

Influencia del ángulo de incidencia en el retemblado en procesos de torneado

Pedro Corral E., José Galdames R. y René Valdenegro O.

RESUMEN: El presente trabajo estudia el fenómeno del retemblado en un proceso de corte de metal. El efecto del roce entre la herramienta de corte y el material de trabajo es parcialmente explicado utilizando un modelo matemático. La influencia del ángulo de incidencia de la herramienta en el proceso de corte de metal es analizada experimentalmente a través de diagramas de estabilidad.

SUMMARY: This paper studies the chatter phenomena in the metal cutting. The effect of the friction between the cutting tool and the working material is partially explained by using a mathematical model. The influence of the clearance angle of the tool in the cutting process is analyzed experimentally in a parallel lathe by using stability diagrams.

INTRODUCCIÓN

La fuerte competencia existente en el mercado actual y el acelerado desarrollo tecnológico de las últimas décadas, ha obligado a las distintas industrias y muy especialmente a la metalmecánica a racionalizar y optimizar el uso de todos sus recursos productivos, de tal manera de obtener productos de alta calidad y a bajos costos. De esta forma se alcanzan precios competitivos y otras ventajas comparativas. El no adaptarse a estos desarrollos conducirá inexorablemente, en un plazo no muy lejano, a la pérdida de la competitividad de la industria metalmecánica, con todas las consecuencias económicas y sociales que significa.

Dentro del contexto anterior, un importante sector de la producción es la fabricación con arranque de viruta. Es por las razones señaladas que se hace absolutamente necesario investigar y estudiar aquellos aspectos tecnológicos y económicos que involucren los procesos de fabricación con arranque de viruta y que aún no se encuentra definido o solamente se han alcanzado niveles de conocimientos parciales.

Para hacer un análisis sistemático de todos los aspectos más generales que se pueden estudiar, en la Figura 1 se presenta un diagrama de bloque, el cual ilustra todas las variables que deben considerarse en los procesos con arranque de viruta en sus distintas etapas.

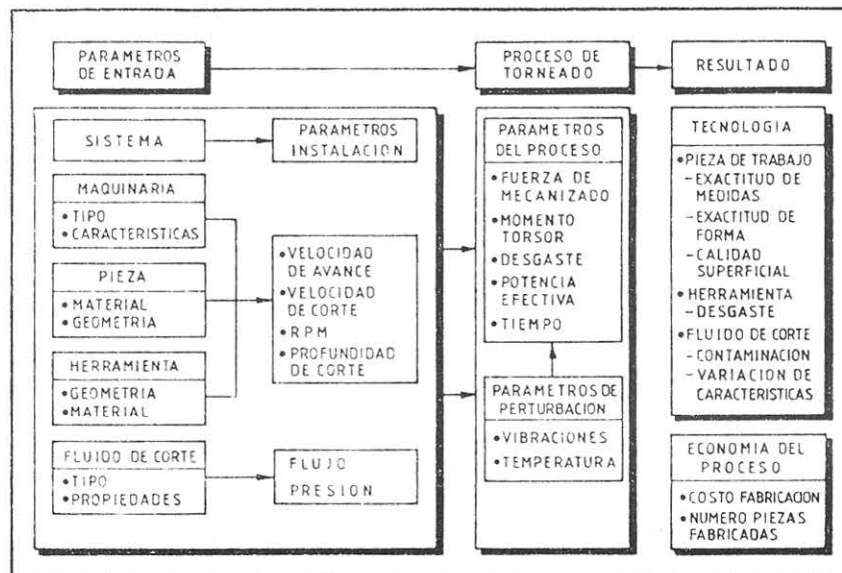


Figura 1. Diagrama de bloque de un proceso de mecanizado y sus parámetros de entrada y salida.

De la Figura 1, se desprende que estos procesos pueden ser descompuestos en cuatro subsistemas básicos, los cuales a través de su interacción dinámica dan lugar a la formación de viruta. Además, de acuerdo a las características de cada uno de estos subsistemas, es posible definir las condiciones de corte o parámetros de instalación, los cuales influyen directamente en el desarrollo de los parámetros del proceso (fuerzas de mecanizado, potencia, temperatura, vibraciones). En relación a estos parámetros, las vibraciones en particular provocan una acción perturbadora durante el desarrollo del proceso mismo, fundamentalmente las vibraciones autoexcitadas, es por ello que este fenómeno tiene gran importancia debido a que incide directa y negativamente en los resultados del proceso, tanto desde el punto de vista tecnológico y fundamentalmente en lo económico. Estas razones son lo suficientemente fuertes para justificar una investigación que entregue los elementos de análisis que permitan disminuir las vibraciones autoexcitadas.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El límite de estabilidad dinámica en los procesos de mecanizado con arranque de viruta (llámese torneado, fresado, etc.) limitan principalmente los índices productivos, los aspectos relacionados con la calidad de las piezas obtenidas, exactitud de forma y medida, rugosidad y la vida útil que puede alcanzar la herramienta de corte.

