

Estudio del comportamiento de herramientas de corte observado a través de la gráfica de mecanizado

Juan Pablo Cardona Guío*

Fecha de envío: 15 de diciembre de 2008.
Fecha de aceptación: 19 de febrero de 2009.

RESUMEN

El proyecto desarrollado buscó proponer un modelo para establecer las zonas óptimas de trabajo de diferentes herramientas de corte utilizadas en el proceso del cilindrado de metales, a partir del análisis de gráficas obtenidas experimentalmente que relacionan variables de mecanizado, propiedades físicas y mecánicas de los materiales de ingeniería, a través de la teoría de números adimensionales.

Palabras clave: gráfica de mecanizado, desgaste de herramientas, número adimensional, herramientas de corte, metales.

STUDY OF THE BEHAVIOUR OF CUTTING TOOLS BY MEANS MECHANIZED GRAPHS

ABSTRACT

This project look for proposing a model to establish the optimal areas of work with different cutting tools used in the process of turning metals from the analysis of graphs obtained experimentally linking mechanized variables physical and mechanical properties of engineering material through the theory nondimensional number.

Keywords: mechanized graph, tool wear, nondimensional number, cutting tools, metals.

* Director del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Incca de Colombia. Correo electrónico: jcardonag@uincca.edu.co

INTRODUCCIÓN

La selección y aplicación de los parámetros de mecanizado en un proceso de corte constituye la base fundamental para garantizar una mayor duración de la herramienta de trabajo. Una de las causas para que un proceso de mecanizado no se pueda realizar de forma óptima es el cambio de la geometría de la herramienta de corte, debido, entre otros factores, al desgaste de los filos.

El desarrollo del Proyecto Estudio del Comportamiento de Herramientas de Corte Observado a través de la Gráfica de Mecanizado surge cuando se intenta explicar el comportamiento de las herramientas de corte al realizar procesos de cilindrado en distintos materiales bajo diversas condiciones de maquinado, como velocidad de corte, avance, longitudes de mecanizado, entre otras.

En la primera etapa se realizó una revisión bibliográfica, en la que se encontró que la información existente sobre el comportamiento de distintos pares herramienta-material en procesos de mecanizado no era suficiente para generar algún modelo de comportamiento de las herramientas de corte del proceso de cilindrado. Por tanto, se hizo necesario diseñar y realizar pruebas experimentales que abordaran una mayor cantidad de variables propias del mecanizado, y de esta forma identificar una tendencia en el desempeño de las herramientas de corte sustentada en las gráficas adimensionales.

El análisis experimental permitió llegar a elaborar siete gráficas que relacionan propiedades físicas y mecánicas de los materiales con variables de mecanizado, y de esta forma realizar un análisis con la información del proceso de cilindrado.

Para el desarrollo del proyecto se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general: Validar la metodología de ensayos en procesos de mecanizado, aplicada en el desarrollo del Proyecto Desarrollo de una Metodología para Realizar Ensayos Sistemáticos de Mecanizado en Colombia”.

Objetivos específicos: Realizar un registro en la gráfica de números adimensionales π_1 y π_2 de los resultados obtenidos en ensayos de cilindrado realizados con diferentes materiales y herramientas de corte.

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, es necesario conocer las variables involucradas en los procesos de mecanizado, específicamente en el cilindrado. A continuación, se realiza una breve explicación de estos factores.

CONTEXTO

La selección adecuada de una herramienta de corte está en relación directa con los costos involucrados en la producción de una determinada pieza. Por tanto, se debe optimizar y caracterizar el proceso de selección de dichas herramientas para garantizar una mayor rentabilidad en cualquier proceso de mecanizado.

La investigación aquí planteada utilizó los números adimensionales π_1 y π_2 que se desprenden del teorema de Buckingham y relacionan distintas variables de mecanizado con propiedades de los materiales. Están definidos de la siguiente forma:

$$\pi_1 = \frac{V_b}{A_v \times t} \quad (1)$$

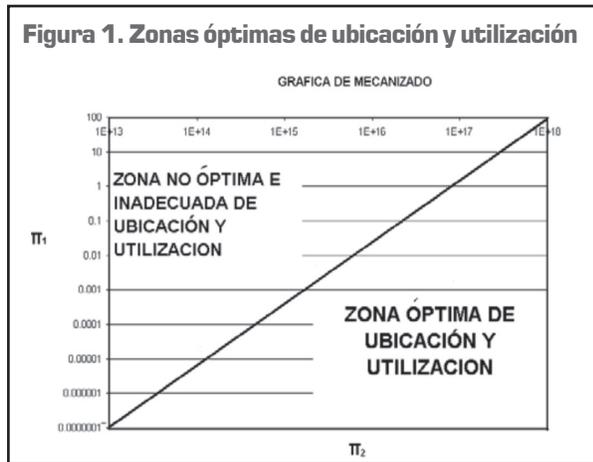
$$\pi_2 = \frac{S_y \times D_u}{D_e^2 \times V_c^2 \times A_v^2} \quad (2)$$

