

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE HERRAMIENTAS DE CORTE EN EL PROCESO DE CILINDRADO, MEDIANTE EL USO DE NÚMEROS ADIMENSIONALES.**

### **EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF CUTTING TOOLS IN THE PROCESS OF ROLLING, BY USING ADIMENSIONAL NUMBERS.**

Humberto, Ballestas Moreno

MSc. Ingeniería Mecánica. Profesor Asistente Tiempo Completo Escuela de Ingeniería de Producción, Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja. Líder Grupo de Investigación en Ingeniería de Producción, GIPRO.  
humberto.ballestas@unipaz.edu.co

Luís Eduardo, Llano Sánchez

Ing. Mecánico, M.Sc.(c), Director programa Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.  
luis.llano@umng.edu.co

William, Gómez Rivera

Ing. Mecánico, M.Sc. Docente y Jefe Laboratorio de Diseño Mecánico, Universidad Militar Nueva Granada. Líder Grupo Investigación VOLTA.  
william.gomezr@umng.edu.co y gomez\_riveraw2@asme.org

Fecha de Recepción: Noviembre 26 de 2006.

Fecha de aprobación: Diciembre 10 de 2006.

## **RESUMEN**

El presente trabajo consiste en la aplicación de la técnica de análisis dimensional utilizando el teorema p de Buckingham al estudio del desgaste de herramientas de acero rápido sinterizado, acero rápido, de metal duro widia e inserto de carburo de tungsteno, realizando operaciones de cilindrado. Las pruebas se llevaron a cabo en talleres industriales de Bogotá y Barrancabermeja, utilizando diferentes materiales para la pieza de trabajo y variadas condiciones de corte para la herramienta hasta llegar a desgastarla. La información recopilada permitió graficar la relación log-log entre dos parámetros adimensionales ( $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ). Los datos de corte mostraron convergencia en torno a zonas particulares que facilitaron hacer las comparaciones entre herramientas. La comparación experimental, basada en los parámetros adimensionales  $\pi_1$  y  $\pi_2$ , demostró que es posible elaborar una norma Colombiana para evaluar herramientas en variadas condiciones de operación.

**PALABRAS CLAVE:** Números adimensionales, Teorema de Buckingham, desgaste de herramientas.

## ABSTRACT

The present paper consists of the application of the method of dimensional analysis using the Buckingham's p Theorem for the study of the tool wear of sintered high speed steel, conventional high speed steel, hard metal widia and tungsten carbide insert in turning. The testing in turning operations took place at workshops in Bogotá and Barrancabermeja, under different sequences of work piece materials and cutting conditions to wear out the tools. Data was collected to develop a graph relating two non-dimensional numbers ( $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ). Graphs constructed with collection of much data show to be convergent to a zone where all data can be agglutinated of dimensionless parameters  $\pi_1$  and  $\pi_2$  that facilitate the comparisons between tools. The experimental comparison, based on the dimensionless parameters  $\pi_1$  and  $\pi_2$  demonstrated that it is possible to elaborate a Colombian Standard to evaluate tools in several operational conditions.

**KEY WORDS:** Non-Dimensional Numbers, Buckingham theorem, wear down tool.

## INTRODUCCION

La importancia de las operaciones de remoción de material en el panorama actual se puede visualizar considerando la cifra de los costos asociados con esta actividad, los cuales incluyen el aumento de los costos de herramientas, de los costos laborales y de los costos de inversión de capitales. En los Estados Unidos, se estima que los costos anuales asociados a los procesos de remoción de material constituyen al rededor del 10% del producto interno bruto [8].

Por lo anterior es bien importante hacer uso apropiado de las herramientas de corte en los proceso de arranque de viruta. Optimizar el desempeño de la herramienta no sólo alargará su vida, sino que aumentará la productividad de la organización al producir más y mejores piezas con una reducción de los costos de operación. De allí que el conocimiento de las condiciones de los procesos de corte y su relación con las variables que inciden el desempeño de la herramienta sea un tema de permanente investigación.

Hoy día se dispone comercialmente de una gran variedad de materiales para herramientas de corte. La selección adecuada depende de factores como la operación de corte de que se trate, la máquina que se va a usar, el material de la pieza de trabajo, las necesidades de producción, el costo y el acabado superficial deseado. Las principales cualidades requeridas en una herramienta de corte son: dureza en caliente, tenacidad al impacto o resistencia al choque mecánico y resistencia al desgaste [3].

En el presente trabajo se empleará la técnica de análisis dimensional para estudiar el desgaste de las herramientas de corte. Se seleccionó el método de Buckingham

en vez del método de Lord Rayleigh por el número de variables involucradas en el estudio: siete. En este sentido el método de Buckingham resulta más apropiado para hallar los parámetros adimensionales que describirán el fenómeno de corte de materiales.

La operación básica de cilindrado facilitó el estudio de los parámetros adimensionales por ser la más empleada en el trabajo experimental de corte de metales.

