

IMPORTANCIA FUNDAMENTAL DE LA VELOCIDAD DE CORTE PARA LOS PROCESOS DE MECANIZADO Y RECTIFICADO EN LA INDUSTRIA MANUFACTURERA METALMECÁNICA

Data de aceite: 03/04/2023

Jayanta Banerjee

Departamento de Ingeniería Mecánica,
Universidad de Puerto Rico en Mayagüez
(UPRM), Puerto Rico

XV Congreso Ibero-americano de Engenharia
Mecânica Madrid, España, 22-24 de noviembre
de 2022

RESUMEN: La presente ponencia demuestra, tanto analíticamente como por los experimentos de laboratorio, que la velocidad de corte es el parámetro fundamental el cual afecta todas otras variables en los procesos con el arranque de virutas, tales como el mecanizado y el rectificado. Por ejemplo, tanto la tasa de remoción del material como la potencia consumida durante el arranque de virutas mantienen las relaciones directas con la velocidad de corte. También, según la teoría de Taylor, la vida útil de la herramienta de corte depende directamente de la velocidad de corte. Además, la velocidad de corte controla la fricción, el calor y, por lo tanto, la expansión térmica de las superficies de contacto entre la pieza, la herramienta y la viruta. Todos estos factores arriba

mencionados son directamente relacionados con la velocidad de corte y afectan el tiempo y el costo de una serie de productos finales en una fábrica metalmeccánica de la producción masiva. En resumen, el presente trabajo analiza las variables *determinísticas*, tales como la superficie acabada del producto final, el consumo de potencia, la tasa del arranque de viruta, el uso de lubricantes y refrigerantes, etc., las cuales están afectadas por la velocidad de corte. Además, se observan algunos efectos de la vibración maquinaria, el traqueteo (*chatter*) y el filo adicional o la “falsa cuchilla” (*built-up Edge*” BUE), etc. que producen grietas y marcas de quemadura sobre la superficie del producto final.

PALABRAS CLAVE: Potencia de corte, superficie acabada, tasa del arranque de material, fluidos de corte.

ABSTRACT: The present paper shows, both analytically and with laboratory experiments, that the cutting speed is the fundamental parameter that affects all other variables in the material removal processes, such as, machining and grinding. For example, the material removal rate as well as the power consumed during material removal are in direct relationship with the

cutting speed. Also, according to the theory of Taylor, the tool life depends directly on the cutting speed. Besides, the cutting speed controls friction, heat, and the thermal expansion of the surfaces of contact between the workpiece, the tool, and the chip. All the above-mentioned factors are directly related to the cutting speed, and hence affect the time and the cost of a batch of final products in a metalworking factory of mass production. In sum, the present work analyzes the *deterministic* variables, such as, the surface finish of the final product, the power consumption, the material removal rate, the use of lubricants and coolants, etc. that are affected by the cutting speed. Besides, some of the effects of machinery vibration, chattering, formation of built-up edge etc. that produce cracks and burn marks on the surface of the final product are discussed.

KEYWORDS: Cutting power, surface finish, materials removal rate, cutting fluids.

1 | INTRODUCCIÓN

Considerando el proceso de arranque de virutas en mecanizado, como torneado, fresado, taladrado, etc. y en rectificado y otros procesos abrasivos, conjuntamente como un “sistema cerrado”, las “entradas” fundamentales de este sistema son la fuerza de corte y la velocidad de corte. Multiplicando estos dos parámetros, se consigue directamente la potencia de corte. Las “salidas” esenciales del mismo sistema son la rugosidad superficial y la tolerancia dimensional del producto final. Las “pérdidas” del sistema son el volumen de virutas arrancadas y los productos finales rechazados debido a varios defectos ocurridos durante el proceso, tales como las dimensiones y las formas fuera de sus límites de tolerancia, formación de grietas en superficies y subsuperficies del producto final, quemaduras sobre la superficie por el calor concentrado y las marcas de “traqueteo” (*chatter*) por las vibraciones maquinarias. La Figura 1 muestra un tal sistema del proceso de arranque de virutas señalando algunas de las variables arriba mencionadas.

