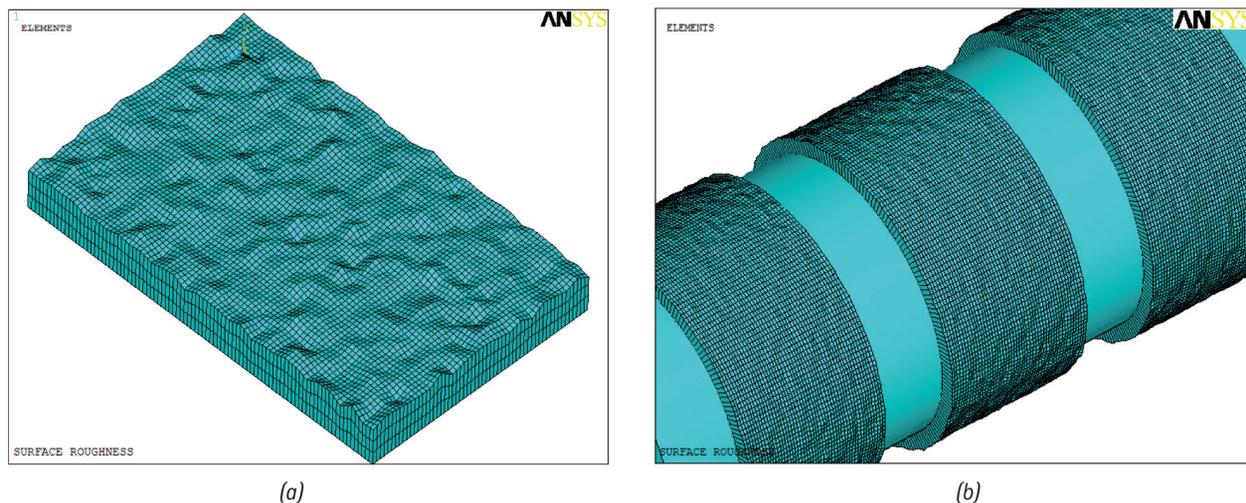


Fig. 4: Modelo geométrico de rugosidad aleatoria en el espécimen: (a) Rectangular $R_a = 2,63 \mu\text{m}$ (1000x), (b) cilíndrica $R_a = 2,58 \mu\text{m}$ (100x).

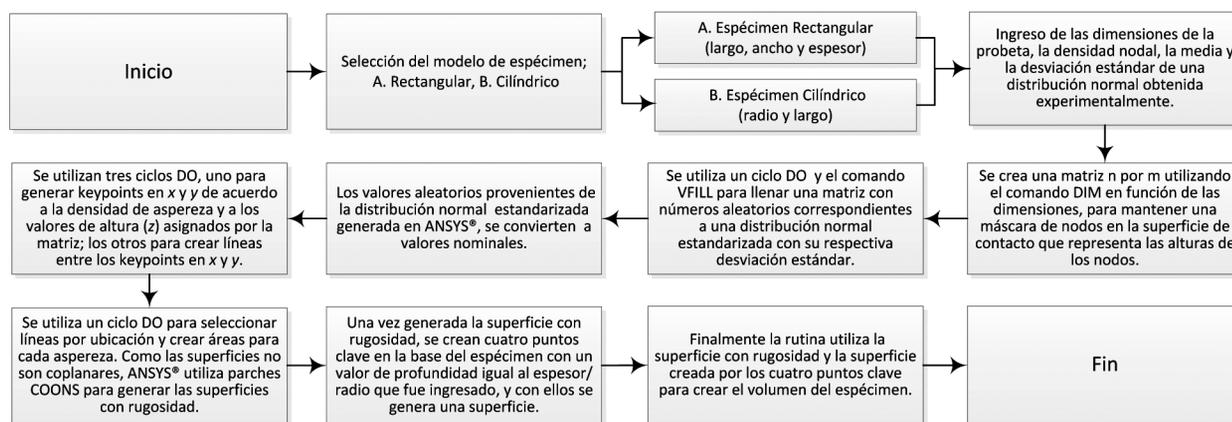


Fig. 5: Diagrama de flujo de la rutina para generar superficies con rugosidad tridimensional

2.2.1 Especímenes Rectangulares

Para evaluar el desempeño de la rutina que fue desarrollada, se utilizaron los parámetros determinados experimentalmente en los especímenes rectangulares. Tres ejemplares con dimensiones de 80mm x 50mm x 6mm (7 mm de grosor antes del mecanizado) se modelaron. La densidad nodal se asumió en 40 puntos, ya que esta fue la densidad promedio medida experimentalmente para los especímenes.