Métodos y modelos adecuados para predecir los límites de estabilidad son raramente usados, de manera industrial, por su alta complejidad.

Para grandes volúmenes de producción las condiciones de estabilidad pueden ser obtenidas a través de ensayos experimentales, pero en pequeños lotes y/o producción automática, se ve también la necesidad de eliminar las vibraciones autoexcitadas para alcanzar condiciones de estabilidad.

Un método usado comúnmente en la industria metalmeccánica es el de reducir la velocidad de corte para eliminar el fenómeno, pero trae como resultado el tener que sacrificar condiciones óptimas de mecanizado, con la consecuente subutilización de la Máquina-Herramienta y de las herramientas de corte, con los resultados económicos negativos que esto significa. Es importante señalar que el método de disminuir la velocidad no resulta aplicable en sistemas de fabricación con estrechos márgenes de variabilidad de los tiempos, como es la característica de los S.M.F. (Sistemas de Manufactura Flexible).

Una alternativa distinta que permite alcanzar un proceso estable, es controlar la geometría de la herramienta [1] que resulta más factible que intentar mejorar otras variables, como son la rigidez y el amortiguamiento estructural. El modelo matemático que se utiliza para explicar el fenómeno vibratorio que ocurre durante un proceso dinámico de corte de metal, se presenta en el desarrollo teórico [3].

DESARROLLO TEÓRICO

La dinámica de las máquinas-herramientas, conjuntamente con el fenómeno de retemblado, son sin duda importantes desafíos en la investigación del corte de metal, no sólo por lo complejo que significa un estudio de este tipo, sino también porque, alcanzar soluciones que permitan un control de los fenómenos, significan importantes mejoras en todos los aspectos productivos señalados anteriormente.

En los últimos treinta años un gran número de investigadores han trabajado en distintos modelos para predecir el comportamiento dinámico en un proceso de corte de metal. Si bien han alcanzado importantes avances, no han logrado establecer un modelo que signifique una solución integral de todas las variables dinámicas que intervienen en el proceso de corte de metal [5].

Existen tres fenómenos básicos asociados al retemblado en los procesos de corte de metal y que son:

- El efecto dependiente de la velocidad.
- El efecto regenerativo.
- Los modos de acoplamiento.

El efecto dependiente de la velocidad se debe al fenómeno autoinducido basado en la pendiente negativa que se presenta al variar la fuerza de corte con respecto a la velocidad de corte, lo que establece una inestabilidad dinámica, debido a que las diferencias de magnitudes promedio de las fuerzas de corte provoca que la energía neta sea suministrada dentro del sistema.

Por su parte, el efecto regenerativo es causado por la sobreposición de ondas en el movimiento de la herramienta y la superficie de trabajo durante cortes sucesivos.

Finalmente, el efecto de los modos de acoplamiento ocurre cuando los principales modos naturales del sistema vibran próximo uno del otro, debido a la variación continua de la fuerza de corte durante la formación de viruta (frecuencia de formación de viruta).

Los tres fenómenos señalados anteriormente no actúan en forma independiente, sino más bien en forma asociada. En un proceso de corte normal, los tres fenómenos que ocasionan el retemblado ocurren de manera simultánea en el sistema. Se puede señalar que no existen en la actualidad teorías con respecto al retemblado que sean capaces de explicar todos los fenómenos que se desarrollan en un proceso de corte de metal.

Un sistema de corte dinámico puede ser modelado como un sistema masa-resorte-amortiguador, con dos grados de libertad, el cual se describe a través del esquema de la Figura 2.

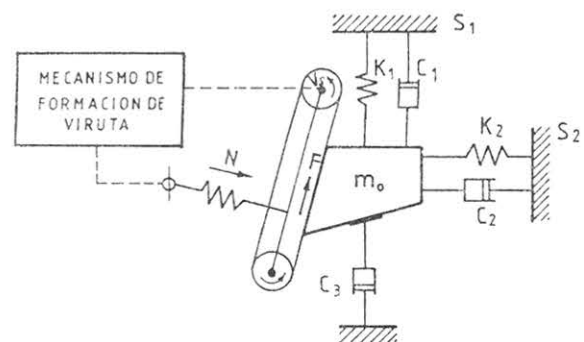


Figura 2. Modelo de un sistema de corte dinámico.

En la figura la masa " m_0 " representa la herramienta de corte unida a la máquina a través de los resortes " K_1 " y " K_2 " y por los amortiguadores " C_1 " y " C_2 ". Mediante la correa sin fin se simula el movimiento de la viruta que se mueve con velocidad variable " v_s " y es presionada contra la masa " m_0 " por un resorte que ejerce una fuerza restauradora

"N". Esta fuerza restauradora induce a su vez una fuerza de roce "F", entre la correa y la masa.