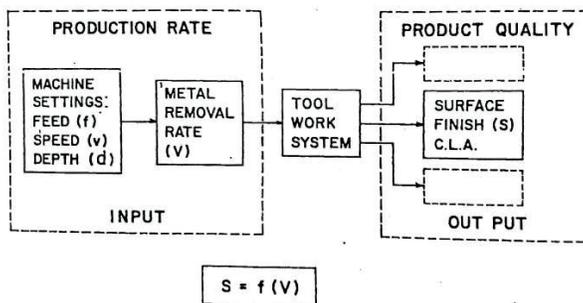


Figura 1. Entradas y salidas de un sistema de manufactura con el arranque de virutas como mecanizado, rectificado y otros procesos abrasivos

2 I EL ANÁLISIS DE ALGUNOS PARÁMETROS ESENCIALES EN MECANIZADO Y RECTIFICADO

2.1 La tasa del arranque de viruta: una “entrada” al sistema de mecanizado y rectificado

En un caso sencillo como torneado una superficie cilíndrica, la tasa del arranque de virutas puede expresarse en una forma sencilla como:

$$V = v \cdot f \cdot d \quad (1)$$

siendo V el volumen de viruta que se arranca en un minuto (mm cúbico/minuto); v la velocidad de corte en mm/minuto (puede cambiarse a metro/minuto, dividiendo por 1000); f el avance de la herramienta (cuchilla) por cada rotación de la pieza cilíndrica (mm/rotación de pieza); d la penetración de la cuchilla por cada pasada (mm). La configuración del conjunto de la pieza de trabajo (*workpiece*), la formación de viruta, la superficie acabada del producto final y el círculo de fuerzas en el filo de corte se muestran en la Figura 2.

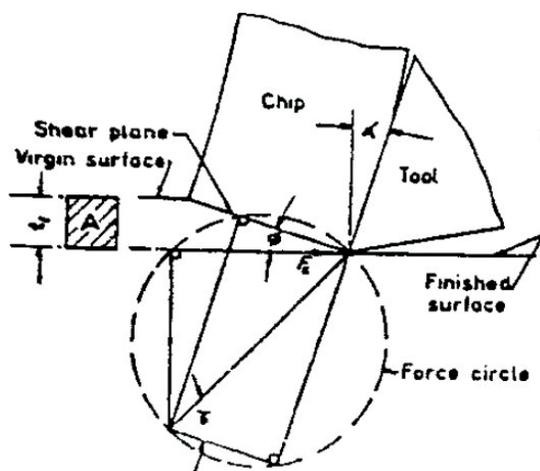


Figura 2. El conjunto de pieza, herramienta y viruta

El margen superior del artículo debe ser de 2,0 cm, todos los demás (inferior, izquierdo, derecho) deben ser de 2,5 cm. Se debe usar un interlineado sencillo (1,0). El cuerpo del artículo debe estar diagramado a dos columnas de 8 cm de ancho y 0,59 cm de espaciado.

2.2 La superficie acabada/terminada del producto final: una “salida” del sistema de mecanizado y rectificado

En Figura 3, se muestra un ejemplo de los experimentos conducidos en un torno horizontal con piezas cilíndricas, usando dos tipos de acero dulce SAE AISI 1020 y SAE AISI

1116 (según las normas de ASTM de EE. UU.). Los resultados experimentales demuestran una relación logarítmica entre la tasa de arranque de material, V , y la superficie acabada del producto final, S (en micrómetro y micro pulgada). Algébricamente, entonces,

$$S = m \log V + C \quad (2)$$

siendo m y C las constantes de la relación.

Durante estos ensayos se ha tomado un rango de cinco velocidades de corte, entre 2.54 m/min. y 25.4 m/min., que es una amplitud de 10 veces entra la velocidad mínima y la máxima. La tendencia de la relación logarítmica se mantiene la misma, tal como se ve en Figura 3, para las dos clases de acero dulce. Las dimensiones de las piezas cilíndricas fueron 30 mm de diámetro y 300 mm de longitud, y no se observó ningún tipo de flexión, pandeo o abarillamiento (*barreling*) de la pieza por la fuerza de corte durante el arranque de virutas.