## 1. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ANÁLISIS DIMENSIONAL EN EL CORTE DE METALES

Hay muy pocos problemas de interés en el campo de la mecánica de fluidos que se resuelven utilizando únicamente las ecuaciones diferenciales e integrales. En casi todos los casos es necesario recurrir a métodos experimentales para establecer relaciones entre las variables de interés. Puesto que los estudios experimentales suelen ser muy costosos, es necesario reducir a un mínimo la experimentación requerida. Esto se hace empleando la técnica llamada análisis dimensional, que basada en el concepto de homogeneidad dimensional, asegura que todos los términos de una ecuación tengan las mismas dimensiones [7].

Cuando se necesita estudiar un fenómeno en corte de metales ocurre algo similar a lo que ocurre en mecánica de fluidos. Partiendo de la validez de la técnica de análisis dimensional y del teorema  $\pi$  Buckingham, que organiza los pasos para garantizar la homogeneidad dimensional, es necesario seleccionar las variables que describen el fenómeno y que conformarán los parámetros adimensionales.

### 1.1. ACOTACIÓN DEL PROBLEMA: LAS VARIABLES

Entre las muchas variables involucradas en el proceso de corte de metales, se seleccionaron las que inciden en el desgaste de la herramienta y que podían dar alguna información del buen o mal uso que se le diera a la herramienta en la operación de torneado. Variables como temperatura y fuerzas de corte no se consideraron por limitaciones técnicas para su cuantificación en pisos de fábrica. El criterio utilizado en la determinación de la vida de la herramienta fue el de dimensiones preestablecidas de la franja de desgaste de el flanco ( $V_B$ ) [5]. Trabajos previos en el tema, realizados por el grupo de investigación en técnicas modernas de manufactura de la Universidad de los Andes permitieron la formulación de números adimensionales previos a este estudio [6].

Considerando como variable dependiente desgaste de flanco incremental máximo ( $V_B$ )<sup>1</sup>, y como variables independientes longitud mecanizada por el avance ( $L$ ),

1) Corresponde a la diferencia de desgastes acumulados máximo entre dos pasadas consecutivas.

velocidad de corte ( $V$ ), tiempo de mecanizado ( $t$ ), velocidad de avance en mm/min ( $f$ ), profundidad de corte ( $d_c$ ), dureza de la herramienta ( $H_t$ ) y dureza del material de la pieza de trabajo ( $H_w$ ), se puede demostrar que:

$$\pi_2 = \frac{V_B}{L} \quad (1)$$

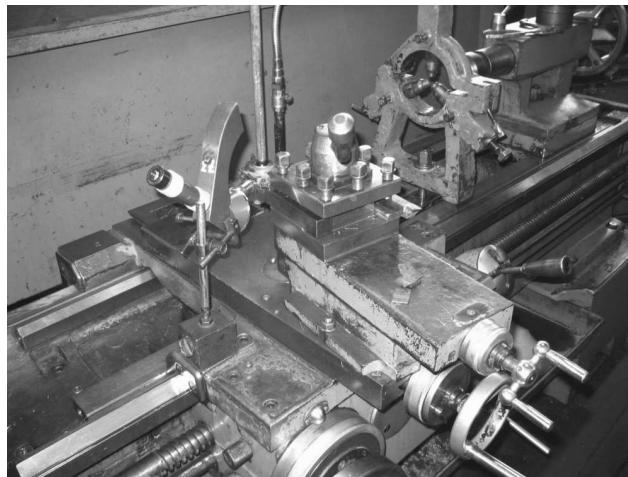
$$\pi_1 = \frac{V^2 \times t}{f \times d_c} \times \frac{H_t}{H_w} \quad (2)$$

Siendo  $\pi_2$  la variable de salida y  $\pi_1$  el término que introduce la variable de entrada como función de las condiciones de corte y las durezas del material de la herramienta y de la pieza de trabajo.

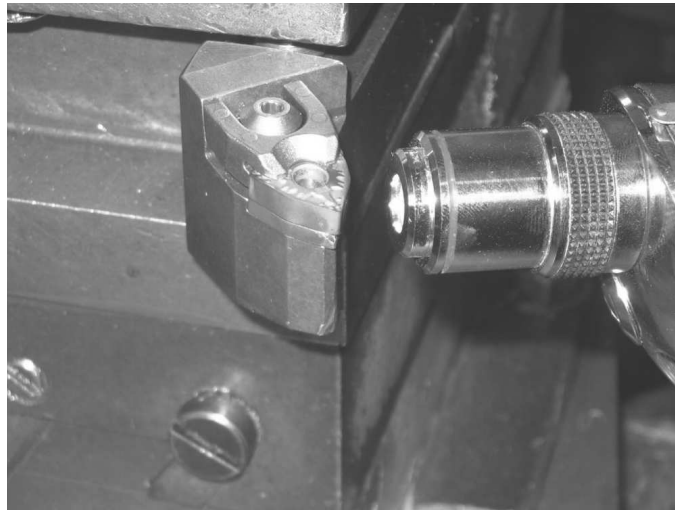
Nótese que las variables de entrada y salida son de fácil medición en piso de fábrica. Los valores de dureza están disponibles en catálogos de proveedores de herramientas y materiales. Para la medición del desgaste máximo de flanco se recomienda aumento de al menos 40X.

