

ESTUDIO DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL TORNEADO DE PIEZAS ESBELTAS BAJO RETEMBLADO

Study of the variables more influents in the surface roughness in the turning of slim pieces under chatter vibration

RESUMEN

El mecanizado de piezas delgadas se encuentra influenciado por un fenómeno denominado retemblado, que afecta la calidad superficial. En este trabajo se presenta un estudio de los factores que influyen sobre la rugosidad superficial en un proceso de torneado de cilindros esbeltos bajo el efecto del fenómeno de retemblado. El propósito del estudio es determinar cuales son las variables del proceso que más influyen sobre la rugosidad superficial. Para ello se utiliza un modelo que permite predecir la topografía superficial en operaciones de torneado con retemblado. El modelo se encuentra en función de los parámetros de corte y las propiedades del material a mecanizar.

PALABRAS CLAVES: Retemblado, Rugosidad Superficial, Torneado.

ABSTRACT

The machining of slim pieces is affected by the chatter phenomenon, and chatter affects the surface quality of machined workpieces. In this paper a study of the factors that influence the surface roughness of slim pieces fabricated on a lathe under self-excitation chatter vibration is presented. The purpose of the study is to determine which are the variables of the process more influents in the surface roughness. For this study a model for predicting the surface topography under chatter is used. The model functions according to the operating conditions of the turning process and the properties of the material to be machined.

KEYWORDS: Chatter, Surface Roughness, Turning

1. INTRODUCCIÓN

La rugosidad superficial es un índice muy utilizado en la calidad de un producto y como requerimiento técnico en los productos mecánicos. El fenómeno de retemblado ("chatter" en inglés) afecta a la calidad superficial de las piezas mecánicas y por lo tanto merece gran atención en los procesos de mecanizado por los efectos no deseados que causa.

En el presente trabajo se realiza el estudio de los factores que más influyen sobre los parámetros de rugosidad: rugosidad media R_a y máxima distancia pico-valle R_t , sobre superficies mecanizadas bajo el efecto del retemblado. A diferencia de los trabajos encontrados en este tema, el presente estudio se lleva a cabo utilizando el valor de rugosidad que se obtiene a partir de la topografía superficial simulada utilizando un modelo de tipo teórico analítico, que permite predecir el retemblado.

El fenómeno de retemblado ha sido ampliamente estudiado, tanto en procesos de torneado como en fresado. En el proceso de torneado, muchos autores han

trabajado considerando el sistema herramienta-pieza como un sistema simple de un solo grado de libertad: Deshpande and Fofana [1], Litak [2], Lipski y otros [3]. A diferencia de lo presentado en [1,2,3], en los cuales los modelos desarrollados se basan en ecuaciones diferenciales con retraso, el modelo usado en el presente artículo tiene como principal característica que la ecuación que define la función forzante del sistema está en función de las condiciones de mecanizado, así como de las propiedades del material a mecanizar. Otros autores como Moufki y otros [4], presentan un modelado analítico de la vibración de retemblado y asumen también el sistema como resorte-masa-amortiguador, de un solo grado de libertad. La función forzante que genera la vibración se mide experimentalmente y se introduce en el modelo.

También se encuentran autores que trabajan con modelos de varios grados de libertad como el de Chandiramani y Pothala [5], cuyo modelo también está basado en ecuaciones no lineales diferenciales con retraso. Vela-Martinez y otros [6] trabajan con modelos de dos grados

VALENTINA KALLEWAARD E.

Ingeniero Mecánico, Ms. C.
Profesora Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
valentin@utp.edu.co

HERNÁN A. GONZÁLEZ R.

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Profesor Lector
Universitat Politècnica de Catalunya
hernan.gonzalez@upc.edu

de libertad, para predecir el retemblado en torneado, basados en el acoplamiento entre la pieza y la herramienta. Existen además autores como Mahdavinejad [7], que emplean otras metodologías, por ejemplo un modelo de elementos finitos para analizar el mecanizado de torneado. Otros, en estudios recientes, como Dassanayake y Suh [8], investigan la dinámica del torneado, y utilizan un modelo 3D.