La media y la desviación estándar experimentales de R_a y R_z obtenidas del espécimen 1, se utilizaron como parámetros iniciales para ingresar en la rutina y generar la rugosidad del modelo geométrico. Una vez que la superficie rugosa fue generada, los valores de rugosidad se analizaron utilizando el mismo software y métodos estadísticos a los empleados en las pruebas experimentales. Una comparación entre las funciones de densidad experimental y numérica se llevaron a cabo para R_a y R_z .

2.2.1.1 Densidad Nodal para generar rugosidad

El acabado superficial (R_a) para el espécimen 1 fue modelado con diferentes densidades nodales (40, 160, 640, 2560, 10240 y 40960), todas ellas múltiplos de 40, que es el valor de densidad nodal experimental de las pruebas experimentales. Lo anterior fue hecho por dos razones, en primer lugar,

encontrar un valor de densidad nodal que permitiera reducir la diferencia entre datos numéricos y experimentales (cuando se compara la media y desviación estándar). En segundo lugar, representar la densidad nodal con un mayor número de asperezas a la inicial de 40, de forma que sea más cercana a la superficie real resultante de un proceso de mecanizado.

2.2.1.2 Repetitividad para un acabado superficial dado

La repetitividad para el mismo acabado superficial (media y desviación estándar) del espécimen 1 se evaluó. Ya que cada vez que la rutina es utilizada manteniendo los mismos parámetros iniciales de rugosidad y dimensiones del espécimen, una matriz con diferentes valores de rugosidad se genera, la cual proviene de una distribución normal. Esto se debe a que el software realiza el llenado de la matriz de forma aleatoria. Para validar si el modelado del mismo acabado superficial puede ser repetible, seis repeticiones del mismo acabado superficial se realizaron para cada densidad nodal, determinando la media y la desviación estándar para cada prueba.

2.2.2 Especímenes cilíndricos

Con la finalidad de evaluar los indicadores de rugosidad en la rutina desarrollada, fue necesario determinar las variables que definen completamente la curva normal para cada

prueba, estas variables son la media y la desviación estándar de la rugosidad. La rugosidad media se muestra en las Tablas 1 y 2 para Vanadis 6 y 10, respectivamente. Para obtener la desviación estándar para cada prueba, una serie de aproximaciones se llevaron a cabo. Las funciones de densidad se determinaron a partir de tres parámetros conocidos, la primer variable es la rugosidad media (Tablas 1 y 2), la segunda y tercera son el límite inferior de la distribución (L_{inf}) y el límite superior (L_{sup}). Para determinar estos límites, la Ec. (5) se empleó. Donde Rt_n es la rugosidad máxima de la n -ésima prueba.

$$L_{sup/inf} = \pm \frac{Rt_n}{2} \quad (5)$$

Usando la función de densidad de cada prueba, fue posible determinar la desviación estándar. Para generar los modelos con rugosidad, una densidad nodal de 2700 puntos se utilizó sobre la superficie del modelo. Treinta y seis modelos fueron desarrollados, obteniendo 2700 valores por modelo que fueron analizados usando las ecuaciones (1) a (3) para determinar los indicadores de rugosidad R_a , R_v y R_z . Por último, un comparativo entre los resultados numéricos y experimentales se realizó.

3. RESULTADOS

Ya que los indicadores experimentales de rugosidad (R_a y R_z) se aproximan a lo largo de una línea recta y el valor P más pequeño de todas las pruebas fue superior a 0.05, no se puede

rechazar que los datos R_a y R_z provienen de una distribución normal con un 95% de confianza; por lo tanto, los indicadores de rugosidad obtenidos de especímenes procesados con el dispositivo de fresado puede ser modelados por una distribución normal.

3.1 ESPECÍMENES RECTANGULARES

La Fig. (6a) y Fig. (6b) muestran las funciones de densidad experimental para los indicadores R_a y R_z de cada espécimen, así como la media y la desviación estándar, por lo que, la curva normal queda totalmente establecida. Los resultados numéricos aleatorios obtenidos para la matriz (40 por espécimen) generada por el software después de modelar las superficies rugosas fueron analizados utilizando el mismo paquete estadístico empleado para el análisis de los datos experimentales. La Fig. (6c) y Fig. (6d) muestran las funciones de densidad, los valores de la media y la desviación estándar de rugosidad para R_a y R_z obtenidos aleatoriamente en los modelos.