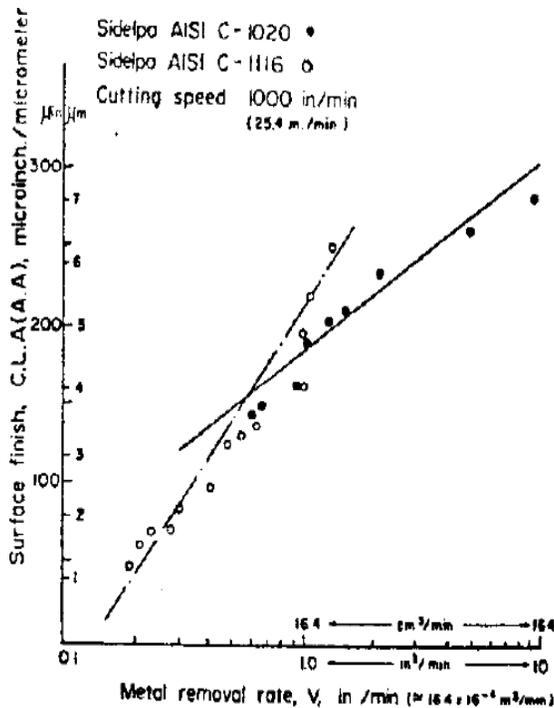


Figura 3. El acabado superficial del producto final como una función logarítmica de la tasa de arranque de material

En la ecuación (1), la variable más amplia en su rango y la más controlable es v , la velocidad de corte. Mayormente, las demás variables como el avance de la cuchilla, f , y su penetración, d , no tienen la misma amplitud de aplicación como la de la velocidad de corte, v , especialmente en las máquinas herramientas de CNC (Control Numérico

Computarizado) , las cuales se utilizan casi siempre en la producción masiva en las industrias metalmeccánicas. Cabe mencionar que en los ensayos arriba mencionados de torneado no se ha utilizado ningún fluido de corte, sea lubricante o refrigerante (*coolant*), porque todos los tres parámetros fundamentales de corte, v , f y d fueron dentro de un rango de magnitudes bajas y no hacía falta fluidos de corte para las piezas de acero dulce como AISI 1020.

2.3 El efecto de la velocidad de corte sobre la potencia de corte y la rugosidad superficial del producto final (usando fluidos de corte)

Nuevamente, en algunos ensayos de relativamente alta velocidad se han usado: (1) un fluido de corte en base de una emulsión (mezclas de 50% de aceite de motor W40 en agua; y (2) con un aditivo de disulfuro de molibdeno (MoS₂) en la misma mezcla. Se han usado dos diferentes velocidades de corte: 20 m/min. y 50 m/min. Durante los experimentos, se ha usado un vatímetro trifásico para medir la potencia y un rugosímetro “*Surf-indicator*” para medir la rugosidad de superficie del producto final.

Figura 4 indica significativamente menos consumo de potencia, P_c (kW), tanto para la emulsión *Taladrina* como para el aditivo *Molyven*, comparando con el corte seco y para la misma tasa del arranque de virutas, V (la coordinada horizontal). Esta misma tendencia se observa para dos diferentes velocidades de corte, 20 m/min. y 50 m/min.

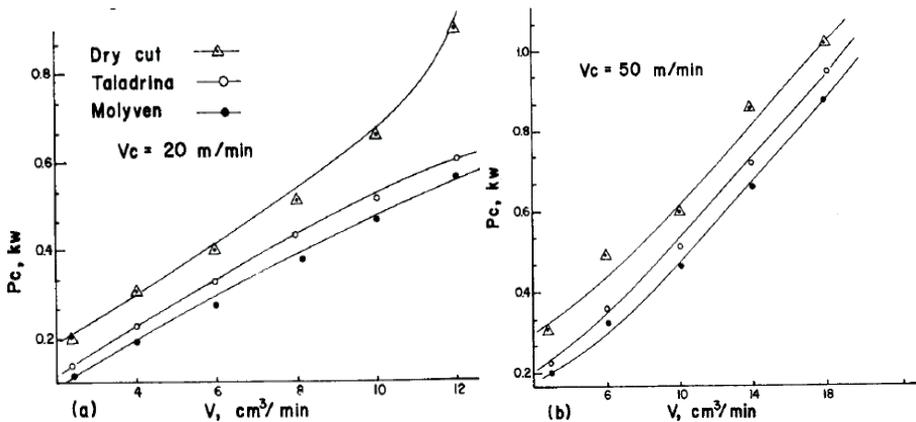


Figura 4. Potencia de corte vs. Tasa de arranque de material para dos diferentes velocidades de corte