A diferencia de los estudios encontrados, el modelo utilizado para el desarrollo de este trabajo es de tipo Van der Pol, de un solo grado de libertad, para predecir la aparición del fenómeno de retemblado, pero que difiere de la mayoría de los modelos desarrollados por los diferentes autores, que de acuerdo con Fofana [9]: “*son modelos de naturaleza lineal y no lineal, con su dinámica descrita por ecuaciones diferenciales con retraso en el tiempo*”. El modelo utilizado para este artículo está basado en las condiciones de corte: avance f , profundidad de corte h_0 , velocidad de corte v_c y ángulo de desprendimiento α_0 , y de las propiedades del material a mecanizar: módulo de elasticidad E , esfuerzo real de rotura S_f y decremento logarítmico (utilizado para determinar el coeficiente de amortiguación c).

Partiendo del modelo de retemblado, se desarrolla un algoritmo computacional que permite simular la topografía superficial obtenida en una pieza para diferentes condiciones de corte, en procesos afectados por el retemblado. A partir de la topografía superficial se calculan los parámetros de rugosidad Ra y Rt .

Algunos autores han trabajado acerca de la predicción de la rugosidad superficial. Por ejemplo, Lin y Chang [10], presentaron un modelo para simular el perfil de acabado superficial generado después de una operación de torneado, con características de vibración conocidas. En dicho artículo la topografía superficial obtenida es el resultado de la superposición de una vibración medida experimentalmente y la forma de la herramienta de corte. Si bien en el artículo de Lin y Chang [10] se modela la rugosidad superficial, la vibración utilizada no puede predecirse teóricamente como se hace en el presente trabajo, sino que debe ser medida para cada caso en estudio. Otros autores, por ejemplo Abouelatta y Madl [11], buscan encontrar una correlación entre la rugosidad y las vibraciones en torneado y así derivar modelos de regresión para predecir los parámetros de rugosidad Ra , Rt y Rsk basados en los parámetros de corte y las vibraciones de la máquina herramienta. En ese estudio, así como en Moufki y otros [4] y Lin y Chang [10], la vibración de retemblado se obtiene experimentalmente, a diferencia del caso del presente artículo donde la vibración es obtenida analíticamente, a partir del modelo.

Este artículo se encuentra desarrollado así: primero, la descripción del modelo para retemblado, segundo la explicación del modelo para generar la topografía

superficial, tercero el estudio de la influencia de las condiciones de corte sobre los parámetros de rugosidad Ra y Rt , presentación de resultados, discusión y conclusiones.

2. MODELO PARA PREDICCIÓN DEL FENÓMENO DE RETEMBLADO

Para el presente estudio se emplea un modelo desarrollado por los autores [11]. En el modelo, de corte ortogonal, se considera que la interfase herramienta-pieza es una estructura de un solo grado de libertad, donde el movimiento se produce en dirección de la coordenada x , ver Fig. (1). La ecuación (1) gobierna un sistema dinámico de un solo grado de libertad.

$$m_{eq}(t)\ddot{x} + c(t)\dot{x} + k(t)x = \Delta F_x(x, \dot{x}, \alpha_0, v_c, h_0, f, S_f, \varepsilon) \quad (1)$$

Donde:

x : posición de la herramienta en función del tiempo;

\dot{x} : velocidad; \ddot{x} : aceleración; m_{eq} : masa equivalente;

c : coeficiente de amortiguación; k : constante de rigidez; α_0 : ángulo de desprendimiento de la herramienta, en estado estable; v_c : velocidad de corte; h_0 : espesor de viruta en estado estacionario (equivalente a la profundidad de corte en estado estacionario); f : avance por revolución; S_f : esfuerzo real de rotura del material; ε : cociente entre el espesor de viruta y el espesor de viruta no deformado; ΔF_x : función forzante oscilatoria.