La Tabla 3 muestra los errores porcentuales de R_a y R_z para cada espécimen, comparando la media experimental contra la media numérica y lo mismo para la desviación estándar. Además, el coeficiente de correlación (r) entre los datos experimentales y numéricos se muestra. El porcentaje máximo de error de la media (\bar{x}) y la desviación estándar (s) fueron 3.79 % y 3.36 % para R_a , respectivamente, para R_z fue 2.97 % y 6.01 %; estos errores se consideran aceptables, ya que la diferencia máxima entre la media y la desviación estándar entre resultados experimentales fue de 5.14 % y 12.5 % en el caso de R_a , respectivamente; para R_z fue de 8.05 % y 9.21 %.

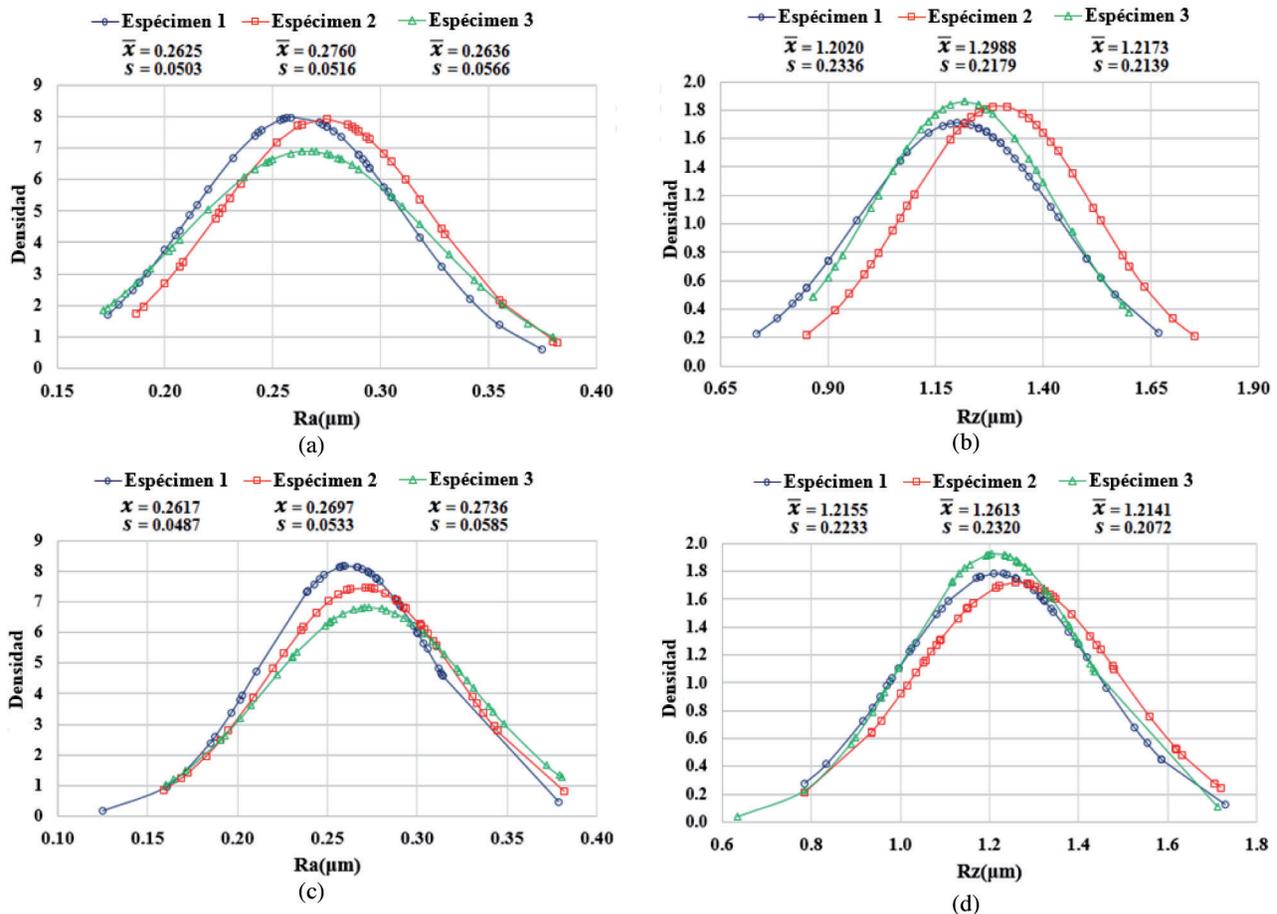


Fig. 6: Función de densidad (media y desviación estándar). (a) R_a experimental, (b) R_z experimental (c) R_a numérica y (d) R_z numérica