## 1.2. MONTAJE UTILIZADO

**Torno.** Se utilizaron tornos convencionales de fabricación inglesa y polaca de marcas "Harrison" y AFL respectivamente. Para efectos de medir el desgaste de flanco se diseñó y construyó un montaje portátil. Este consistió de un objetivo de 10X y ocular de 10X, logrando aumentos de 100X. Las figuras 2 y 3 corresponde a fotografías que ilustran la forma como se adaptó el microscopio portátil a los tornos. En el montaje se empleó un soporte de comparador de carátula o deformímetro.



**Figura 1.** Montaje del microscopio portátil sobre el torno.



**Figura 2.** Detalle de la estrategia de medición del desgaste de flanco en herramienta de carburo de tungsteno.

Las fotografías del desgaste se tomaron con cámara canon powershot A75 de 3.2 megapíxeles sin zoom digital. También se utilizó software de medición facilitado por el Grupo de Investigación en Materiales del Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Valencia, España, con fines exclusivamente académicos.

**Herramientas de corte.** Se evaluaron cuatro tipos de herramientas de corte, Tabla1.

**Tabla 1.** Herramientas utilizadas en el estudio.

Nº	Herramienta	Id.
1	Buril de acero rápido.(HSS)	HSS
2	Pastilla de acero rápido sinterizado. No disponible comercialmente.	(S-HSS) S-HSS
3	Pastilla de carburo de tungsteno. Ref.: SPGN 120304 415	WC
4	Buril de metal duro Widia. Ref.: Widia	WIDIA

**Materiales mecanizados.** El criterio para la selección de los materiales que intervinieron en el estudio fue: metal de fácil adquisición en el mercado, de uso frecuente en talleres locales y certificado por el proveedor (Tabla 2).

**Tabla 2.** Metales utilizados en el estudio.

N°	Material mecanizado	Id.	Fabricante
1	Acero bajo carbono 1020 Ref.: AISI/SAE 1020	1020	Fabricante local
2	Acero medio carbono 1040 Ref.: AISI/SAE 1040	1040	Fabricante local
3	Acero aleado 4140. Ref.: AISI/SAE 4140	4140	Fabricante local
4	Bronce latón Ref.: latón 80% C	Bronce Latón	Fabricante local

Las variables de interés de cada material se listan en la tabla 3.

**Tabla 3.** Propiedades de los materiales mecanizados en el estudio.

Nº	Material Mecanizado	Densidad [kg/m³]	Dureza [BHN]
1.	AISI/SAE 1020	7860	120
2	AISI/SAE 1040	7860	149
3	AISI/SAE 4140	7860	280
4	LATON80% Cu	8970	60

**Fuente:** Fabricantes.

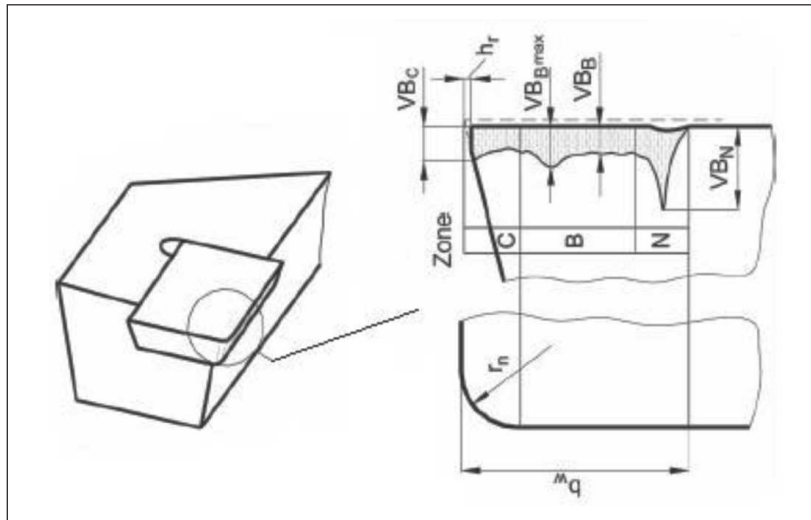
El AISI 4140 se maquinó en estado normalizado (a 50°C por encima de la temperatura crítica y enfriado al aire libre).

### 1.3. PRUEBAS REALIZADAS

La metodología que se empleó fue evaluar todas las herramientas con cada uno de los cuatro metales, excepto la herramienta de metal duro widia, que se ensayó sólo con aceros AISI 1020 y 1040 en condiciones controladas. Se variaron las velocidades de corte, avances, longitud mecanizada y se procedía a medir el desgaste máximo acumulado del flanco de la herramienta.

La medición del desgaste máximo acumulado del flanco se ilustra en la figura 3. El criterio empleado aquí fue medición de desgaste máximo en la zona B ( $VB_{B\text{MAX}}$ ) o simplemente  $V_B$ .