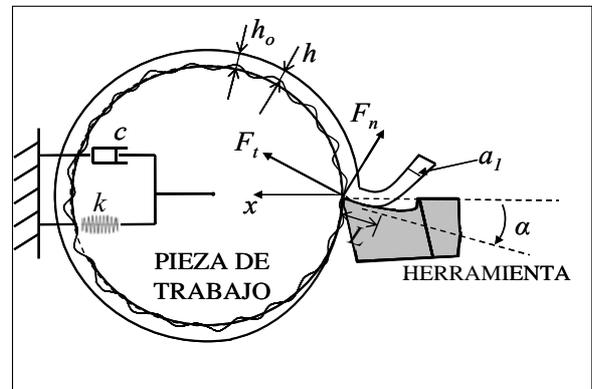


Figura 1. Modelo Teórico de un grado de libertad para predecir el retemblado.

La determinación de la función ΔF_x es fundamental en el modelo ya que es la encargada de excitar al sistema produciendo un comportamiento dinámico. ΔF_x estará definida como la componente oscilatoria de la fuerza exterior que afecta al proceso, y se puede determinar conociendo la fuerza dinámica y la componente de estado estable de dicha fuerza. La componente dinámica de la fuerza se obtiene haciendo una extensión de un modelo de fuerzas de estado estable desarrollado por Toropov y Ko [12-13]. La extensión del modelo de estado estable es el desarrollo de un modelo no estacionario el cual se

describe en forma detallada en [11]. La expresión obtenida para ΔF_x es:

$$\Delta F_x = \varepsilon f S_j (h_0 + x) \left[\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \cos \left(\alpha_0 + \arctan \left(\frac{-\dot{x}}{V_c} \right) \right) - \sin \left(\alpha_0 + \arctan \left(\frac{-\dot{x}}{V_c} \right) \right) \right] - \varepsilon f S_j h_0 \left[\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \cos(\alpha_0) - \sin(\alpha_0) \right] \quad (2)$$

En [14] se estudia el comportamiento de este modelo y se demuestra que las tendencias del modelo para la predicción del retemblado son correctas, y que el modelo se comporta satisfactoriamente permitiendo predecir el comportamiento oscilatorio autoexcitado (retemblado).

2. ALGORITMO COMPUTACIONAL PARA GENERAR LA TOPOGRAFIA SUPERFICIAL

A partir del modelo generador de retemblado (1), se desarrolla un algoritmo computacional para simular la topografía superficial en un mecanizado con torno, bajo condiciones de corte conocidas y bajo el efecto de retemblado [11]. La simulación del perfil se realiza considerando el efecto de la geometría de la punta de la herramienta y el efecto del desplazamiento sufrido por esta punta debido a la vibración asociada al retemblado. El efecto de la geometría de la herramienta en la topografía se representa como el resultado de la repetición de la punta de la herramienta de corte moviéndose a lo largo de la pieza a un valor de avance definido durante el proceso de torneado. A este perfil, definido por la punta de la herramienta, se le añade el efecto que causa la vibración $x_i(t)$ obtenida a partir de la solución de la ecuación (1). La posición $x_i(t)$ se calcula para un cierto valor de tiempo t , el cual será equivalente al tiempo que tarda la herramienta en realizar un avance o lo que es lo mismo, el tiempo que tarda el material en dar una vuelta. Luego, la generatriz de la topografía superficial será la huella por vuelta que genere la intersección geométrica herramienta-pieza. La posición de esta huella quedará definida por un sistema cartesiano plano en donde el movimiento en la dirección axial quedará determinado por el avance por vuelta y el movimiento normal al eje de giro (profundidad de corte dinámica) quedará definido por la función $x_i(t)$. Por último, el perfil definido será el resultado de la superposición de cada una de las huellas, tal como se muestra en la figura 2. El tratamiento de estas huellas es discreto, por lo tanto se forma por puntos cuya distancia en la dirección del avance es de $0.25 \mu\text{m}$.