Semejantemente, en Figura 5, se observa la misma tendencia en cuanto a la rugosidad de la superficie terminada del producto final, tanto para la velocidad de corte 20 m/min. como la de 50 m/min. La rugosidad de la superficie final se mejoró significativamente con ambos fluidos de corte, tratando de llegar a un valor constante dentro de un rango de la tasa de remoción de virutas V . Dicho rango es por encima de 10 cubic centímetro por minuto para la velocidad de corte 50m/min. y 20 cubic centímetro por minuto para la

velocidad de corte 20m/min.

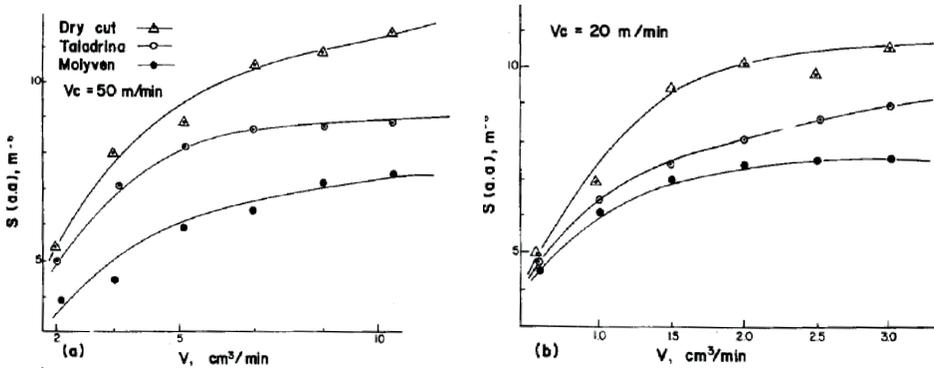


Figura 5. El acabado superficial del producto final vs. la tasa del arranque de material para las dos velocidades de corte, 20 m/min. y 50 m/min.

2.4 El caso de rectificado: el esmeril (la rueda rectificadora) es una herramienta “Estadística”

En el caso de un esmeril o una rueda rectificadora, cada grano es una herramienta de corte con uno o varios filos de corte para arrancar una viruta o varias virutas. No tiene una geometría determinada, no como en el caso de una broca (barrena) de taladro, una fresa de la máquina fresadora o un cuchillo para tornean. Por eso, el proceso de rectificado o cualquier otro proceso con granos abrasivos, se llama “Mecanizado Estadístico o estocástico” porque la formación y el arranque de las virutas son muy aleatorios. Sin embargo, en Figura 6 se indica la distribución de fuerzas sobre un grano cortante en una rueda esmeril (rectificadora). Esto asemeja con la Figura 2 para la distribución de fuerzas en mecanizado con las herramientas de corte de geometría determinística como el caso de un torno, una fresadora o un taladro.