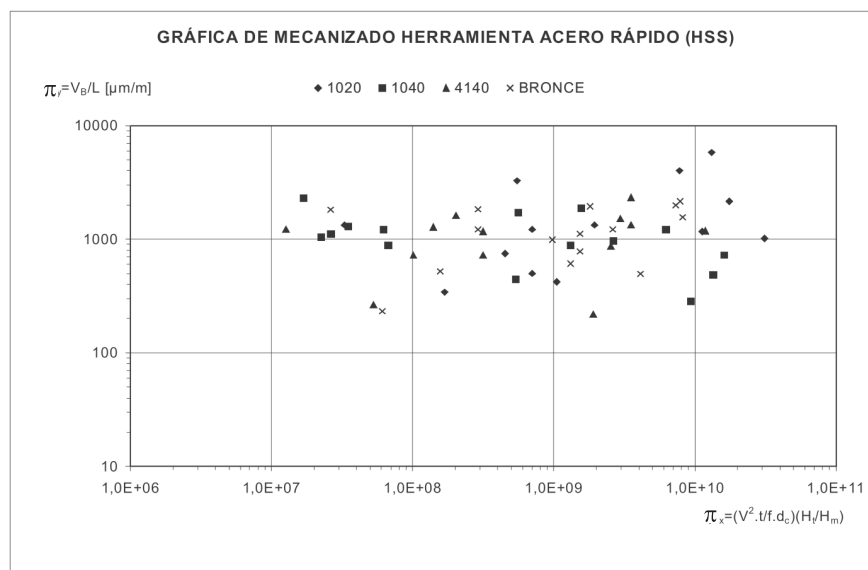
**Figura 3.** Zonas de desgaste de flanco VB de la herramienta.

**Fuente:** Astakhov V.P. The assessment of cutting tool wear, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 637–647

## 2. RESULTADOS OBTENIDOS

**Gráficas de mecanizado.** Las pruebas se realizaron en rangos de baja y media velocidad. Los resultados gráficos de los números adimensionales calculados para cada herramienta se pueden observar en las gráficas de mecanizado log-log de las figuras 4-7.

### Herramienta de acero rápido (HSS)



**Figura 4.** Comportamiento de los números adimensionales  $\pi_1$  y  $\pi_2$  y para la herramienta de acero rápido.

### Herramienta de acero rápido sinterizado (S-HSS)

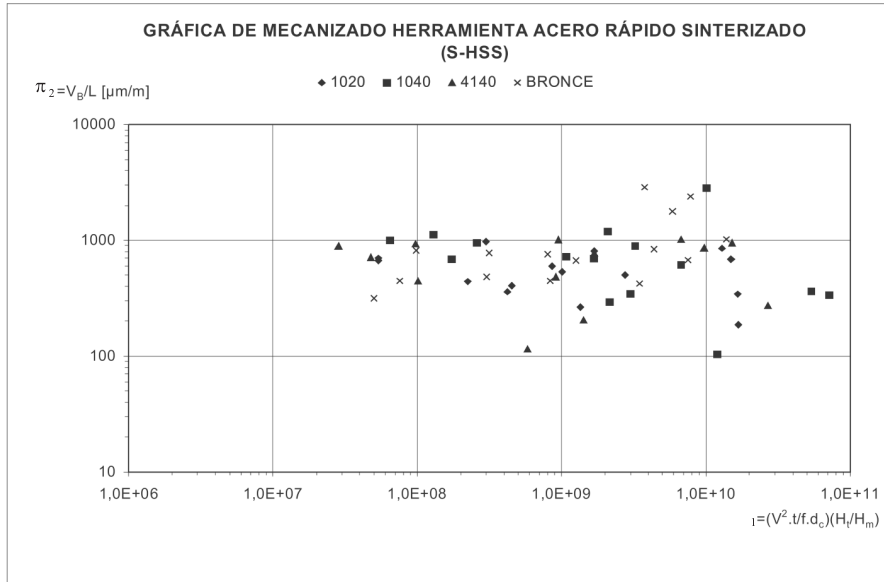


Figura 5. Comportamiento de los números adimensionales  $\pi_1$  y  $\pi_2$  para la herramienta de acero rápido sinterizado.