La topografía superficial obtenida teóricamente se compara con la obtenida a nivel experimental para diferentes materiales. A partir de esta topografía superficial, tanto experimental como simulada, se calculan los parámetros de rugosidad Ra y Rt , y se generan los espectros de Fourier para las señales obtenidas. Los resultados de estas simulaciones y de los experimentos se encuentran en [11]. Estos resultados muestran como los perfiles de la topografía superficial

simulados presentan formas similares a los perfiles obtenidos a nivel experimental. Así mismo se encontró como los valores para Ra y Rt son similares tanto para el caso experimental como para la simulación. Otro aspecto que se comparó fueron los espectros de Fourier de cada una de las señales.

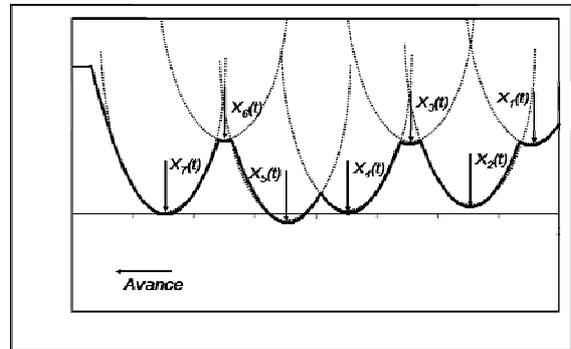


Figura 2. Topografía superficial simulada.

3. ESTUDIO DE LOS PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN A LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Con el modelo obtenido, se realiza un estudio de factores principales, utilizando una de las técnicas empleada en diseño de experimentos (DOE), con el propósito de determinar cuales son los parámetros de mecanizado o combinaciones de parámetros que más afectan a la rugosidad superficial. En este diseño de experimentos no se obtiene experimentalmente. Simplemente se hace el estudio de factores principales de un experimento de simulación numérica. Se propone el uso de esta técnica por la dificultad que se presenta para determinar esta información a partir del modelo, debido a su complejidad.

El estudio de factores principales se realiza para barras macizas de dos materiales: acero y latón. Se consideran seis factores, los cuales son: f , v_c , h_0 , α , m_{eq} y E (módulo de elasticidad). Para la aplicación de la técnica de diseño de experimentos, los factores se han hecho variar sobre un rango entre 90% y 110% de su valor. Se utilizaron las siguientes condiciones:

- Acero C45: diámetro 9.5 mm, longitud 100 mm (en voladizo); $f = 0,1$ mm/rev; $\alpha = 5^\circ$; $v_c = 1$ m/s; $E = 210$ GPa $h_0 = 0,00025$ m; decremento logarítmico = 0,0198.
- Latón: diámetro 8 mm, longitud 100 mm (en voladizo); $f = 0,05$ mm/rev; $v_c = 1$ m/s; $\alpha = 5^\circ$; $h_0 = 0,0005$ m; $E = 120$ GPa; decremento logarítmico = 0,0676.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el caso del acero, encontramos que el factor que afecta principalmente a Ra es la profundidad de corte, seguido por el módulo de elasticidad, el avance y la velocidad de corte (figura 3).

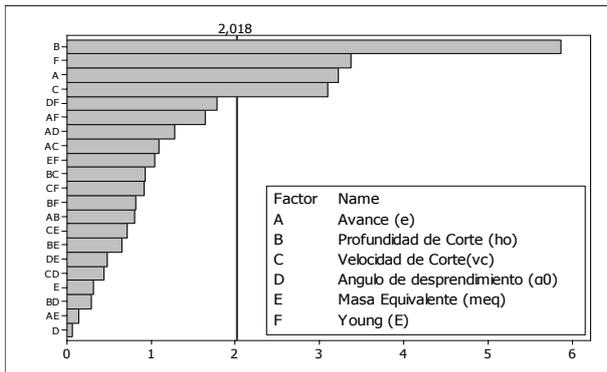


Figura 3. Factores que afectan rugosidad media Ra. Material: acero.