El mecanismo de fricción inducido entre correa-masa se conoce como sistema de vibración autoinducida, el cual, debido a la diferencia entre los valores del coeficiente de roce estático y dinámico, se comporta como si existiera un amortiguamiento negativo. Esto ocasiona una excitación de la herramienta de corte y aumenta la amplitud de la vibración. Una vez que la amplitud de la vibración alcanza un valor crítico el amortiguador "C₃" que representa el contacto del plano de incidencia de la herramienta de corte con la pieza de trabajo, significa un amortiguamiento adicional al sistema a través del cual se consigue limitar la amplitud de la vibración.

El mecanismo de formación de viruta depende de las condiciones instantáneas de corte (parámetros de instalación), principalmente la velocidad de corte "Vo" y la profundidad de corte "p". Cualquier cambio instantáneo de estos parámetros, debido a las características dinámicas del corte, trae como consecuencia cambios en las magnitudes de la fuerza normal "N", la fuerza de fricción "F" y la velocidad relativa entre viruta y plano de desprendimiento de la herramienta de corte "Vs"; en condiciones de pequeñas vibraciones es posible suponer que las magnitudes de "Vs", "N", "F" permanecen sin variación con respecto a las condiciones de corte estático, y por lo tanto, éstas pueden ser aplicadas a las de un proceso de corte dinámico [2].

Con el objeto de modelar el sistema de corte dinámico se emplea como base al modelo de Ernst-Merchant que es un modelo estático para el corte ortogonal. Este modelo se presenta en la Figura 3 y plantea que la zona de deformación primaria o de cizalladura, se puede representar razonablemente por un plano llamado plano de cizalle. El ángulo que forma el plano de cizalle con la dirección del corte se denomina ángulo de cizalle.

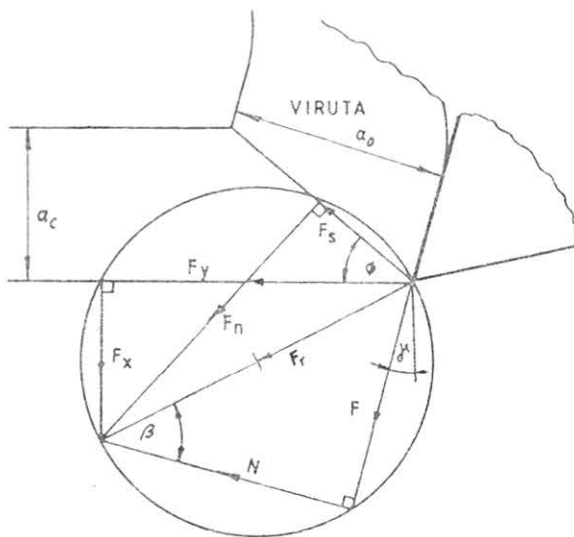


Figura 3. Diagrama de fuerzas correspondientes al modelo de Ernst-Merchant.

La nomenclatura de la Figura 3, corresponde a los siguientes parámetros:

- F_r = Fuerza resultante sobre la herramienta.
- F_x = Fuerza de corte.
- F_y = Fuerza de empuje.
- F_s = Fuerza de cizalle.
- F_n = Fuerza normal al plano de cizalle.
- N = Fuerza normal al plano de desprendimiento.
- F = Fuerza de fricción entre viruta y herramienta.
- γ = Ángulo de desprendimiento.
- ϕ = Ángulo de cizalle.
- β = Ángulo medio de fricción.
- A_c = Área de la viruta sin cortar.
- a_c = Espesor de viruta no deformada.
- a_0 = Espesor de viruta.

Una configuración geométrica del corte ortogonal en condiciones dinámicas se muestra en la Figura 4, donde la herramienta está removiendo viruta no cortada.

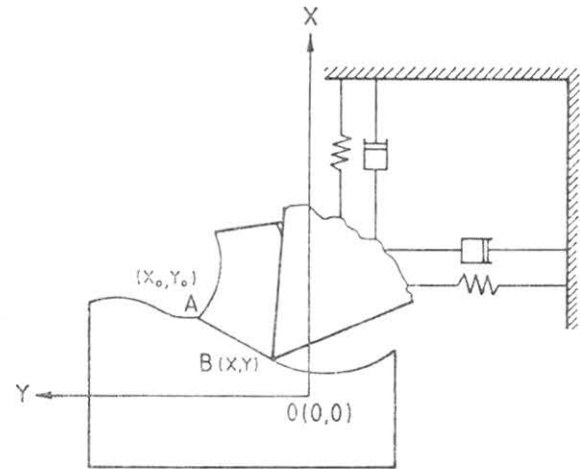


Figura 4. Configuración geométrica del corte ortogonal para un corte dinámico.

El sistema de coordenadas "x - y" está referido a la máquina-herramienta, de tal manera que el eje "Y" sea paralelo a la dirección del corte y el origen se mueva en la posición de equilibrio de la herramienta [4].