No. de prueba	% de error $R_a (R_z)$	% de error $s (R_z)$	$r (R_z)$
1	0.30 (1.11)	3.18 (4.41)	0.97 (0.98)
2	2.28 (2.97)	3.29 (6.01)	0.98 (0.98)
3	3.79 (0.26)	3.36 (3.13)	0.99 (0.97)

Tabla 3: Comparativo de resultados numérico-experimentales

3.1.1 Densidad Nodal

La Fig. (7a) muestra los valores numéricos de la media obtenido para cada densidad nodal evaluada, mientras que la Fig. (7b) muestra la desviación estándar. El error máximo (2.17 %) y el error mínimo (0.01 %) para la media numérica comparada con la media experimental (R_a del espécimen 1) fue encontrado para densidades nodales de 160 y 40960, respectivamente. El error máximo (3,18 %) y el error mínimo (0,20 %) de la desviación estándar numérica comparada con la experimental se encontraron en las densidades de 40 y 10240, respectivamente. Es importante destacar que para la densidad nodal de 40960 mostró un valor bajo de 0.40 % de error. Para una densidad nodal de 2560, los resultados mostraron un error no mayor al 1% para la media y menos del 2% para la desviación estándar. Con densidades nodales mayores, fue posible observar que el error disminuye, sin embargo, el uso de un modelo con densidad nodal alta impacta en el tiempo computacional

de simulación, sin contribución significativa en la reducción del error.

3.1.2 Repetibilidad para un acabado superficial dado

La Fig. (8a) y (8b) muestran los valores numéricos para la media y la desviación estándar obtenidos para cada repetición con las siguientes densidades nodales: 40, 640, 2560 y 40960. La Fig. (8a) muestra que la variabilidad de la media es considerablemente más alta para las repeticiones donde la densidad nodal es baja (40 y 640). Conforme la densidad nodal aumenta, la variabilidad de la media disminuye y se acerca a la media experimental. Debido a esto, el porcentaje de error de los datos numéricos calculados sobre la base del valor experimental para la media decrece conforme la densidad nodal se incrementa, siendo el porcentaje de error menor al 1% para densidades nodales a partir de 2560, y menos del 0.1 % para densidades nodales de 40960. Para la desviación

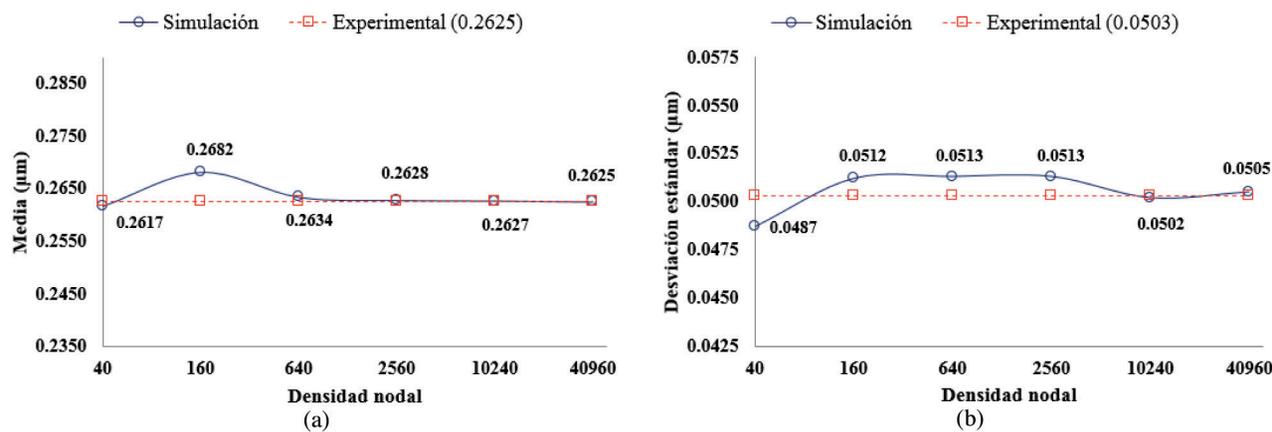


Fig. 7: Incremento en la densidad nodal para el mismo acabado superficial. (a) Media y (b) desviación estándar