### Herramienta de carburo de tungsteno (WC)

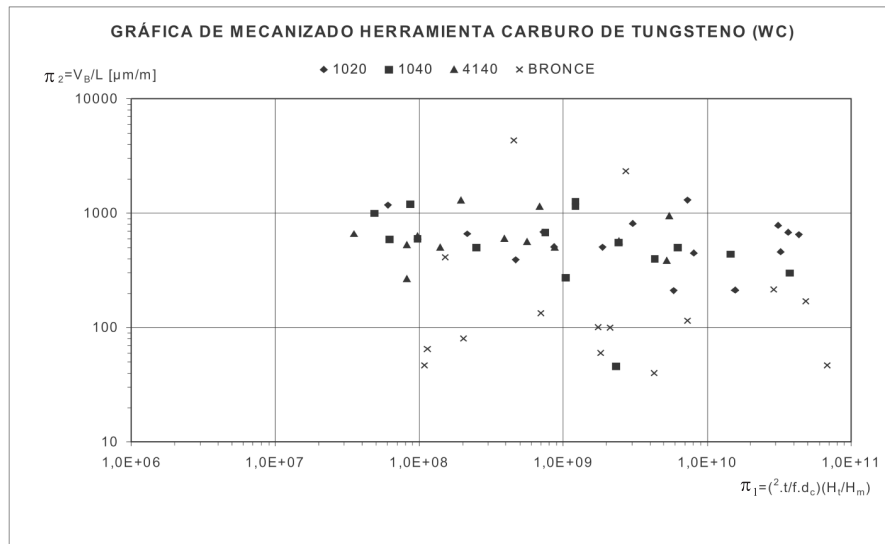
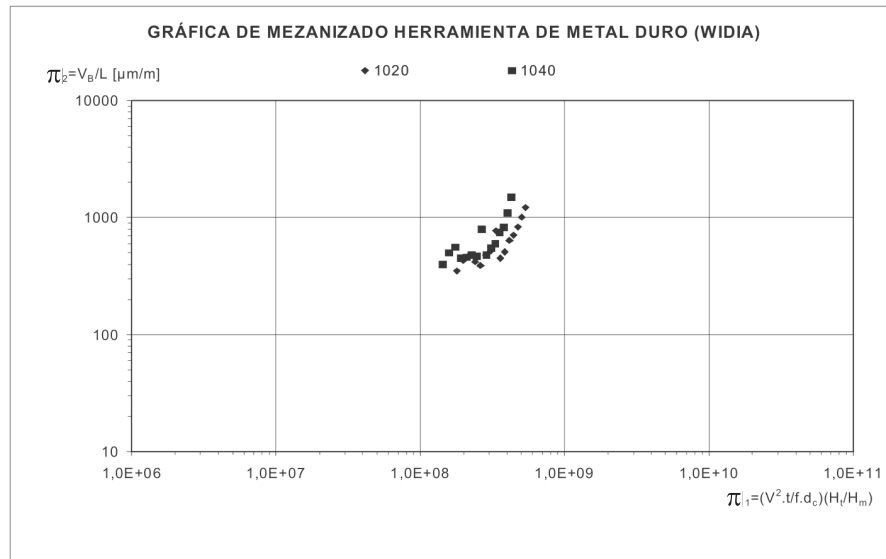


Figura 6. Comportamiento de los números adimensionales  $\pi_1$  y  $\pi_2$  para la herramienta de carburo de tungsteno.



## Herramienta de metal duro widia (WIDIA)



**Figura 7.** Comportamiento de los números adimensionales  $\pi_1$  y  $\pi_2$  y para la herramienta de metal duro widia.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las herramientas se están comportando de manera tal que a medida que aumenta el número de ensayos hay mayor aglomeración de puntos en torno a una zona geométrica particular, mostrando de alguna manera cierta convergencia alrededor del centro geométrico ( $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ) de cada figura.

De las gráficas también se visualiza que números bajos para serían adecuados para determinadas condiciones de corte, ya que son el resultado de poco desgaste de la herramienta por unidad de longitud mecanizada.

Para mayor claridad en la interpretación de los resultados se calcularon los centros geométricos de cada material. De esta forma, y con la ayuda de la hoja de cálculo de Excel 2003 se graficaron nuevamente los resultado de las cuatro herramientas (Figuras 8-11).

Las gráficas de mecanizado muestran los desgastes que tiene cada herramienta con las combinaciones de materiales. Para obtener los centróides se procedió de manera similar a como se calcula el centro de masa de una distribución discreta de masa puntuales:

$$\bar{X} = \frac{\sum m_i * x_i}{\sum m_i} \quad (3)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum m_i * y_i}{\sum m_i} \quad (4)$$

En el caso de las gráficas de mecanizado el cálculo del centro geométrico se calcula por las expresiones (5) y (6).

$$\pi_{1*} = \frac{\sum \pi_{1i}}{\sum n_i} \quad (5)$$

$$\pi_{2*} = \frac{\sum \pi_{2i}}{\sum n_i} \quad (6)$$

El centróide viene a significar la tendencia de cada combinación material-herramienta hacia un punto, el cual puede variar ligeramente de acuerdo al número de ensayos realizados.

Para entrar a comparar herramientas con diferentes materiales es necesario emplear condiciones de corte similares que permitan obtener conclusiones de los gráficos de mecanizado. Por la variedad de condiciones de corte en los ensayos con HSS, S-HSS y WC, es posible que las gráficas no arrojen resultados definitivos que faciliten la comparación de herramientas.

En la gráfica de mecanizado con herramienta *widia*, por las condiciones controladas en las que se llevaron a cabo los ensayos, es posible obtener conclusiones más confiables.