Donde: V_b = incremento del desgaste de flanco (m); A_v = avance (m/min); t = tiempo de mecanizado (t); S_y = resistencia a la cedencia del material a mecanizar (kg/mm^2); D_u = dureza del material para mecanizar (kg/mm^2); D_e = densidad del material para mecanizar (kg/m^3); y V_c = velocidad de corte (m/min). Por su parte, π_1 es una relación entre el desgaste de flanco (variable de salida) y la distancia recorrida a través del avance π_2 es una relación entre la energía necesaria para realizar el corte y la energía que es introducida en el mecanizado a través de las condiciones de corte [4].

ANTECEDENTES

ZONAS ÓPTIMAS DE UBICACIÓN

La ubicación será llamada óptima o no óptima, de acuerdo con la capacidad de la herramienta para mecanizar cierto tipo de material con condiciones de corte establecidas (fig. 2).



En la gráfica existen zonas adecuadas de mecanizado, en las que las herramientas muestran su capacidad y en las que se ubican si se dan ciertos parámetros de corte. En esta gráfica pueden ser comparadas y seleccionadas de acuerdo con el tipo de operación que se vaya a desarrollar.

Si un punto en la gráfica se ubica en la parte derecha, entonces se está mecanizando un material con una

dureza muy alta y una resistencia a la cedencia elevada con condiciones de corte pequeñas que hacen que el número π_2 sea grande en la zona de la gráfica llamada de óptima.

El hecho de que este punto se encuentre arriba o abajo en esta zona de la gráfica indica que la herramienta presentó un desgaste de flanco en mayor o menor cantidad, respectivamente, es decir, un π_1 más grande o más pequeño.

Si un punto en la gráfica se ubica en la parte izquierda, indica que se está procesando un material con una dureza baja, con una resistencia a la cedencia pequeña y con condiciones de corte agresivas, que hacen que el número π_2 sea pequeño.

Al igual que sucede en la zona óptima de ubicación, si el punto se encuentra arriba o debajo dentro de esta zona, indica que la herramienta presentó un desgaste de flanco en mayor o menor grado, lo que hace a π_1 más grande o más pequeño. Se puede concluir que esta zona es donde la herramienta no posee la capacidad necesaria para mecanizar materiales muy duros, en los cuales se necesite vencer una resistencia a la cedencia elevada, comparada con aquellas que se encuentran en la zona óptima de ubicación.

Se debe aclarar que ésta es una gráfica comparativa entre herramientas; la comparación es útil cuando se está buscando la mejor aplicación de acuerdo con las necesidades de cada proceso, siempre buscando el más productivo en todo sentido, es decir, se pretende con esta zonificación poder interpretar los resultados dentro de la experimentación.

ZONAS ÓPTIMAS DE UTILIZACIÓN

Al igual que para la “ubicación”, existen zonas óptimas o inadecuadas para la utilización de la herramienta. El inadecuado uso de la herramienta en condiciones de corte desfavorables hará que la herra-

mienta presente un desgaste excesivo e innecesario, que puede ser corregido con una modificación apropiada de las condiciones del mecanizado.

Si se tiene en cuenta la capacidad de una herramienta y es utilizada con las condiciones de corte adecuadas, será productiva y no serán desperdiciados recursos en tiempo de reafilados sucesivos, en paradas de máquina y en compra de herramientas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El diseño experimental desarrollado buscó obtener de manera suficiente y adecuada la información requerida para generar las gráficas. Para esto, por cada herramienta de corte y número determinado de materiales que se van a mecanizar se seleccionaron aleatoriamente avances lineales, revoluciones y longitudes de mecanizado; después de cada cilindrado se realizó la medición del desgaste incremental del flanco de la herramienta. Con esta información y las variables de entrada del proceso, se determinaron los números adimensionales π_1 y π_2 . En los estudios anteriores, se desarrolló un número limitado de pruebas, lo que impedía identificar una tendencia en el comportamiento de las herramientas en el proceso de cilindrado; por ello, se hizo necesario realizar entre 55 y 60 experimentos para cada una de las herramientas de corte.