En una operación de corte estático, la punta de la herramienta "B" permanece en el origen "O", para el caso de corte dinámico el punto "B" de la herramienta fluctúa en torno a "O", por su parte, el punto "A" presenta un comportamiento similar de acuerdo se trate de un proceso estático o dinámico, es decir, permanece estacionario o con un movimiento vibracional, respectivamente. Para un tiempo t cualquiera, las coordenadas de desplazamiento son "Xo" e "Yo" para el punto "A" del extremo superior del plano de corte. De acuerdo a estas coordenadas se tienen las siguientes ecuaciones de movimiento.

$$m_0 \ddot{X} + C_1 \dot{X} + K_1 X = -F_x - f_x \quad (1)$$

$$m_0 \ddot{Y} + C_2 \dot{Y} + K_2 Y = -F_y \quad (2)$$

f_x : Fuerza que actúa en el plano de incidencia de la herramienta de corte.

Al considerar el análisis de fuerzas de Ernst y Merchant [3] aplicado a condiciones de corte dinámicas se obtienen las ecuaciones siguientes:

$$F_x = -2bZ (X_o - X) [(A_x - C_x V_o) + \frac{B_x}{2} (\dot{X} - \dot{X}_o) - \frac{C_x}{2} (\dot{Y} - \dot{Y}_o)] \quad (3)$$

$$F_y = 2bZ (X_o - X) [(A_y - C_y V_o) + \frac{B_y}{2} (\dot{X} - \dot{X}_o) - \frac{C_y}{2} (\dot{Y} - \dot{Y}_o)] \quad (4)$$

$$f_x = \frac{C_3 b \dot{X}}{V_o} \quad (5)$$

donde:

b : ancho de corte

Z : esfuerzo de corte del material

A_x, B_x, C_x, A_y, B_y, C_y: coeficientes de las fuerzas dinámicas.

V_o: velocidad de corte.

Reemplazando "F_x", "F_y" de las relaciones (1) y (2) en las ecuaciones (3) y (4) se obtienen finalmente:

$$m\ddot{X} + C_1 \dot{X} + K_1 X = 2bZ (X_o - X) [(A_x - C_x V_o) + \frac{B_x}{2} (\dot{X} - \dot{X}_o) - \frac{C_x}{2} (\dot{Y} - \dot{Y}_o)] - \frac{C_3 b \dot{X}}{2} \quad (6)$$

$$m\ddot{Y} + C_2 \dot{Y} + K_2 Y = -2bZ (X_o - X) [(A_y - C_y V_o) + \frac{B_y}{2} (\dot{X} - \dot{X}_o) - \frac{C_y}{2} (\dot{Y} - \dot{Y}_o)] \quad (7)$$

La fuerza f_x que actúa en la cara de incidencia de la herramienta de corte [3], se puede cuantificar a través de la ecuación (5), siendo ésta una fuerza de características disipadora, cuya magnitud depende del ángulo de incidencia y es posible obtener su valor en forma experimental.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta etapa experimental una primera e importante tarea que se realizó fue la de determinar a través de qué parámetros es posible medir las influencias del ángulo de incidencia de la herramienta de corte en el retemblado. Con este objeto se construyen algunos diagramas denominados "Diagramas de estabilidad" para cada una de las geometrías de herramientas de corte a analizar.

Los diagramas de estabilidad son gráficos cuyas coordenadas son el ancho de corte "b" y la velocidad de corte "V_o". La combinación de estas condiciones de corte permite determinar puntos para los cuales se produce un amortiguamiento del sistema igual a cero, el conjunto de estos puntos define una curva continua llamada frontera de estabilidad.

El área que queda bajo la curva es una zona de condiciones de corte estable, para la cual el amortiguamiento total del sistema es positivo, y una zona superior a la curva donde el amortiguamiento neto del sistema es negativo y, por lo tanto, el proceso de corte para las condiciones de esa zona resulta inestable, este fenómeno es el que se conoce como retemblado o vibraciones autoexcitadas.

El cómo influye el uso de herramientas de corte con diferentes ángulos de incidencia en el retemblado puede determinarse a través de la comparación de los diagramas de estabilidad construidos para cada uno de los ángulos de incidencia, pero con las otras condiciones de corte invariables.

El método usado para determinar los puntos que definen la frontera de estabilidad, consiste básicamente en medir la vibración total que se produce en la torre portaherramienta con un analizador de vibraciones hasta un valor de 0,18 mm entre los valores máximos.

Se toma como criterio este último valor ya que uno un poco superior significa un aumento de las vibraciones a niveles inaceptables.

Los ensayos de mecanizado que se realizaron para obtener las curvas de estabilidad del sistema, se efectuaron en operaciones de tronzado. La selección de esta operación de torneado obedece principalmente a dos razones fundamentales, y son las siguientes:

- Es posible controlar las características dinámicas (M,K,C) de la pieza de trabajo.
- Los factores direccionales de las fuerzas de corte permiten que el retemblado se manifieste más fácilmente.