### Centrroides para herramienta de acero rápido (HSS)

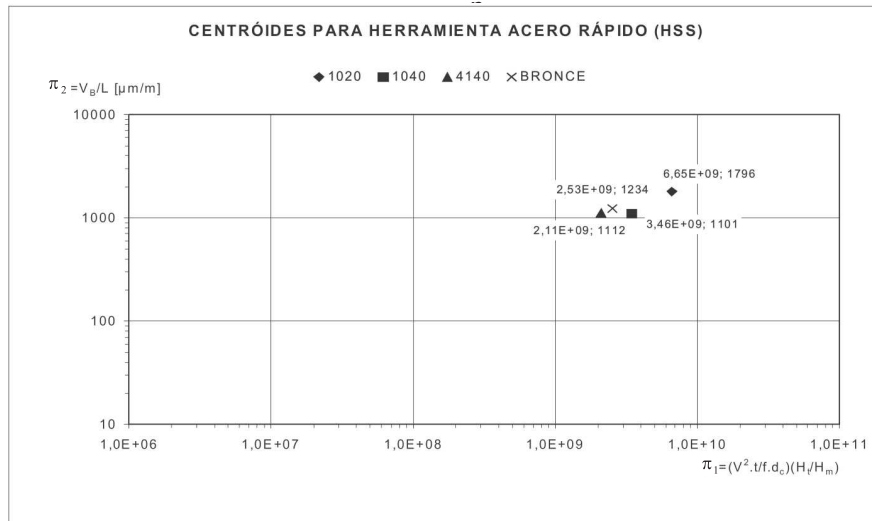


Figura 8. Centroides de materiales mecanizados con herramienta de acero rápido (HSS).

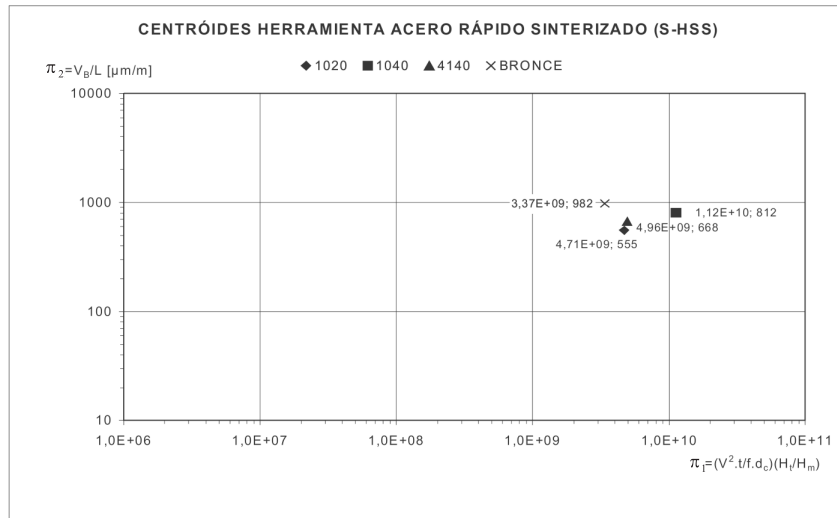
Acero 1020: (6.65E+09, 1796)

Acero 1040: (3.46E+09, 1101)

Acero 4140: (2.11E+09, 1112)

Bronce: (2.53E+09, 1234)

## Centr ides para herramienta de acero rápido sinterizado (S-HSS)



**Figura 9.** Centr ides de materiales mecanizados con herramienta de acero rápido sinterizado (S-HSS).

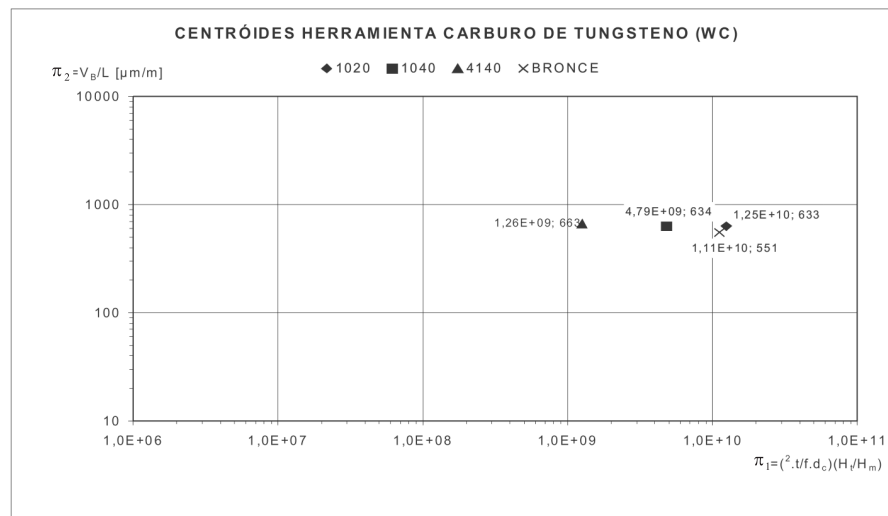
Acero 1020: (4.71E+09, 555)

Acero 1040: (1.12E+10, 812)

Acero 4140: (4.96E+09, 668)

Bronce: (2.53E+09, 982)

## Centr ides para herramienta de carburo de tungsteno (WC)



**Figura 10.** Centr ides de los materiales mecanizados con herramienta de carburo de tungsteno (WC).

Acero 1020: (1.25E+10, 633)