Las pruebas se realizaron con herramientas que trabajan con velocidades de corte medias y altas; por ello, se dividieron en dos clases: pruebas convencionales y pruebas de alta velocidad.

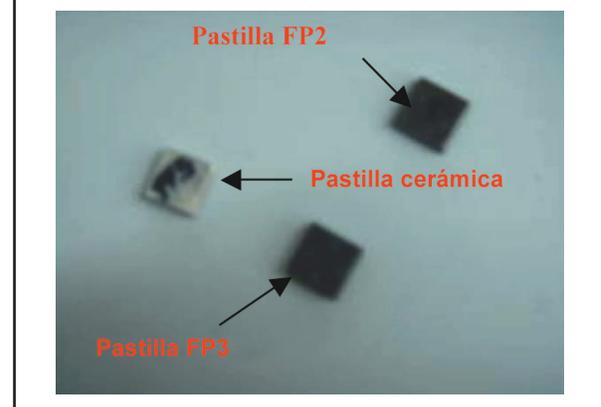
MATERIALES Y HERRAMIENTAS DE CORTE UTILIZADOS EN PRUEBAS CONVENCIONALES Y DE ALTA VELOCIDAD

Entre los materiales utilizados para maquinar en el desarrollo de la presente investigación, se encuentran los siguientes: acero de bajo carbono (1020),

acero de medio carbono (1040), acero aleado (4140), bronce latón, acero inoxidable austenítico (316), acero para moldes de inyección (m300), acero para maquinaria 8620 templado y acero 4340 templado.

Para la realización de las pruebas de mecanizado se utilizaron siete clases de herramientas de corte, las cuales se relacionan a continuación: acero rápido convencional; acero rápido sinterizado; pastillas de tungsteno marca Sanvik, referencias: SPGN120304 415 (FP2), SPUN120308 415 (FP3), SPUN120412 415 (FP4); pastilla cerámica marca Sanvik, referencia: SPGN120412 T01020 650, y pastilla de nitruro de boro cúbico (BCN). En la figura 2 se muestran algunas de estas herramientas.

Figura 2. Algunas de las herramientas de corte utilizadas en las pruebas de mecanizado



PRUEBAS CONVENCIONALES

Para la ejecución de estas pruebas se utilizó un torno de fabricación inglesa de marca Harrison que se observa en la figura 2. En dicha máquina se realizaron pruebas de mecanizado con cuatro materiales distintos: acero 1020, acero 1040, acero 4140 y bronce Latón. Estos materiales se maquinaron en estado normalizado, es decir, sin ningún tipo de tratamiento térmico o termoquímico que afecte sus propiedades estándares físicas o mecánicas.

Para mecanizar los materiales relacionados, se utilizaron las siguientes herramientas de corte: acero rápido convencional, acero rápido sinterizado y pastillas de tungsteno marca Sanvick, referencias SPGN120304 415 (FP2), SPUN120308 415 (FP3), SPUN120412 415 (FP4) (en la figura 4 se muestra el proceso de cilindrado realizado con un acero 1040 y la pastilla FP4 de Sanvick).

Figura 3. Máquina herramienta utilizada en pruebas de mecanizado convencionales



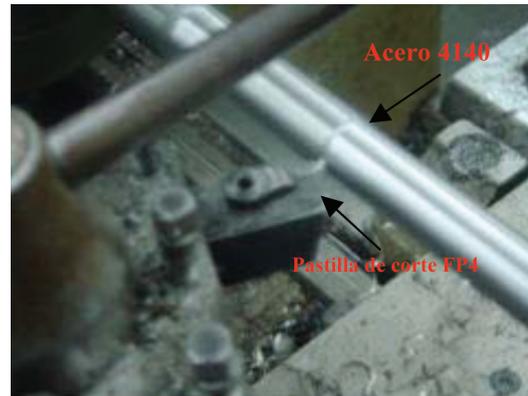
Las velocidades de corte, avances y profundidades se establecieron en tres rangos: bajo, medio y alto, de forma que se permita ampliar el espectro en la toma de información relacionada con el desgaste de la herramienta.

PRUEBAS DE ALTA VELOCIDAD

Para la realización de dichas pruebas se utilizó un torno CNC de alta velocidad, ubicado en el sector industrial en el ramo de las autopartes. Esta máquina nos brinda la oportunidad de probar herramientas de corte y materiales diferentes y con velocidades de corte más altas a las utilizadas en una máquina convencional.