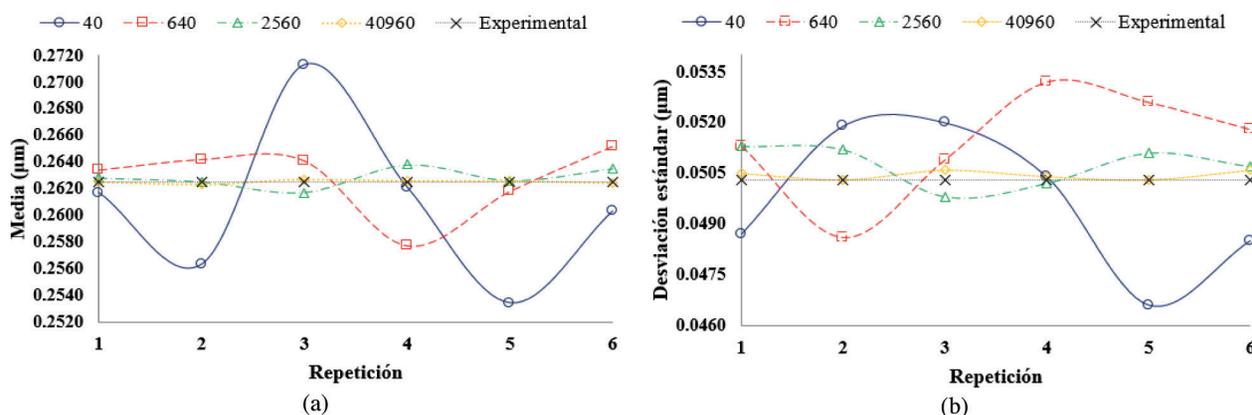


Fig. 8: Repetibilidad de diferentes densidades nodales para el mismo acabado superficial. (a) Media y (b) desviación estándar

estándar (Fig. (8b)) se observa un comportamiento similar. Para una densidad nodal de 40, el porcentaje de error de la desviación estándar fue 7.35 % (máximo) en la repetición 5. Además, conforme aumenta la densidad nodal, el porcentaje de error disminuye. Por lo tanto, para una densidad nodal de 40960 fue encontrado un error máximo porcentual 0.59 % en la repetición 3.

3.2 ESPECÍMENES CILÍNDRICOS

Una vez que los 36 modelos fueron generados y analizados sus resultados, la información se resumió y se presenta en las Tablas 4 y 5 en las cuales se muestran los siguientes indicadores de rugosidad: el cambio en el índice de la rugosidad media, el coeficiente de correlación entre los valores numéricos y experimentales, y entre paréntesis, el porcentaje de error entre

No. de prueba	Parámetros después de torneado				Parámetros después de bruñido				KR _a (%e)
	R' _a (%e)	R' _z (%e)	R' _t (%e)	r	R _a (%e)	R _z (%e)	R _t (%e)	r	
1	1.0097 (0.03)	4.9771 (1.87)	5.4436 (5.39)	0.9969	0.4098 (0.04)	3.1406 (0.97)	3.4349 (1.02)	0.9998	2.4638 (0.02)
2	0.9821 (0.81)	5.1874 (3.61)	5.5160 (5.18)	0.9999	0.3712 (0.32)	2.9977 (3.59)	3.3549 (2.83)	0.9999	2.6458 (1.13)
3	0.9759 (0.60)	4.7969 (0.56)	5.1160 (5.20)	0.9987	0.3581 (0.53)	2.3333 (0.29)	2.6145 (2.08)	0.9997	2.7252 (1.13)
4	0.9855 (0.46)	4.8998 (0.61)	5.2339 (5.42)	0.9986	0.2708 (0.31)	2.0873 (3.71)	2.3361 (1.97)	0.9998	3.6388 (0.77)
5	0.9757 (0.59)	4.7617 (1.08)	5.0622 (4.59)	0.9993	0.2586 (0.53)	1.6662 (0.97)	1.8534 (1.26)	0.9999	3.7725 (1.11)
6	0.8798 (0.02)	4.8143 (0.33)	5.0383 (0.76)	0.9999	0.2699 (0.02)	1.9002 (3.69)	2.0760 (1.64)	0.9986	3.2593 (0.01)
7	0.9733 (0.34)	5.1630 (0.91)	5.4333 (5.58)	0.9975	0.1799 (0.05)	1.4481 (2.20)	1.5838 (1.02)	0.9999	5.4095 (0.38)
8	0.9599 (0.02)	4.9812 (1.03)	5.4421 (4.82)	0.9992	0.2588 (0.46)	1.7863 (1.47)	1.9651 (2.81)	0.9999	3.7088 (0.45)
9	0.9249 (0.54)	4.4980 (3.38)	4.8320 (1.49)	0.9986	0.3730 (0.81)	2.5113 (0.45)	2.6697 (1.88)	0.9997	2.4795 (0.28)