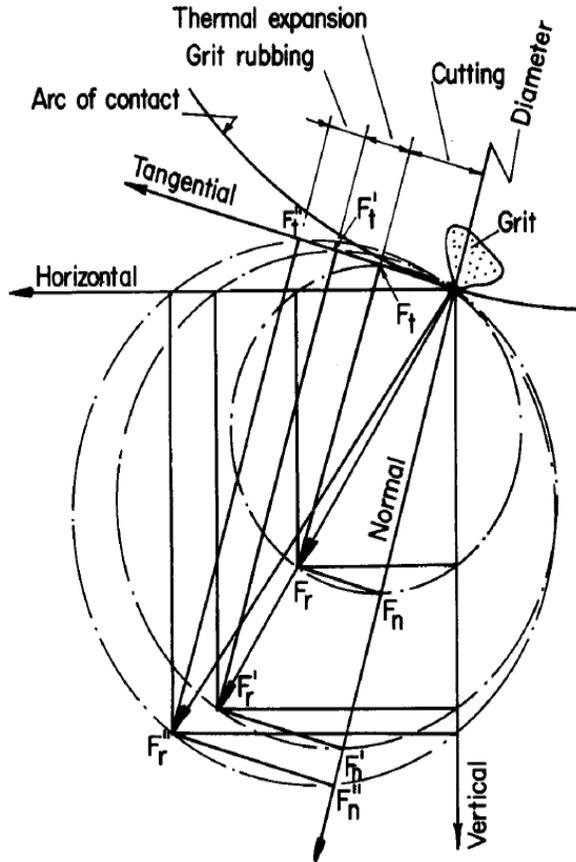


Figura. 6. La distribución de fuerzas sobre un grano de corte en una rueda rectificadora

En un experimento de rectificar la superficie plana de una pieza de acero inoxidable con un fluido de corte (una emulsión de 50% aceite W40 y 50% agua, igual que en el caso de mecanizado en Figuras 4 y 5), se observa en Figura 7 que la fuerza resultante se mantiene una relación lineal con la tasa de arranque del material de la pieza: $v.d.f$. En esta figura, V es la velocidad tangencial de la rueda esmeril que equivale a la velocidad de corte. Si la velocidad de corte se mantiene constante durante una pasada, entonces la potencia de corte, P_c mantendría también una relación lineal con la tasa del arranque de virutas. Por lo tanto, varios parámetros del rectificado se pueden evaluar *determinísticamente*, igual que en el caso de mecanizado, a pesar de la forma, tamaño y orientación de sus granos cortantes son aleatorios.

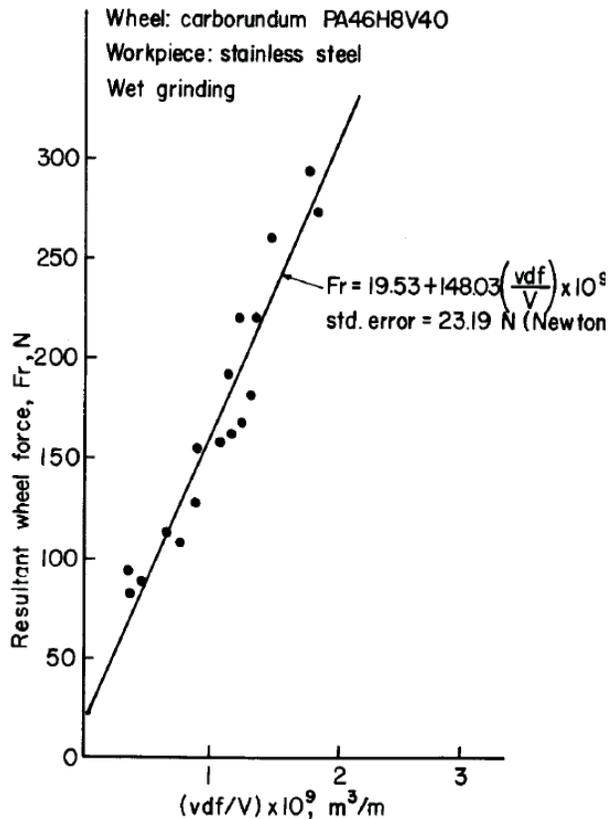


Figura 7. La fuerza resultante vs. la tasa de arranque del material en un rectificado de la superficie plana

2.5 Las variables incógnitas: Efectos de temperatura y la vibración maquinaria

En cualquier proceso de manufactura metalmecánica las variables difíciles de controlar determinísticamente son el calor acumulado dentro de las superficies de contacto, y, en consecuencia, la expansión térmica localizada, el desgaste y la vibración autogenerada de la máquina herramienta. Estos producen los daños por el traqueteo (*chatter*) sobre la superficie del producto final. Figura 8 muestra el alza de temperatura en el centro de una pieza plana debido a la expansión térmica y el consiguiente aumento de la fuerza en cada pasada sucesiva.