Entre los materiales utilizados están:

Figura 4. Proceso de cilindrado realizado sobre un acero 4140 con una pastilla FP4 Sanvick



Acero inoxidable austenítico (316), acero para moldes de inyección M300, acero para maquinaria 8620 templado y acero 4340 templado. Las herramientas utilizadas para realizar cilindrados en dichos materiales corresponden a la cerámica y al Nitruro de Boro Cúbico, ya que son las que permiten utilizar altas velocidades de corte (300-800 m/min).

PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE DATOS

El paso inicial consistió en determinar las propiedades físicas y mecánicas del material que se va a mecanizar, debido a que son variables de entrada del proceso y, además, se necesitan para la determinación de los números adimensionales. Entre ellas se encuentran la dureza (D_u), el esfuerzo de fluencia (S_y) y la densidad del material (D_e) para cada material mecanizado.

El procedimiento consistió en realizar pruebas de cilindrado con cada uno de los cuatro filos de las pastillas Sanvick, FP2, FP3, FP4 de acero rápido sinterizado y acero rápido convencional, utilizando diferentes materiales y diversas condiciones de corte hasta desgastar este filo. Después de cada prueba se realizó la medición del desgaste de flanco de cada herramienta de forma incremental con la ayuda de un proyector de perfiles.

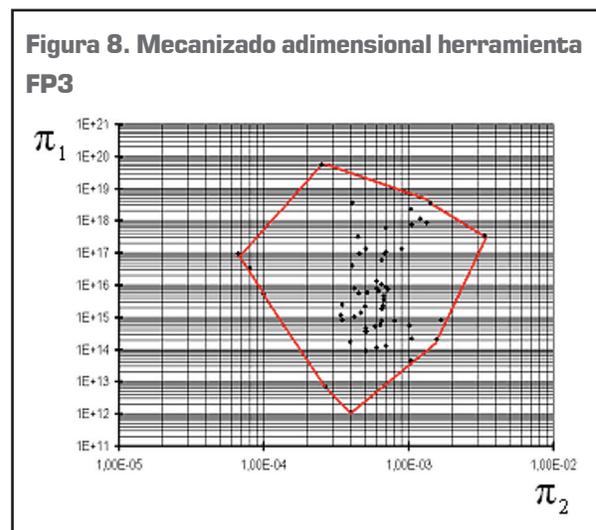
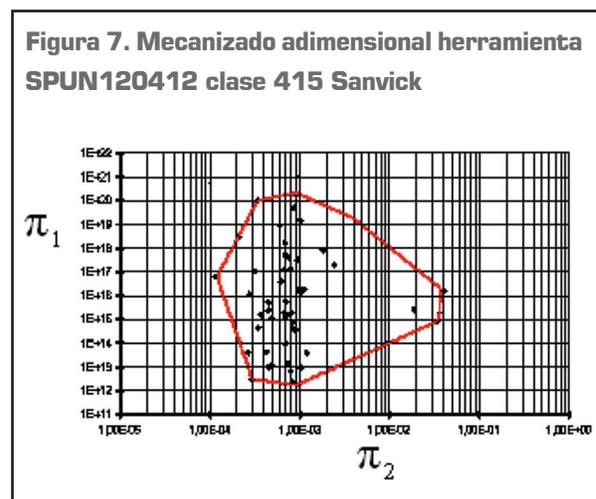
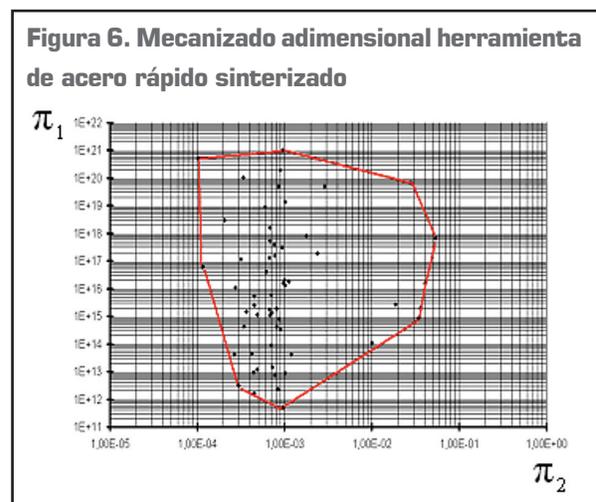
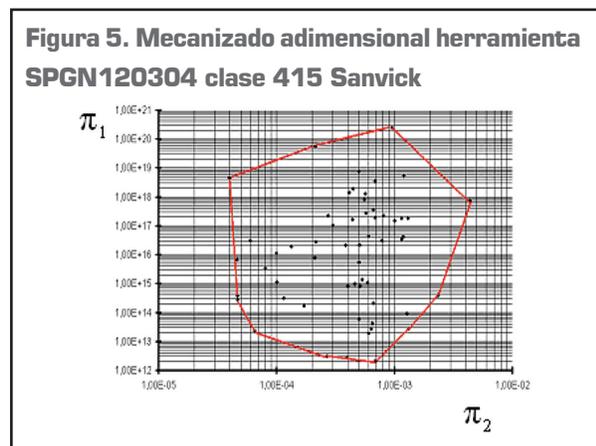
En las pruebas de alta velocidad se utilizó la ayuda de una cámara fotográfica digital para ampliar las imágenes de las herramientas, y, por medio de una escala adecuada, realizar la medición del desgaste.