Acero 1040: (4.79E+09, 634)

Acero 4140: (1.26E+09, 663)

Bronce: (1.11E+10, 551)

### Centr ides para herramienta de metal duro widia (WIDIA)

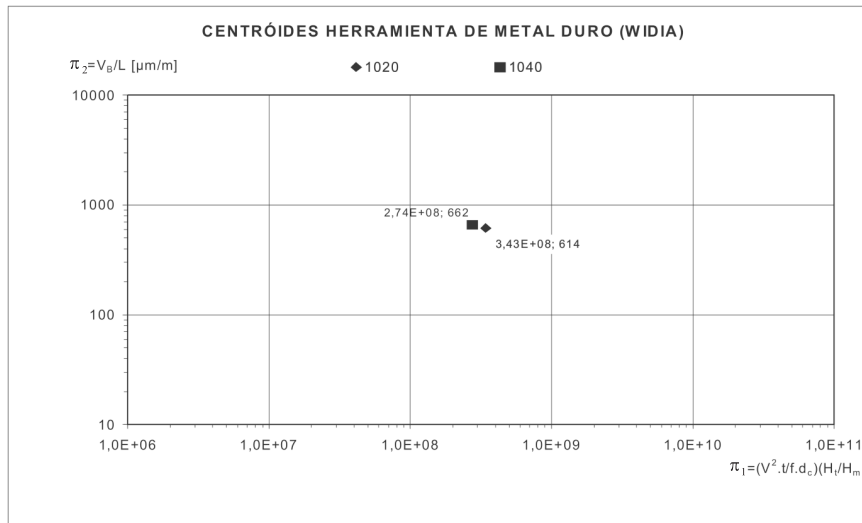


Figura 11. Centr ides de materiales mecanizados con herramientas de metal duro widia.

Acero 1020: (3.43E+08, 614)

Acero 1040: (2.74E+08, 662)

## 4. CONCLUSIONES

La técnica de análisis dimensional permitió plantear números adimensionales  $\pi_1$  y  $\pi_2$  para estudiar el desempeño de herramientas de corte en torneado.

A partir de la gráfica de mecanizado y en condiciones de corte estandarizadas, la técnica de análisis dimensional permite: seleccionar la mejor entre dos o más herramientas, elegir las condiciones de corte óptimas, elegir entre dos fluidos de corte y/o predecir la duración del filo de una herramienta.

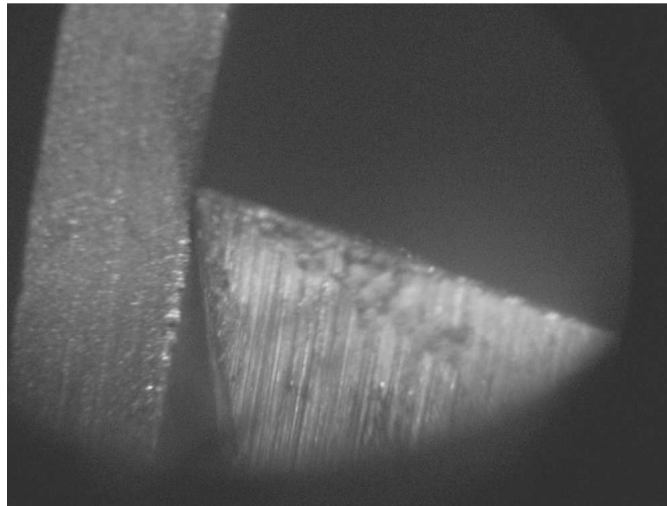
Por el significado físico de los números adimensionales  $\pi_1$  y  $\pi_2$  se puede diferenciar zonas de mayor rendimiento de la herramienta de corte y zonas de uso inapropiado de las mismas (Figura 14).

Las dos conclusiones anteriores permitirían que un operario pudiese seleccionar las condiciones de corte tal que el punto de operación de la máquina herramienta se localice en la zona de menor desgaste de flanco acumulado por longitud mecanizada.

La relación de desgaste por una longitud muestra una tendencia a 1000 micras por metro mecanizado (en la dirección de la velocidad de avance). La figura 13 ilustra esta tendencia.

En la variable de entrada no hay convergencia hacia algún valor debido a dos factores principalmente: el amplio rango de velocidades y avances aplicados y a la relación de dureza herramienta-dureza de pieza de trabajo.

Para evaluar herramientas hay que delimitar las condiciones de corte a valores preferidos tal como lo establece la referencia [1].