%e- Error porcentual entre los indicadores numéricos y experimentales.

Tabla 4: Resultados de los indicadores de Rugosidad (µm) obtenidos de los modelos numéricos para Vanadis 6

No. de prueba	Parámetros después de torneado				Parámetros después de bruñido				KR _a (%e)
	R' _a (%e)	R' _z (%e)	R' _t (%e)	r	R _a (%e)	R _z (%e)	R _t (%e)	r	
1	0.9327 (0.78)	4.7727 (0.89)	5.0749 (5.22)	0.9989	0.5351 (0.91)	3.1780 (2.90)	3.3793 (1.21)	0.9999	1.7429 (0.12)
2	0.9597 (0.03)	4.7741 (1.38)	5.2216 (5.39)	0.9973	0.4842 (0.86)	3.4092 (2.62)	3.7832 (3.52)	0.9999	1.9823 (0.90)
3	0.9768 (0.33)	4.7694 (0.62)	5.0964 (5.23)	0.9987	0.4977 (0.47)	3.4697 (1.14)	3.8171 (2.81)	0.9999	1.9627 (0.14)
4	1.0061 (0.60)	5.0574 (1.33)	5.3766 (4.59)	0.9994	0.4670 (0.64)	3.3062 (0.49)	3.6784 (5.12)	0.9989	2.1542 (1.23)
5	0.9398 (0.02)	4.8817 (1.60)	5.1088 (0.76)	0.9997	0.4298 (0.04)	2.9053 (0.85)	3.1776 (1.02)	0.9999	2.1865 (0.02)
6	0.9622 (0.81)	5.1100 (1.17)	5.4337 (5.22)	0.9990	0.4738 (0.80)	3.1151 (2.08)	3.4391 (2.88)	0.9987	2.0308 (1.63)
7	0.8655 (0.52)	4.9668 (0.14)	5.5259 (3.91)	0.9992	0.5675 (0.44)	3.7503 (4.27)	4.1258 (2.81)	0.9999	1.5252 (0.07)
8	0.9058 (0.64)	4.7912 (2.06)	5.0936 (4.59)	0.9975	0.2099 (0.06)	2.1812 (17.94)	2.3856 (1.02)	0.9817	4.3157 (0.69)
9	0.8699 (0.02)	4.5158 (0.98)	4.7259 (0.76)	0.9998	0.3227 (0.83)	2.1837 (1.20)	2.3220 (1.21)	0.9999	2.6957 (0.85)

%e - Error porcentual entre los indicadores experimentales y numéricos.

Tabla 5: Resultados de los indicadores de Rugosidad (µm) obtenidos de los modelos numéricos para Vanadis 10

los indicadores numéricos y experimentales obtenido en cada prueba. Comparando los resultados numéricos y experimentales, los porcentajes máximos de error encontrados fueron de 0.91 %, 4.27 % y 5.58 % para R_a , R_z y R_p , respectivamente. El índice de cambio en la rugosidad media (KR_a) presentó un error máximo de 1.63 %. Un error atípico de R_z fue encontrado en la prueba No. 8 para el bruñido en Vanadis 10, el porcentaje de error entre los resultados numéricos y experimentales fue de 17.94 %. Sin embargo, este error puede deberse a alguna imperfección del material registrada por el perfilómetro. El resultado de la prueba experimental No. 8 para el bruñido en Vanadis 10 presentó un valor más bajo para R_z (1.79 μm) que los valores de este indicador para otras pruebas, que a pesar de ser hechas con diferentes parámetros de bruñido mostraron valores alrededor de 3.0 μm . Los coeficientes de correlación calculados a partir de la rugosidad experimental y los indicadores obtenidos numéricamente mostraron que el valor más bajo fue de 0.9973, sin tomar en cuenta el coeficiente de correlación de 0.9817 para la prueba No. 8 de bruñido en Vanadis 10 que se mencionó anteriormente.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, una rutina basada en el lenguaje APDL fue desarrollada y validada, esta rutina genera modelos con rugosidad tridimensional aleatoria en especímenes rectangulares y cilíndricos. Los resultados muestran que para una densidad nodal superior a 2560 la media presenta un error no mayor al 1% y menor al 2% para la desviación estándar entre los resultados numéricos y experimentales. El error puede ser reducido mediante el aumento de la densidad nodal, sin embargo, un modelo con una malla excesivamente densa