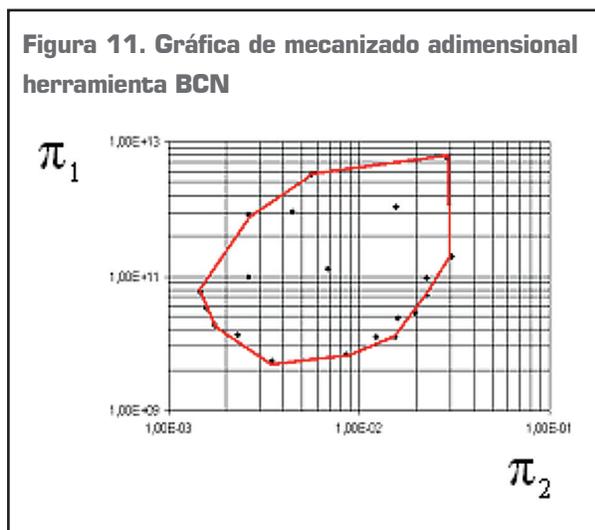
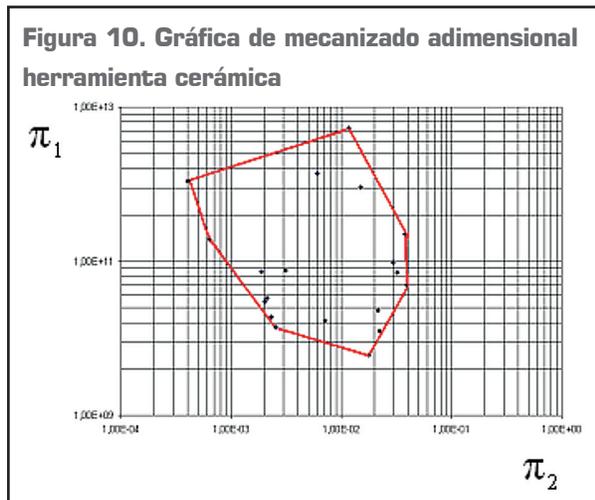
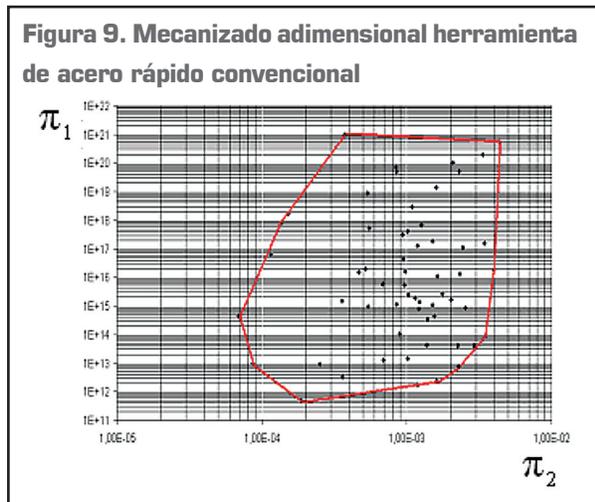
ELABORACIÓN DE GRÁFICAS DE MECANIZADO

La información recogida por medio del procedimiento experimental en las pruebas convencionales y de alta velocidad se trató para cada herramienta, con el fin de relacionar los parámetros de mecanizado mediante los números adimensionales π_1 y π_2 . Para las distintas herramientas de corte y los diferentes materiales, se realizó su representación mediante una gráfica log-log, en la cual se ubica π_1 en el eje de las abscisas y π_2 en el eje de las ordenadas; en cada una de ellas se unen los puntos extremos encontrados. En las figuras 5 a 11 se muestra cada una de ellas.