Materiales, Condiciones de Corte y Geometría

Para los ensayos se utilizaron probetas cilíndricas montadas en voladizo con las siguientes características:

Material : SAE 1020
 Diámetro : 50 (mm)
 Largo : 120 (mm)

Las condiciones de corte son:

Avance : 0,0254 (mm/rev) (cte.)
 Velocidad de corte : 10 a 150 (m/min) (variable)
 Ancho de corte : 1 a 12,7 (mm) (variable)

Geometría

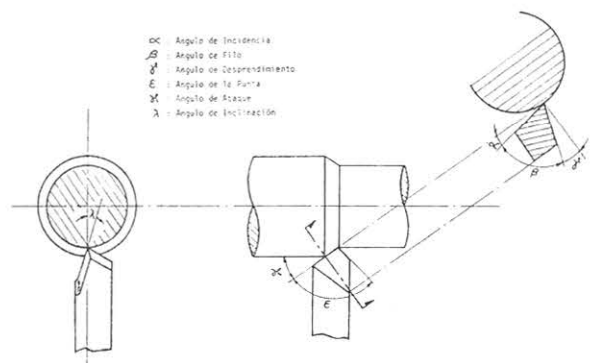


Figura 5. Geometría de la herramienta.

Ángulo de desprendimiento 16° (cte.)
Ángulo de posición 90° (cte.)

Los ángulos de incidencia usados en los ensayos fueron 5, 9 y 13° , de esta manera se cubre la gama de valores comúnmente utilizados en las herramientas de corte.

En las Figuras 6 y 7 se muestran dos fotos en las que se

puede observar las superficies de dos piezas mecanizadas con distintos ángulos de incidencia, manteniendo las otras condiciones de corte constantes. A través de las fotos es posible apreciar diferencias en la calidad superficial para un proceso con retemblado y otro en el cual no se presenta el fenómeno.

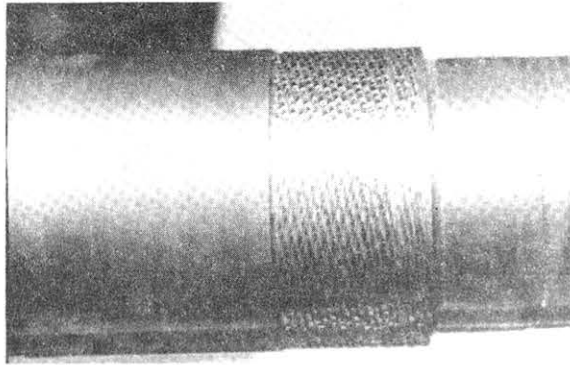


Figura 6. Superficie torneada en presencia de retemblado.

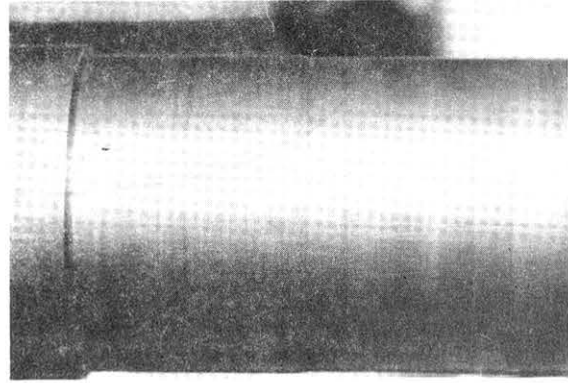


Figura 7. Superficie torneada en ausencia de retemblado.

RESULTADOS

Los resultados del desarrollo experimental se presentan graficando los valores de ancho de corte versus la velocidad

de corte, para los ángulos de incidencia establecidos. Estas descripciones gráficas representan las cartas de estabilidad obtenidas para los tres ángulos de incidencia de la herramienta de corte y se presentan en las figuras siguientes.