afectará el tiempo computacional de la simulación sin ninguna contribución significativa a la reducción del error porcentual. Los indicadores de rugosidad del proceso de fresado evaluados en este estudio pueden ser modelados por una distribución normal, de acuerdo con el análisis estadístico realizado. Los indicadores de rugosidad de procesos de torneado y bruñido no fueron evaluados estadísticamente, pero cuando los indicadores fueron modelados con una distribución normal, estos mostraron una buena aproximación y errores bajos en comparación con los valores experimentales. Por lo tanto, la rugosidad superficial de estos procesos puede ser modelada a través de una distribución normal. En geometrías rectangulares, la rutina desarrollada mostró un porcentaje de error menor entre los resultados experimentales y numéricos cuando se compararon con la variación porcentual entre los resultados experimentales de diferentes muestras. En geometrías cilíndricas y rectangulares, los modelos generados mostraron una buena correlación entre los indicadores de rugosidad experimental y aquellos obtenidos numéricamente (igual o mayor que $r = 0.97$). La rutina paramétrica desarrollada puede ser usada en futuros estudios para modelar la rugosidad superficial resultante de cualquier proceso de maquinado mediante una distribución normal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato por su valiosa contribución de equipo y material para la realización de este trabajo. El autor Saldaña R. A. agradece el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para sus estudios de doctorado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Díaz RS, Boada CO & Padrón SC. "Implementación de un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas por bruñido con rodillo simple". Ingeniería Mecánica. January-April 2009. Vol. 12. p.81-90. ISSN 1815-5944.
- [2] Díaz RS, Robert N T & Boada CO. "Efectos superficiales del bruñido por rodillo en el acero AISI 1045". Rev LatinAm Metal Mater. 2009. Vol.29. p.15-22. ISSN: 0255-6952.
- [3] Travieso RJA, "Estudio para la mejora del acabado superficial de superficies complejas, aplicando un proceso de deformación plástica (Bruñido con Bola)". Tesis Doctoral. Barcelona, España. Universidad Politécnica de Cataluña. 2010.
- [4] Rodríguez A, López de Lacalle LN, Celaya A, Lamikiz A, & Albizuri J. "Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique". Surface and Coatings Technology. January 2012. Vol.206-11. p.2817-2824. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.045>.
- [5] El-Tayeb NSM, Low KO, & Brevern PV. "Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061". Journal of materials processing technology. 2007. Vol. 186-1. p.272-278. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.044>.
- [6] Hamadache H, Laouar L, Zeghib NE, & Chaoui K. "Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing". Journal of Materials Processing Technology. December 2006. Vol.180-1. p.130-136. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.05.013>.
- [7] Travieso RJA, Dessein G, & González RHA. "Improving the surface finish of concave and convex surfaces using a ball burnishing process". Materials and Manufacturing Processes. December 2011. Vol.26-12. p.1494-1502. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2010.544819>.
- [8] Rodríguez A, López de Lacalle LN, Celaya A, Fernández A & Lamikiz A. "Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines". International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. 2011. Vol.4. p.220-237. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJMMS.2011.041469>.
- [9] Yen YC, Sartkulvanich P, & Altan T. "Finite element modeling of roller burnishing process". CIRP Annals-Manufacturing Technology. January 2005. Vol.54-1. p.237-240. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60092-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60092-4).
- [10] Rodríguez A, López de Lacalle LN, Celaya A, Lamikiz A, & Albizuri J. "Surface improvement of shafts by the