MÉTODO GEOMÉTRICO DE ÁREAS EQUIVALENTES

La utilización de este método se basa en la determinación de una región circular que tiene la misma área, que resulta de unir los puntos extremos en la gráfica adimensional de mecanizado para cada herramienta. El centro del círculo de área equivalente se ubica en el centroide del área externa de la gráfica adimensional para cada herramienta.





El método utilizado consistió en unir, dentro de la gráfica adimensional de mecanizado para cada herramienta de forma secuencial, los datos experimentales, y así generar áreas y coordenadas centroidales parciales para cada una de ellas. De esta forma, se crea una sucesión cuyo término enésimo en el infinito converge a un centroide y a un área, es decir, una región acotada de funcionamiento. Al aplicar dicho procedimiento a la herramienta de acero rápido sinterizado, se obtuvo la información que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Valores obtenidos experimentalmente para la herramienta de acero rápido sinterizado

n	π_1	π_2	A
1	2,00E-04	1,00E+14	1,60E+06
2	2,50E-04	1,00E+15	2,36E+06
3	2,80E-04	2,23E+15	5,00E+06
4	3,00E-04	5,00E+15	7,00E+06
5	5,00E-04	4,00E+16	2,00E+07
6	5,00E-04	4,00E+16	4,68E+07
7	5,00E-04	3,06E+16	8,10E+07
8	3,50E-04	2,00E+16	1,40E+08
9	3,50E-04	1,76E+16	2,77E+08
10	1,50E-04	1,43E+16	8,37E+08

Los cálculos de las áreas y los centroides se realizaron utilizando el programa de diseño Solid Edge v12, uniendo áreas parciales resultantes de unir los puntos sucesivos. De esta forma, se obtienen áreas parciales con tres, cuatro, cinco, etcétera, y cada una de ellas se une. El *software* es capaz de entregar el valor de área centroide correspondiente a un número de puntos dado. Tanto el área como el centroide se pueden ajustar al término enésimo de una sucesión, cuyo límite al infinito corresponde a las coordenadas del centroide y al área total limitada por los puntos extremos. A continuación, se muestran los cálculos correspondientes para la herramienta de acero rápido sinterizado.

$$\pi_{1n} = \frac{4E3n^2 + 16n + 6E - 4}{0,83E7n^2 + 3,3E4n + 1,25}$$

La convergencia encontrada al calcular el límite al infinito de la ecuación es:

$$\lim_{p1n \rightarrow \infty} = 4,81E-4.$$

De la misma forma para π_2 , se tiene:

$$\pi_{2n} = \frac{23n^2 + 6E4n + 5E - 6}{0,83E7n^2 + 3,3E4n + 1,25}$$

$$\lim_{p2n \rightarrow \infty} = 1,5E16.$$

Por tanto, las coordenadas del centroide para esta herramienta son 4.81E-4, 1.5E16.

Para el área se obtiene:

$$A_n = \frac{3,6E4n^2 + 6,2E - 2n + 18}{4,7E - 7n^2 + 8,1E - 13 + 2,3E - 10}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} A_n = 7,6E10 \text{ unidades cuadradas}$$

Las coordenadas del centroide constituyen el centro de un círculo que tiene un área equivalente a la hallada en la convergencia, tal como se muestra en la figura 12.

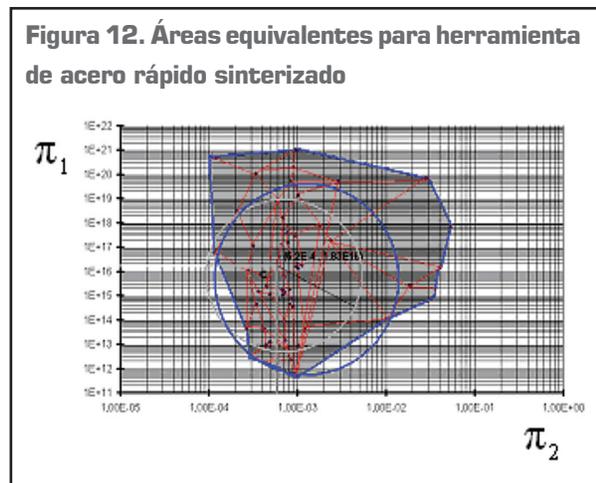


Tabla 2. Resultados de centroide y área para herramienta de acero rápido sinterizado

Área	Radio equivalente	δ_1	δ_2
7,6E10	1,5E5	4,81E-4	1,56E16

A continuación, se relacionan para las herramientas restantes los términos de convergencia, así como sus respectivas gráficas.