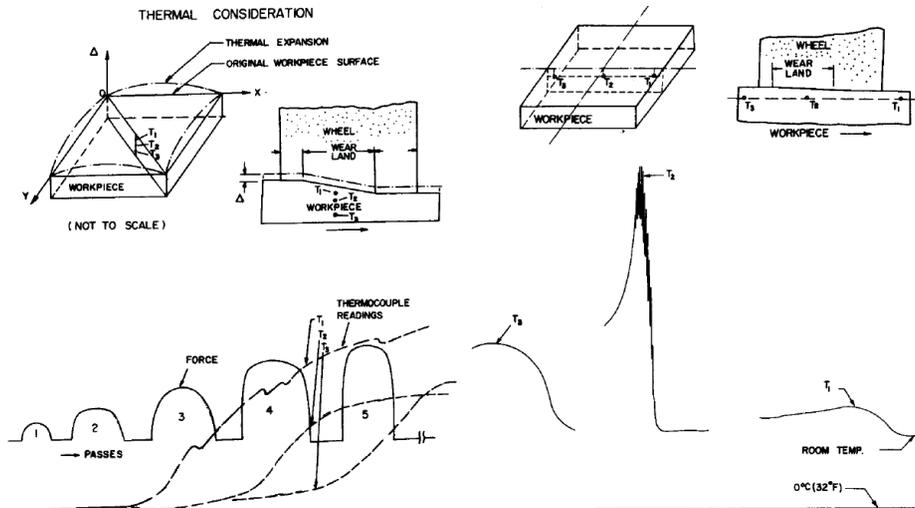


Figura 8. Efectos termales sobre la fuerza de corte

Figura 9 muestra las ondas de traqueteo sobre la pieza en la misma dirección de la velocidad de corte (la dirección del movimiento longitudinal de la mesa de la máquina rectificadora horizontal). También Figura 9 muestra el ciclo de la fluctuación de fuerzas, tanto la vertical como la horizontal, debido al impacto de traqueteo.

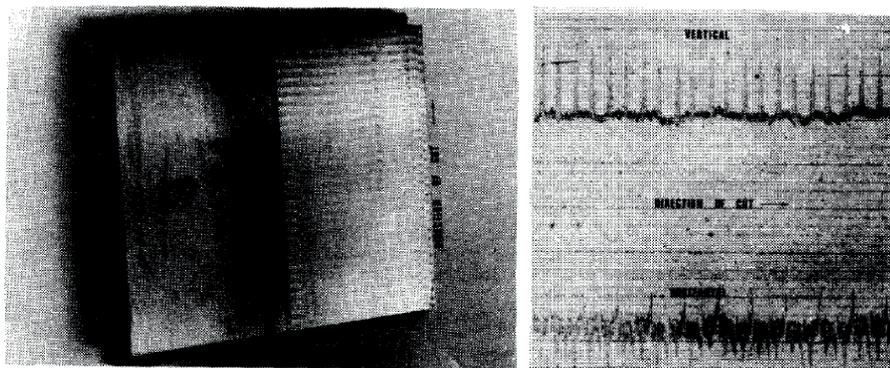


Figura 9. El efecto de traqueteo (chatter) sobre la superficie de y el aumento de fuerzas por el impacto

Figura 10 muestra la red de grietas sobre la superficie de una pieza de acero inoxidable. Son termo-grietas causadas por el calor acumulado y atrapado entre la pieza y la rueda esmeril.



Figura 10. La red de termo-grietas sobre la superficie del producto final

Mientras aumenta la velocidad de corte disminuye la vida útil de la herramienta, según los estudios y la muy conocida ecuación de Taylor. Sin embargo, muy baja velocidad de corte produce la “falsa cuchilla” o un filo adicional frente al principal filo cortante de la herramienta. En consecuencia, esto deteriora la superficie acabada del producto final por la debida acumulación del material en una forma irregular. Figura 11, tomada de la pantalla óptica del microscópico “*shadowgraph*”, muestra tal acumulación del material adicional como “secondary Hill” (loma secundaria) en ambos lados de una rugosidad normal de la superficie acabada.