En la figura 4, se observa como, en el caso de la profundidad de corte, el valor de Ra aumenta a medida que la profundidad de corte aumenta. Este efecto se debe al hecho de que la fuerza ΔF_x que excita al sistema, está en función de la profundidad de corte (ecuación (2)), de tal manera que ΔF_x aumentará a medida que la profundidad de corte aumenta, haciendo que el efecto del retemblado sea mayor y por consiguiente se presente un valor mayor de rugosidad media Ra.

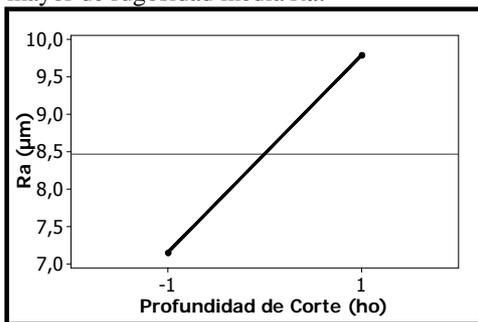


Figura 4. Efecto de la profundidad de corte sobre la rugosidad media Ra.

Un comportamiento similar se presenta para el avance (figura 5), ΔF_x es directamente proporcional al avance por revolución (ecuación (2)). En el caso del módulo de elasticidad (figura 6), el efecto es inverso: Ra es menor a medida que el módulo de elasticidad es mayor.

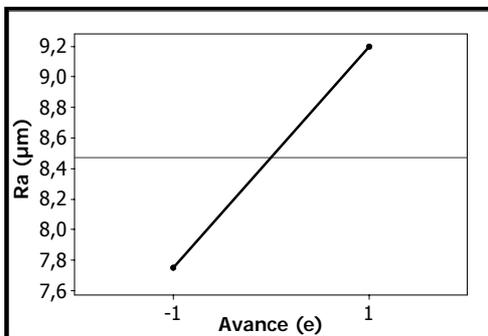


Figura 5. Efecto del avance sobre la rugosidad media Ra.

El módulo de elasticidad se utiliza en el modelo para el cálculo de la constante de rigidez, la cual crece a medida

de que el módulo de elasticidad se hace mayor. Si el material es más rígido, la amplitud de vibración será menor y por consiguiente la rugosidad superficial será más pequeña.

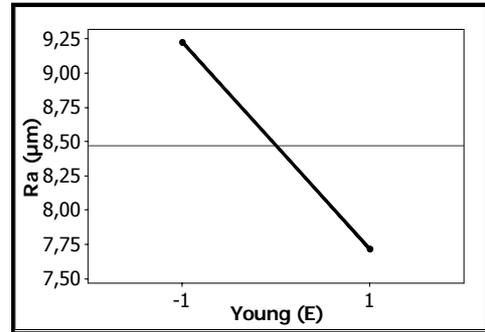


Figura 6. Efecto del módulo de elasticidad sobre la rugosidad media Ra.

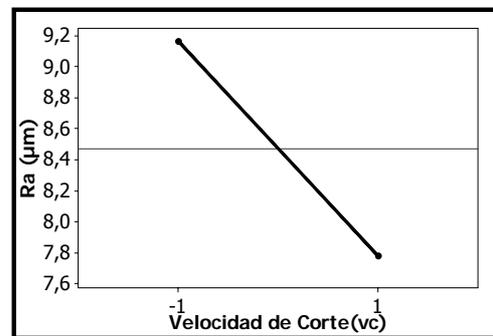


Figura 7. Efecto de la velocidad de corte sobre la rugosidad media Ra.

La sensibilidad del modelo a la velocidad de corte se puede ver en la figura 7. A medida que aumenta v_c , disminuye la rugosidad media Ra con lo cual el sistema es más estable. Al aumentar v_c , ΔF_x disminuye debido a que ΔF_x es inversamente proporcional a v_c , ver ecuación (2). En el caso de Rt, los factores que afectan son los mismos que para el caso de Ra: profundidad de corte, módulo de elasticidad, velocidad de corte y avance (figura 8). Igualmente, el efecto de estos factores, sobre Rt, observa el mismo comportamiento que para Ra.