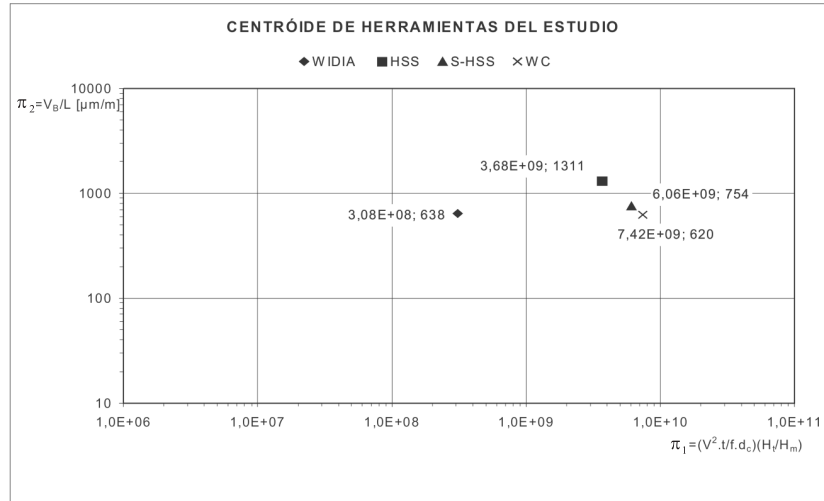
**Figura 12.** Imagen ilustrativa de la estrategia de medición del desgaste de flanco. La galga que aparece al lado de la herramienta es la longitud de referencia. Espesor: 1.06 mm. Imagen a 100X.

Al comparar las gráficas de las herramientas HSS, S-HSS, WC, y WIDIA, se nota claramente que las herramientas que se desgastan con más facilidad en las condiciones evaluadas, en su orden son: HSS, S-HSS, WIDIA y WC.

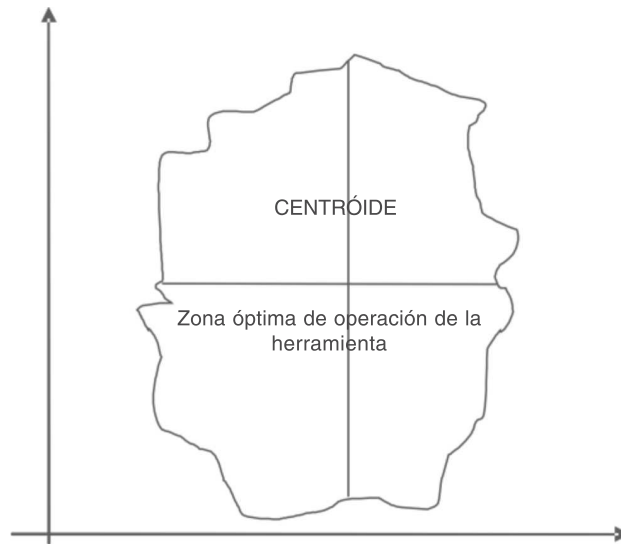
La herramienta de S-HSS tiene un desempeño muy similar a la herramienta WIDIA y WC. Se obtuvieron valores de desgaste acumulado de flanco promedio por metro mecanizado de 750, 638 y 620  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Todas las herramientas probadas tienen una zona de trabajo definida y acotada independiente del material mecanizado.

Los resultados muestran que a pesar del número limitado de ensayos realizados, cada herramienta tiende hacia un centro geométrico particular.



**Figura 13.** Gráfica resumen de la ubicación de los centros de las cuatro herramientas utilizadas en el estudio.



**Figura 14.** Esquema ilustrativo de uso óptimo e inapropiado de las herramientas de corte.

La metodología propuesta permite realizar en sayos de mecanizado en talleres que no dispongan de máquinas herramientas controladas numéricamente, tal como lo exige la norma “ANSI/ASME B94.55M-1985: Tool life testing with single point turning tools”. Es decir, los ensayos no necesariamente se deben realizar a velocidad de corte constante, base de la ecuación de Taylor para evaluar desgaste y vida de herramientas ( $vT^n = C$ ). En este sentido, la metodología constituye una alternativa para que la micro, pequeña y mediana empresa Colombiana, que en un alto porcentaje cuenta con máquinas herramientas convencionales, realice ensayos de desgaste y vida de herramienta en cilindrado.

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- [1] ANSI/ASME B94.55M-1985. Tool life testing with single-point turning tools.
- [2] ASTAKHOV V. P. 1998. Metal cutting mechanics. Boca Ratón, Florida. CRC Press. P. 233-267
- [3] AVALLONE, E. A.; BAUMEISTER III, T. 1995. Manual del ingeniero mecánico de Marks. México. Editorial McGraw-Hill,. V 2. p. 1355-1385.
- [4] FRIEDRICH, D. 2000. Desenvolvimento de insertos de aços rapidos sinterizados AISI T15 para usinagem. UFSC, Florianópolis.
- [5] MICHELETTI, G. F. 1980. Il taglio dei metalli. Turín. Editrice Torinese. P. 248
- [6] PEREZ G., C. 2004. Implementación y estudio del desempeño de pastillas intercambiables de acero rápido sinterizado en la industria metalmeccánica nacional. Trabajo de grado. Bogotá. Universidad de los Andes. 53 p.
- [7] POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. 1998. Mecánica de Fluidos. México. Prentice Hall Editores. P. 225-257
- [8] SHAW, M. C. 2005. Metal cutting principles. New York. Oxford Univerity Press. P. 2
- [9] TRENT, E. M.; WRIGHT, P.K. 2000. Metal Cutting. Boston. Butterworth-Heinemann. P. 9