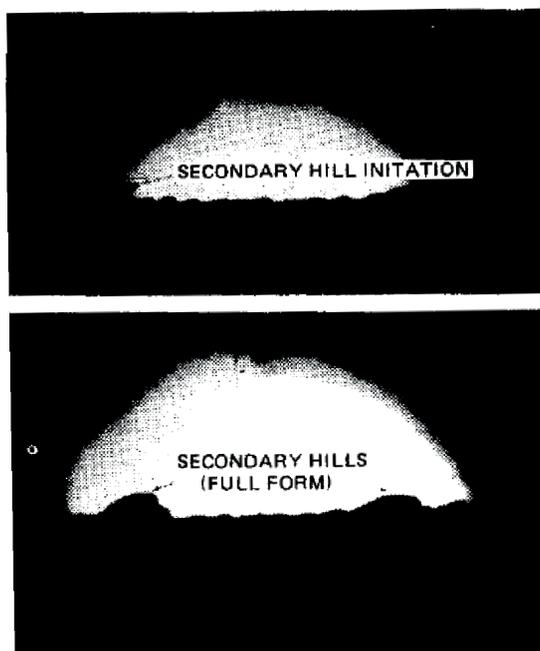


Figura 11. Formación de la “Loma Secundaria” (Secondary Hill) sobre la superficie acabada

2.6 Conclusiones

En base a las observaciones, tanto teóricas como experimentales arriba mencionadas, se puede comentar que la velocidad de corte predomina como un parámetro fundamental en los procesos de remoción del material, sean determinísticos como torneado, fresado, taladrado, etc. (mecanizado) o los procesos aleatorios con los granos abrasivos (rectificado, o cualquier otro proceso de la geometría de corte irregular).

La velocidad de corte es la variable principal para aumentar la tasa de arranque del material, o para disminuir el desgaste de herramienta y aumentar su vida útil (según la muy conocida ecuación de Taylor). Además, la velocidad de corte controla el calor atrapado entre las superficies en contacto de la pieza, herramienta y viruta. Esto afecta directamente la expansión térmica localizada produciendo termo-grietas y marcas de traqueteo sobre las superficies del producto final.

La velocidad de corte cuando inadecuada es la causante de la formación de “Falsa Cuchilla” o un filo adicional frente al principal filo cortante. Esto produce el acabado superficial del producto final muy irregular.

Todos los factores arriba mencionados, esencialmente controlados por la velocidad de corte, afectan directamente el costo de manufactura de cada componente. Por lo tanto, la *optimización* de la velocidad de corte es la próxima etapa de este estudio en continuación.

AGRADECIMIENTO

Agradezco la ayuda del Ing. José Santiago en formatear las figuras de esta ponencia.

REFERENCIAS

[1] M.C. Shaw. Metal Cutting Principles (2nd edition), Oxford University Press, New York, Chapter 3, pp. 16-26, 2005.

[2] J. Banerjee. “Fundamental parameters of plasticity for the design of products in mass scale manufacturing in metalworking industries”. Proceedings of the Mechanics and Materials in Design (M2D) International Conference, pp. 203 - 204 , 2022, Madeira, Portugal.

[3] M.C. Arteaga, J. Valvedre-Bastides, L. Picha- Quishpe. “ Determinación del tiempo de vida del inserto CNMG 12 04 08 PM4325---. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM), 2019, Cartagena, Colombia.

[4] J. Banerjee, A. D. Cintrón. “Optimization of energy consumption and workpiece surface quality in material removal type manufacturing processes”. 18th Scientific Convention of Engineering and Architecture, 2016, Havana, Cuba.

[5] Z. Jurcovic, V. Mendic, B. Tadic, D. Purkovic. “Implimentation of modeling and optimization methods in manufacturing processes”. Proceedings of the International Scientific-Expert Conference on Maintenance and Production Engineering (KODIP), pp. 19 – 26, 2011, Herceg Novi, Serbia.

[6] J. Banerjee. “The onset of plastic instability as a criterion for useful deformation in manufacturing processes”, Integrity, Reliability and Failure (IRF) International Conference, 2020, Porto, Portugal.

[7] J. Banerjee, R. Montosa, A. Pulliza. “Specific cutting energy and other parameters related to machining of composites: effects of friction and lubrication”. World Tribology Congress III, 2005, Washington, D.C., USA.

[4] E. Henríquez, M.I. Zepeda. “Elaboración de un artículo científico de investigación”. Ciencia y Enfermería, vol. X, n.º 1, pp. 17-21, 2004 [en línea]. Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/cienf/v10n1/art03.pdf>