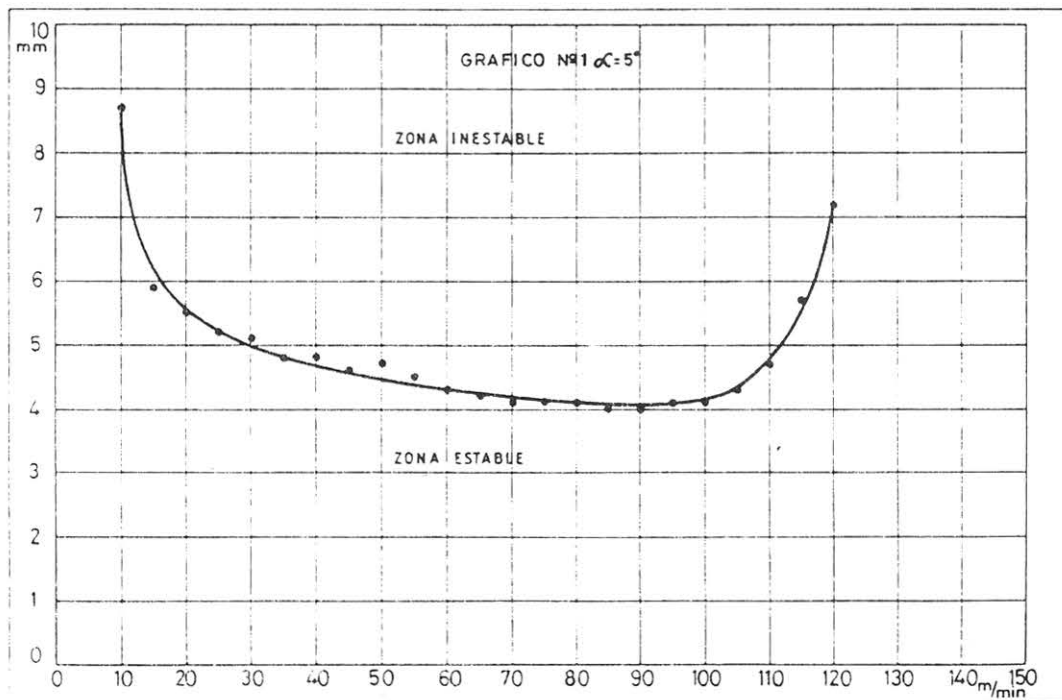


Figura 8. Gráfico velocidad de corte versus ancho de corte para un ángulo de incidencia de cinco grados.

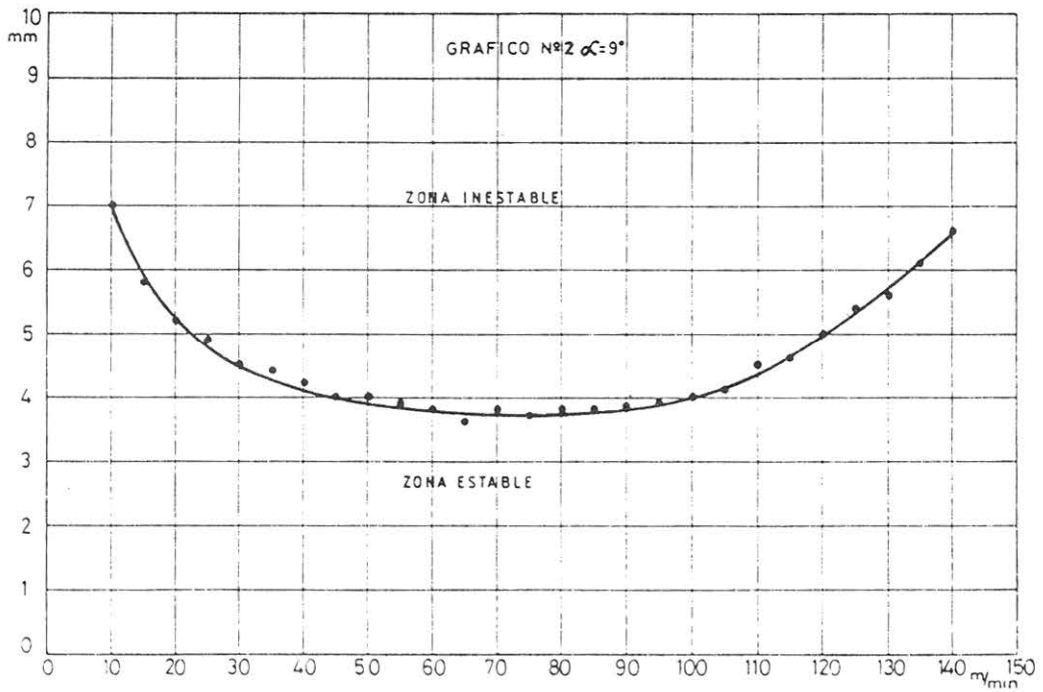


Figura 9. Gráfico velocidad de corte versus ancho de corte para un ángulo de incidencia de nueve grados.