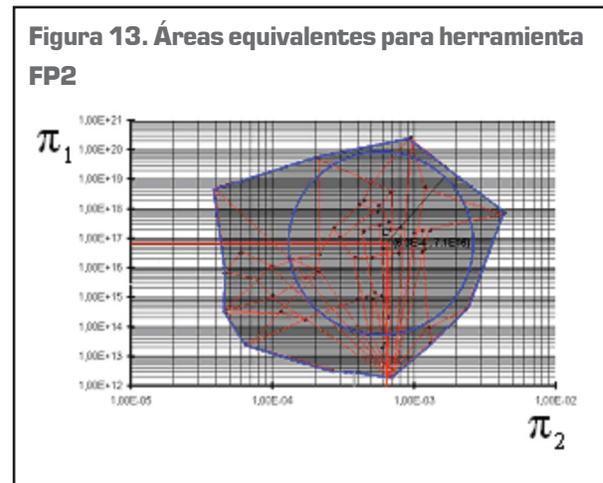


Tabla 3. Resultados de centroide y área para herramienta FP2

Área	Radio equivalente	δ_1	δ_2
6,86E10	1,47E5	6,3E-4	7,1E16

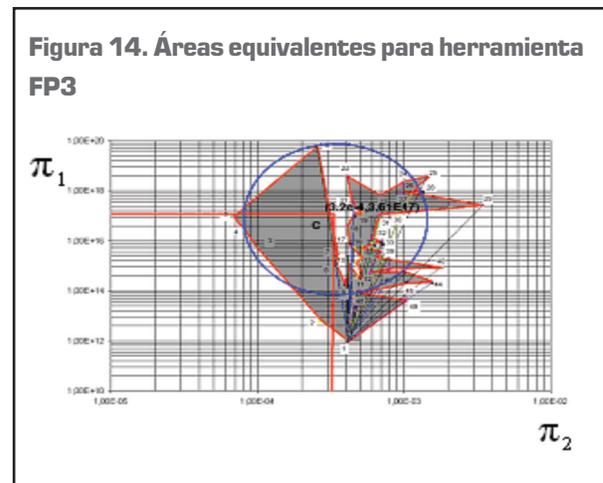


Tabla 4. Resultados de centroide y área para herramienta FP3

Área	Radio equivalente	δ_1	δ_2
5,24E10	1,29E5	3,24E-4	3,61E17

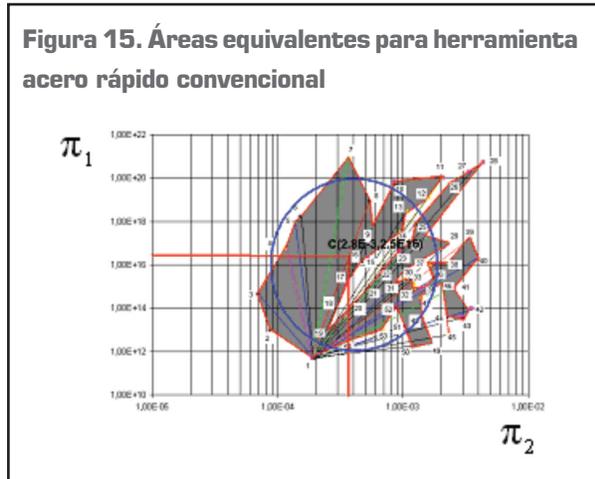


Tabla 5. Resultados de centroide y área para herramienta acero rápido convencional