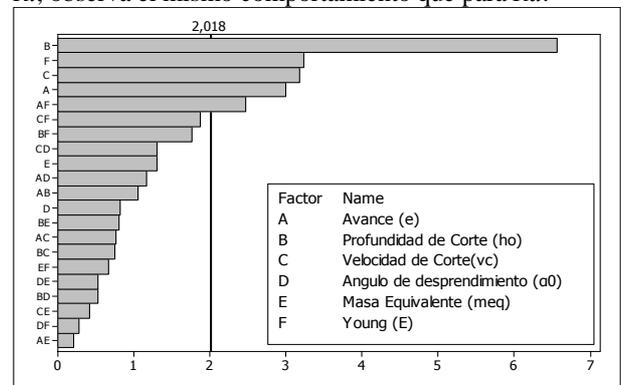


Figura 8. Factores que afectan la máxima distancia pico- valle Rt. Material: acero.

Además de los efectos principales mencionados, encontramos que el efecto cruzado entre el avance y el

módulo de elasticidad presenta una influencia significativa en R_t (figura 9). La influencia sobre R_t es mayor, cuando el avance es pequeño, ya que el valor de la fuerza de excitación será más pequeño y si el material es más rígido (módulo de elasticidad más grande), el valor R_t disminuye. En cambio, cuando el avance es mayor, el efecto del módulo de elasticidad es muy poco significativo sobre R_t y se puede considerar constante.

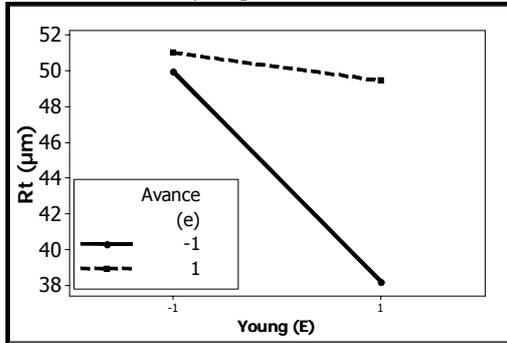


Figura 9. Efecto cruzado sobre R_t , entre el avance y el módulo de Elasticidad o Young. Material: Acero.

En el caso del latón, el factor que mayor influencia tiene sobre R_a es el avance, seguido por la profundidad de corte, la velocidad de corte y el módulo de elasticidad (figura 10). El efecto que tienen estos factores presenta el mismo comportamiento que para el acero (figuras 4,5, 6 y 7).

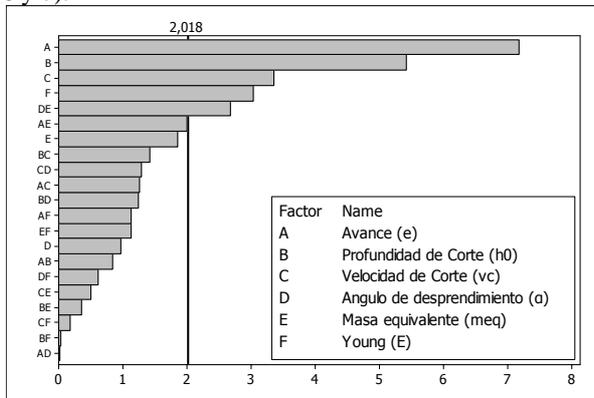


Figura 10. Factores que afectan la rugosidad media R_a . Material: latón.

Se presenta también un efecto cruzado entre el ángulo de desprendimiento de la herramienta y la masa equivalente (ver figura 11). Si el ángulo de desprendimiento es pequeño, R_a se puede considerar constante y por lo tanto no dependerá de la masa del sistema, en cambio si el ángulo es grande, la rugosidad media es sensiblemente dependiente de la masa equivalente. De hecho, R_a es inversamente proporcional a la masa equivalente si el ángulo de desprendimiento es grande. Esta situación tiene sentido físico, pues si en un sistema dinámico aumenta la masa, aumentará la inercia del sistema y la disipación de energía será mayor.