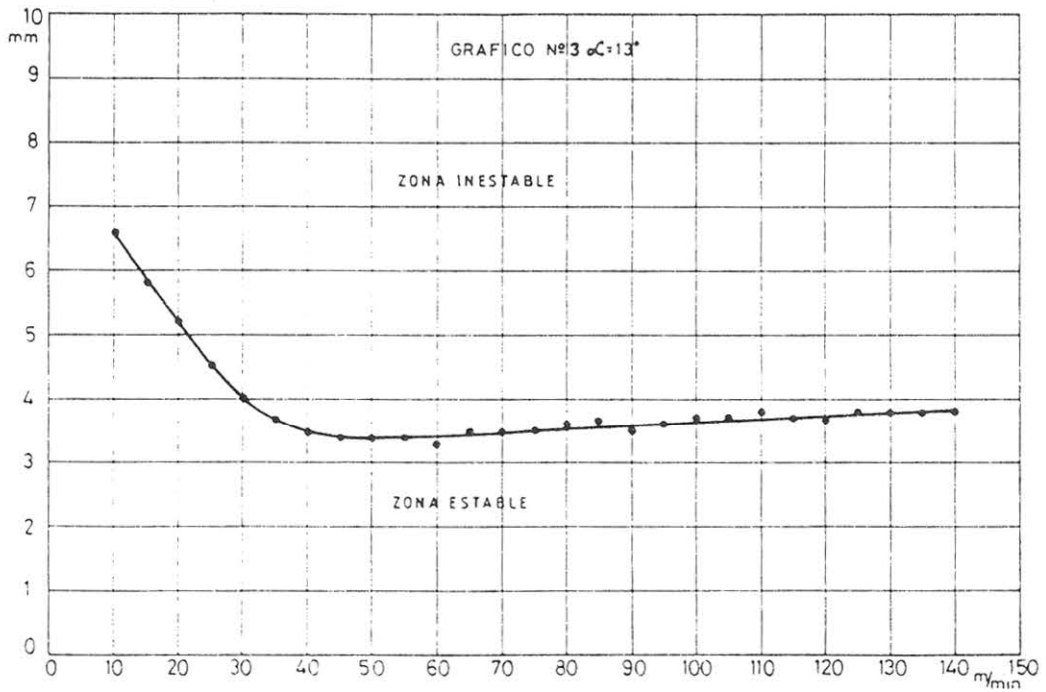


Figura 10. Gráfico velocidad de corte versus ancho de corte para un ángulo de incidencia de trece grados.

A través del análisis visual y cualitativo de los gráficos se aprecia un cambio gradual en las formas de las fronteras de estabilidad, desde una forma similar a una "U", para el ángulo de incidencia de cinco grados, a una forma tipo "L" para un ángulo de trece grados.

Un análisis del tipo cuantitativo se efectúa para determinar el máximo ancho de viruta, con el cual se mantiene estable el proceso para una velocidad de corte puntual (60 m/min en este caso). Los resultados obtenidos para cada uno de los ángulos de incidencia son los siguientes:

4,6 mm para un ángulo de incidencia de 5°.

3,8 mm para un ángulo de incidencia de 9°.

3,4 mm para un ángulo de incidencia de 13°.

Otro aspecto importante que se desprende del análisis de las gráficas, es que mientras más pequeño sea el ángulo de incidencia de la herramienta de corte, el área de la zona estable es creciente. En la Figura 11 se observa que la zona estable para la herramienta de corte con ángulo de incidencia de cinco grados, es mayor que en los otros dos casos.

Finalmente, en la Figura 12, se presenta una tabla con valores de ancho de corte para las velocidades de corte empleadas en los ensayos de las herramientas, con distinto ángulo de incidencia.

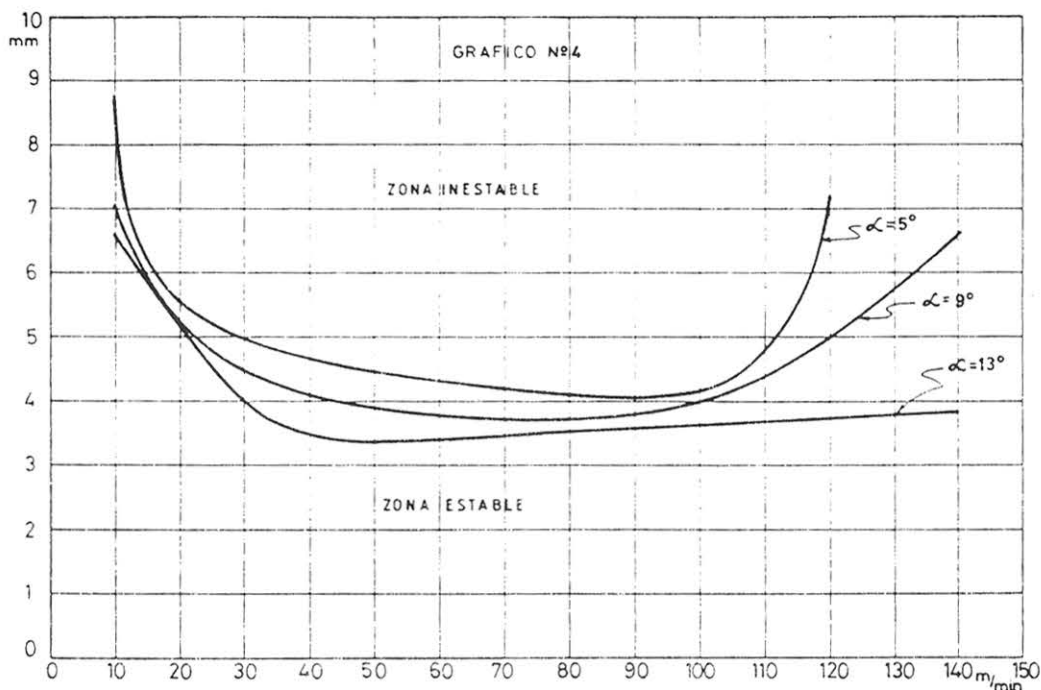


Figura 11. Gráfico comparativo de las curvas de estabilidad para los tres ángulos de incidencia.