- deep ball-burnishing technique". *Surface and Coatings Technology*. January 2012. Vol.206-11 p.2817-2824. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.045>.
- [11] Bouzid W S, & Sai K. "Finite element modeling of burnishing of AISI 1042 steel". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. March 2005. Vol.25-(5-6). p.460-465. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-003-1993-3>.
- [12] Bougharriou A, Sai WB, & Sai K. "Prediction of surface characteristics obtained by burnishing". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. January 2010. Vol.51-(1-4). p.205-215. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/175355509X387110>.
- [13] Sayahi M, Sghaier S & Belhadjsalah H. "Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4599-9>.
- [14] Hassan AM, & Maqableh AM. "The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components". *Journal of Materials Processing Technology*. January 2000. Vol.102-1.p.115-121. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00464-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00464-7).
- [15] Mahmood HA & Al-Dhifi SZ. "Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process". *Journal of Materials Processing Technology*. January 1999. Vol.96-1.p.73-80. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00254-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00254-X).
- [16] Hassan AM & Maqableh AM. "The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components" *Journal of Materials Processing Technology*. January 2000. Vol.102-1.p.115-121. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00464-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00464-7).
- [17] Rajasekariah R & Vaidyanathan S. "Increasing the wear resistance of steel components by ball burnishing". *Wear*. 1975. Vol.34.p.183-188. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0954405414527962>.
- [18] Shiou FJ & Chen CH. "Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process". *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol.140-1.p.248-254. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00750-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00750-7).
- [19] Loh NH, Tam SC, & Miyazawa S. "A study of the effects of ball-burnishing parameters on surface roughness using factorial design". *Journal of mechanical working technology*. 1989. Vol.18-1.p.53-61. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3804\(89\)90109-5](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3804(89)90109-5).
- [20] Sayahi M, Sghaier S & Belhadjsalah H. "Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. November 2012. Vol.1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4599-9>.
- [21] Bougharriou A, Sai K & Bouzid W. "Finite element modeling of burnishing process". *Materials Technology: Advanced Performance Materials*. March 2010. Vol.25-1.p.56-67. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/175355509X387110>.
- [22] Balland P, Tabourot L, Degre, F & Moreau V. "Mechanics of the burnishing process". *Precision Engineering*. January 2012. Vol.37-1.p.129-134. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.07.008>.
- [23] Sai, W B & Sai K. "Finite element modeling of burnishing of AISI 1042 steel". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. March 2005. Vol.25-(5-6).p.460-465. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-003-1993-3>.
- [24] Klocke F, Bäcker V, Wegner H & Zimmermann M. "Finite element 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*. 2011. Vol.225-1.p.2-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM2044>.
- [25] Fu CH, Guo YB, McKinney J & Wei XT. "Process mechanics of low plasticity burnishing of Nitinol alloy". *Journal of materials engineering and performance*. 2012. Vol.21-12.p.2607-2617. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-012-0313-1>.
- [26] Walpole RE, Myers RH, Myers SL & Ye K. *Probability and statistics for engineers and scientists*. 9th Edition. Pearson. 2011. ISBN 978-0-321-62911-1.
- [27] Brostow W, Czechowski K, Polowski W, Rusek P, Toboła D & Wronska I. "Slide diamond burnishing of tool steels with adhesive coatings and diffusion layers". *Materials Research Innovations*. 2013. Vol.17-4. p.269-277. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1433075X12Y.0000000060>.
- [28] Gerling H. *Alrededor de las máquinas-herramienta*. Reverté. 2002. ISBN: 9788429160499.
- [29] Groover M. *Fundamentals of modern manufacture*. Lehigh University. Prentice Hall.1997. ISBN-13: 978-1118231463.
- [30] ISO 4287:1997. *Geometrical Product Specifications (GPS) Surface Texture: Profile Method Terms. Definitions and Surface Texture Parameters*. International Organisation for Standardisation. 1997.
- [31] Rodríguez-Grasso J. M, Torres-Valhuerdi A, Alonso-González A. *Rugosidad superficial CD de Monografías*. Cuba, Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", 2008. 6p.
- [32] STATGRAPHICS – Rev. 4/25/2007© 2006 por StatPoint. Inc. *Gráfico de Probabilidad Normal* – 1.
- [33] STATGRAPHICS – Rev. 9/14/2006© 2006 por StatPoint. Inc. *Ajustando Distribución (Datos No Censurados)* – 8.
- [34] Thompson MK. "Methods for generating rough surfaces in ANSYS". In *Proceedings of 2006 International ANSYS Conference*. 2006. ISBN: 0-07-283209-6.