Al igual que sucede con R_a , podemos decir que el factor que más influye sobre R_t es el avance (figura 12). En

segundo lugar tendremos módulo de elasticidad y la profundidad de corte. Tanto para R_a como para R_t en el latón, el efecto de los factores sobre los parámetros de rugosidad presenta un comportamiento similar al caso del acero (figuras 4, 5, 6 y 7). Nuevamente se presenta el efecto cruzado entre el ángulo de desprendimiento y la masa equivalente (figura 13).

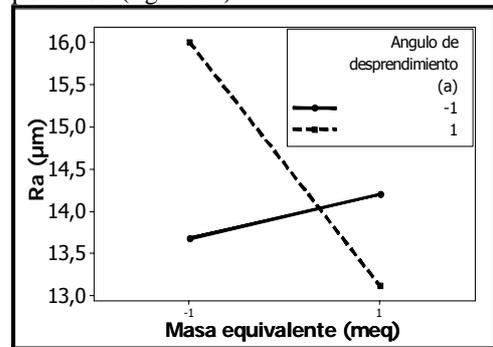


Figura 11. Efecto cruzado sobre R_a , entre el ángulo de desprendimiento y la masa equivalente. Material: latón.

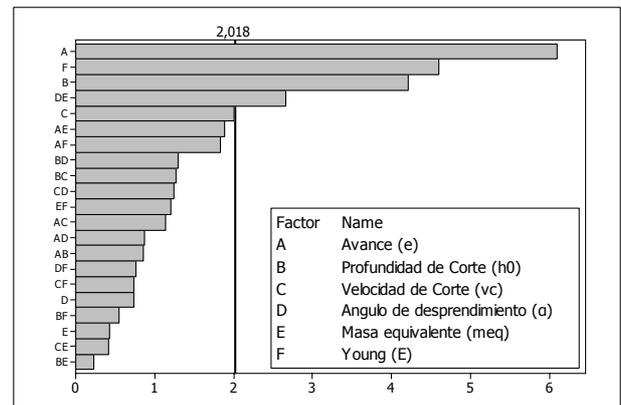


Figura 12. Factores que afectan la máxima distancia pico-valle R_t . Material: Latón.

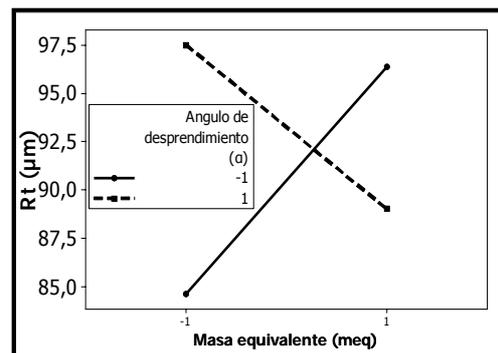


Figura 13. Efecto cruzado sobre R_t , entre el ángulo de desprendimiento y la masa equivalente. Material: Latón.

Dentro del estudio realizado, se ha encontrado que en ninguno de los casos aparece el ángulo de desprendimiento de la herramienta como un parámetro que influya de manera significativa sobre la rugosidad superficial. Otro de los resultados de este estudio es que se ha encontrado que para el acero el factor más

importante es la profundidad de corte, pero para el latón es el avance. Este comportamiento puede deberse, probablemente, a que la magnitud de la fuerza de corte para el latón es menor que la magnitud de la fuerza de corte en el acero, para un mismo avance y una misma profundidad de corte. En general el latón es un material más blando que el acero y su esfuerzo real de rotura S_f es 0.6 veces S_f del acero [11].