Áng. de inc.	Áng. de inc.		
Vel. de corte m/min	5°	9°	13°
10	8,7	7,0	6,6
15	5,9	5,8	5,8
20	5,2	5,2	5,2
25	5,1	4,9	4,5
30	5,1	4,5	4,0
35	4,8	4,4	3,7
40	4,8	4,2	3,5
45	4,6	4,0	3,4
50	4,7	4,0	3,4
55	4,5	3,9	3,4
60	4,3	3,8	3,3
65	4,2	3,6	3,5
70	4,1	3,8	3,5
75	4,1	3,7	3,5

Áng. de inc.	Áng. de inc.		
Vel. de corte m/min	5°	9°	13°
80	4,1	3,8	3,6
85	4,0	3,8	3,6
90	4,0	3,8	3,5
95	4,1	3,9	3,6
100	4,1	4,0	3,7
105	4,3	4,1	3,7
110	4,7	4,5	3,8
115	5,7	4,6	3,7
120	7,2	5,0	3,7
125		5,4	3,4
130		5,6	3,8
135		6,1	3,8
140		6,6	3,8

Figura 12. Tabla de valores de ancho de corte en (mm) en la frontera de estabilidad.

OBS. Las condiciones de corte con las que se obtuvieron los valores de la tabla son las siguientes:

Ángulo de desprendimiento	: 16°
Ángulo de posición	: 90°
Ángulo de incidencia	: 5, 9, 13°
Avance	: 0,0254 (mm/rev)
Velocidad de corte	: 10 a 140 (m/min)
Fluido de corte	: sin fluido de corte

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos del desarrollo experimental se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El ángulo de incidencia de la herramienta de corte influye en el desarrollo del fenómeno de retemblado y, además, esta influencia es más relevante a velocidades de corte elevadas.
- Del análisis de los resultados mostrados en la Figura 11 se puede determinar que la zona estable para el mecanizado desarrollado con la herramienta de corte, con ángulo de incidencia de cinco grados, es mayor que para los mecanizados con herramientas de corte cuyos ángulos fueron de nueve y trece grados. Lo anterior tiene su explicación en que, a medida que disminuye el ángulo de incidencia, la zona de contacto pieza-herramienta de corte aumenta, lo cual produce un amortiguamiento mayor en el sistema.
- A través de los resultados obtenidos se puede concluir que es posible disminuir los problemas que presenta el fenómeno de retemblado mediante la disminución del ángulo de incidencia de la herramienta de corte, sin tener que afectar la productividad del proceso y la calidad superficial de la pieza de trabajo.

Por otra parte, conociendo el efecto que tienen otros parámetros geométricos de la herramienta de corte, tales como el ángulo de desprendimiento, el ángulo de posición, etc., sobre las fuerzas de mecanizado, es posible suponer que la variación de estos parámetros influyen sobre la magnitud de las vibraciones generadas.

Finalmente, el trabajo permite visualizar la necesidad

de desarrollar otras experiencias en este mismo contexto, es así que a futuro se proponen los siguientes estudios:

- Mecanizar con otros ángulos de incidencia en la herramienta de corte.
- Realizar ensayos con otras operaciones de torneado.
- Aislar y medir el amortiguamiento que se agrega por roce del material de la pieza con la herramienta de corte.
- Estudiar los efectos sobre el retemblado de todos los parámetros geométricos de una herramienta de corte monófilo.
- Estudiar cómo afectan los factores direccionales de las fuerzas de corte en el retemblado.

Un estudio sistemático de los aspectos señalados permitirá alcanzar un control de este fenómeno, que actualmente produce muchos problemas en cuanto a la calidad y economía de los procesos de corte de metal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a DICYT de la Universidad de Santiago de Chile, por el aporte económico otorgado a esta investigación.

También testimonian su gratitud a la Srta. Isabel Navarro L., por el trabajo de dactilografía, y al Sr. Francisco Jeria por su colaboración en la confección de figuras y gráficos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. C.R. LIU y T.M. LIU. *Automated chatter suppression by tool geometry control*. *Transcription of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 107, May 1985, pp. 95 a 98.
2. D.W.W.U. y C.R. LIU. *An analytical model the cutting dynamics*. *Transcription of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 107, May 1985, pp. 107 a 111.
3. D.W.W.U. y C.R. LIU. *An analytical model of cutting dynamics*. *Transcription of the ASME, Journal of Engineering for Industry*. Vol. 107, May 1985, pp. 112 a 118.
4. S.A. TOBIÁS. *Vibraciones en máquinas herramientas* (texto). Edit. Ediciones Urmo. Bilbao, España, año 1972.
5. GEOFFREY BOOTHROYD. *Fundamentos del corte de metales y de las máquinas-herramientas* (texto), Edit. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia, año 1976.