Área	Radio equivalente	δ_1	δ_2
6,34E10	1,42E5	2,8E-3	2,5E16

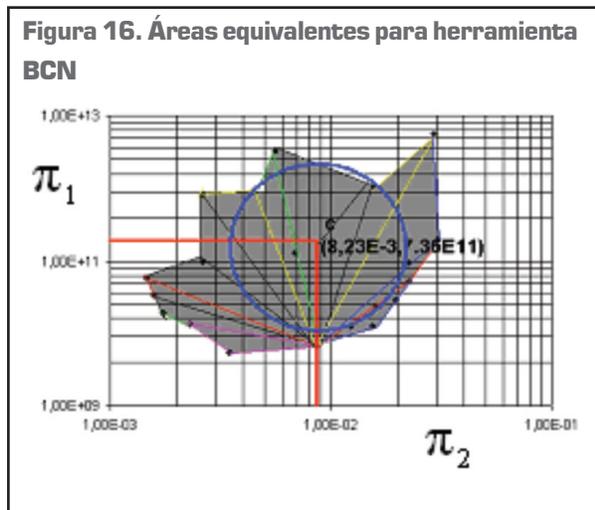


Tabla 6. Resultados de centroide y área para herramienta BCN

Área	Radio equivalente	δ_1	δ_2
2,32E10	8,5E4	8,23E-3	7,36E11

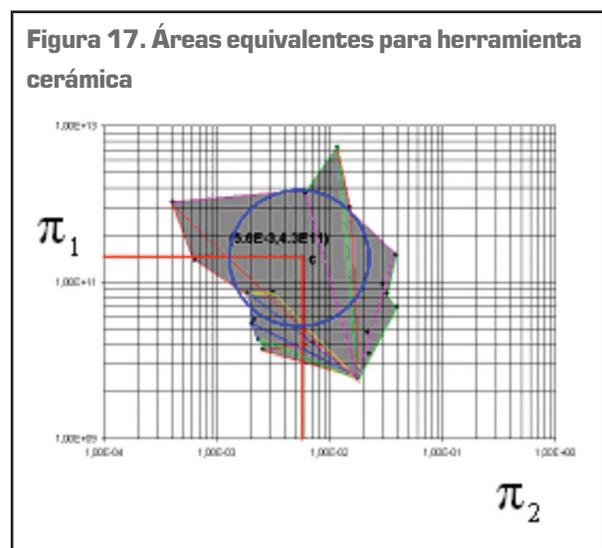


Tabla 7. Resultados de centroide y área para herramienta cerámica

Área	Radio equivalente	δ_1	δ_2
3,02E10	9,8E4	5,6E-3	4,3E10

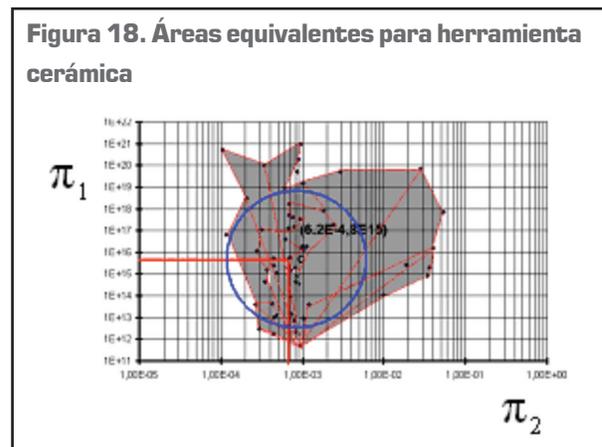


Tabla 8. Resultados de centroide y área para herramienta cerámica

Área	Radio equivalente	δ_1	δ_2
4,26E10	11,6E4	6,2E-4	4,8E15

CONCLUSIONES

Las gráficas de mecanizado adimensionales proporcionan, de forma sencilla, la información necesaria para realizar adecuadamente procesos de maquinado de manera segura y óptima.

La información obtenida por medio de las pruebas experimentales corroboró los resultados logrados

para π_1 y π_2 en estudios realizados anteriormente en herramientas de acero rápido convencional, sinterizado y carburos de tungsteno, y amplió el espectro de información a partir de las herramientas de corte.

Es importante implementar una metodología de ensayos de mecanizado en la industria colombiana, ya que aún se trabaja de forma muy empírica sin llegar a optimizar los procesos.

Teniendo como punto de partida las gráficas adimensionales de mecanizado, es posible comparar el desempeño de las herramientas de corte y observar su desempeño al mecanizar determinado material.

BIBLIOGRAFÍA

Avallone, A. y Baumeister, T. *Manual del ingeniero mecánico*. McGraw-Hill. 9 edit. 1995.

Black Stewart, C. (1999). *Principios de ingeniería de manufactura*. Compañía Editorial Continental, S. A. de C. V. México (pp. 281-286; 291-297).

Groover, P. M., (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. Prentice-Hall, Hispanoamericana S. A. Tercera Edición. pp. (596-597).

Gutiérrez P, H. (2003). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill. pp. 509-513.

Oberg, E. y Jones, H. (1984). *Manual universal de la técnica mecánica*. Labor.