En general se puede predecir que la rugosidad media Ra y la distancia máxima pico-valle Rt , aumenta a medida que aumenta la profundidad de corte o el avance, en cambio Ra y Rt disminuyen a medida que aumenta la velocidad de corte (v_c). Estos resultados coinciden por los obtenidos por Suresh y otros [15], quienes encuentran que la rugosidad superficial disminuye cuando la velocidad de corte aumenta, y que la rugosidad superficial disminuye cuando disminuye el avance. De forma análoga, estos resultados coinciden con el trabajo de Lin y otros [16], quienes determinan que los factores más importantes que afectan a la fuerza de corte son el avance y la profundidad de corte. En [16] se encuentra además que la velocidad de corte (v_c), es un factor menos importante para la rugosidad superficial en comparación con el avance, situación que también se ve reflejada en el presente trabajo. De acuerdo con estos resultados se puede determinar que para obtener una buena rugosidad superficial, es necesario minimizar los valores de avance y profundidad de corte y maximizar los valores de la velocidad de corte.

5. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de factores principales que afectan a la rugosidad superficial utilizando la señal de topografía superficial simulada a partir de un modelo teórico. Del estudio se puede concluir que las condiciones de operación que más influyen sobre la rugosidad superficial en mecanizado de piezas esbeltas en torno son la profundidad de corte y el avance. Se puede concluir también que la velocidad de corte, para los valores considerados, es un parámetro que tiene menor influencia sobre la rugosidad superficial que la profundidad de corte y el avance.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Deshpande, M.S. Fofana. "Nonlinear regenerative chatter in turning", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 17, pp.107-112, 2001.
- [2] G. Litak. "Chaotic vibrations in a regenerative cutting process", *Chaos, Solitons and Fractals* 13, pp. 1531-1535, 2002.
- [3] J. Lipski, G. Litak, R. Rusinek, K. Szabelski, A. Teter, J. Warminski, and K. Zaleski. "Surface quality of a work material's influence on the vibrations of the cutting process". *Journal of Sound and Vibrations* 252(4), pp. 729-737, 2002.
- [4] A. Moufki, A. Devillez, M. Segreti y D. Dudzinski, "A semi-analytical model of non-linear vibrations in orthogonal cutting and experimental validation", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol. 46 n°3-4, pp. 436-449, 2006.
- [5] Chandiramani N.K. y T. Pótala, (2006) "Dynamics of 2-dof regenerative chatter during turning" en *Journal Sound and Vibration* 290, pp. 448-464.
- [6] L.Vela-Martínez, J.C. Jáuregui-Correa, E. Rubio-Cerda, G. Herrera-Ruiz y A. Lozano-Guzmán, "Analysis of compliance between the cutting tool and the workpiece on the stability of a turning process" en *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48, pp. 1054-1062, 2008.
- [7] R. Mahdavinejad, "Finite element análisis of machina and workpiece instability in turning", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, pp. 753-760, 2005.
- [8] A.V. Dassanayake y C. S. Suh, "On nonlinear cutting response and tool chatter in turning operation", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 13, pp. 979-1001, 2008.
- [9] M.S.Fofana, "Sufficient conditions for the stability of single and multiple regenerative chatter", *Chaos, Solitons and Fractals* 14, pp. 335-347, 2002.
- [10] S.C.Lin, M.F. Chang. "A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 38, pp. 763-782, 1998.
- [11] H.A. González, V. Kallewaard, J. Vivancos. "Predictive model of the surface topography obtained by turning under self-excitation chatter vibration", *Machining Science and Technology An international Journal* (enviado para revisión).
- [12] A. Toropov, S-L. Ko, "Prediction of tool-chip contact length a new slip-line solution for orthogonal cutting", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, pp. 1209-1215, 2003.
- [13] A. Toropov, S-L. Ko, "Determination of stress state in chip formation zone by central slip-line field", *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering* 4, pp. 1-4, 2003.
- [14] H.A. González, J. Vivancos, V. Kallewaard, "Theoretical approximation of the vibration in a regenerative cutting process", presentado en: 10th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology", TMT 2006, Lloret de Mar, Barcelona, España. p. 77-80.
- [15] P.V.S. Suresh, R.P. Venkateswara, S.G. Deshmukh. "A Genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42(6), pp. 675-680, 2002.
- [16] W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L.Wu. "Modeling the surface and cutting force for turning", *Journal of Materials Processing Technology* 108(3), pp.286-293, 2001.