

## **Evaluación Experimental del Desempeño del Proceso de Fresado Frontal del Acero ABNT 1045 para Herramientas con Diferentes Números de Aristas**

**Durval U. Braga, Frederico O. Neves, Alex S. C. Silva y Luis G. S. Parreiras**  
Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ, Praça Frei Orlando 170 Centro,  
CEP 36.307-352, São João del Rei, MG-Brasil (e-mail: durval@ufsj.edu.br;  
fred@ufsj.edu.br; achaves@ufsj.edu.br; luisguiparreiras@gmail.com)

*Recibido Sep. 30, 2011; Aceptado Nov. 25, 2011; Versión final recibida Ene. 09, 2012*

---

### **Resumen**

Se ha usado el diseño experimental factorial, con tres réplicas y 95% de confianza, para evaluar el fresado frontal asimétrico de acero ABNT 1045. Se usaron dos niveles de velocidad de corte, dos valores de ángulo de posición y tres cantidades de aristas en el corte. La velocidad de avance y la profundidad de corte fueron mantenidas constantes, para que un mismo volumen de material fuese retirado por ensayo. Los resultados muestran un aumento de la potencia consumida por la disminución del ángulo de posición como consecuencia del aumento de la resistencia específica de corte con la fuerza de cizallamiento distribuida sobre una sesión transversal de la herramienta. Se concluye que las variables estudiadas influyen y existe interacción entre ellas en el proceso de fresado frontal asimétrico.

*Palabras clave: fresado frontal, proceso de fabricación, mecanizado, acero ABNT 1045, aristas de corte*

## **Experimental Evaluation of Face Milling Process of ABNT 1045 Steel for Tools with Different Number of Teeth**

### **Abstract**

Experimental factorial design, with three replica and 95% of confidence, has been used for evaluating the asymmetrical face milling of ABNT 1045 steel. Two levels of cutting speed, two levels of position angle and three levels of cutting edges were employed. Feed rate and cutting depth were maintained at a constant value so the same volume of material in each test is removed. The results showed that the power consumed increased as the position angle was reduced, due to the increase of the specific cutting resistance by distributed shear force over the transversal section of the cutting tool. It is concluded that the variables studied have influence on the results and that they are interrelated in the process of asymmetrical frontal milling.

*Keywords: face milling, machining, manufacturing process, ABNT 1045 steel, cutting edges*

## INTRODUCCIÓN

Durán et al. (2008), comentan La Planificación de Procesos de Fabricación es una actividad que está dedicada a la definición de todas las instrucciones y parámetros necesarios para fabricar un determinado producto o componente. Según Sarache (2007) En la actualidad, ya que la mayoría de los centros de mecanizados utilizan un proceso de planeado con una fresa frontal, esta operación como básica para cualquier proceso, de allí la importancia de determinar y controlar algunas variables que siendo significativas, permitan un uso racional de consumo de energía.

Según Benardos y Vosniakos (2002), el fresado posee papel fundamental en los procesos de fabricación de los más variados ramos de la industria mecánica, siendo, después del torneado los más importantes por su productividad, flexibilidad y, especialmente, por su acabado superficial. De acuerdo con Melo et al. (2003), la investigación científica de los fenómenos ligados a los diversos procesos de mecanizado es de extrema importancia para el avance tecnológico de esta área de la fabricación mecánica. Los autores realizaron sus estudios manteniendo un volumen de astilla removida constante, variando la velocidad de corte y el ángulo de posición de la arista principal de corte. Sus resultados muestran que hay una mayor influencia del número de aristas simultáneas en el corte que el aumento de la velocidad de corte sobre la potencia consumida en el proceso de fresado frontal del Acero ABNT 1045. También mostraron que los esfuerzos de mecanizado no presentan crecimientos proporcionales al número de aristas simultáneas en el corte y que todas las variables analizadas interfieren en los esfuerzos de mecanizado y las mismas interactúan entre sí. Da Silva y otros (2011) han investigado la influencia de la lubricación en fresado frontal de aceros ABNT 1047, principalmente en relación a el desgaste de las aristas de corte con conclusiones similares.

El fresado frontal es aquel en que la superficie mecanizada resulta de la acción combinada de los filos localizados en la periferia y en la faz frontal de la fresa, esta generalmente en ángulo recto al eje de la herramienta (Weingaertner, 2006). El fresado frontal es uno de los métodos más eficaces para la fabricación de productos de alta precisión además de ser de relativamente bajo costo y alta productividad (Fang, 2001). Costa et al. (2003), comentan que el fresado puede ser dividido en simétrico y asimétrico donde el segundo permite mejores condiciones de trabajo, reduciendo entre otros, las vibraciones, los esfuerzos por diente y el impacto en la entrada de la arista en la pieza. Diniz et al. (2005), recomiendan utilizar un valor de  $j$ , Fig. 1, pequeño, ya que la espesura mayor que cero se refiere a la reducción de la presión específica de corte y, consecuentemente, de los esfuerzos de corte.

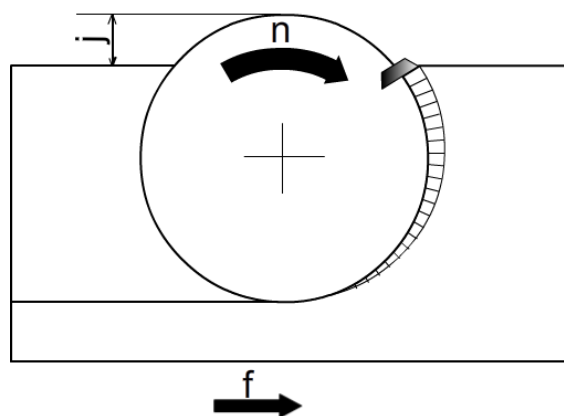


Fig.1: Posición de la herramienta en la pieza para un fresado frontal asimétrico

Algunos elementos sobre la posición relativa herramienta-pieza, tales como entrada de la arista de corte, salida de la arista de corte, largura de corte, cantidad de aristas simultáneamente en el corte y esfuerzos de corte, tienen gran influencia en el resultado de la mecanizado (Caldeirani, 2002). Estos aspectos son discutidos en la sección siguiente.

La correcta determinación del número de aristas a ser utilizadas tiene influencia directa sobre el acabo de la superficie generada, la fuerza y la potencia de corte, la vida de la herramienta y el

tiempo de corte, y, también, la potencia consumida en el proceso. Para condiciones de corte constantes, un aumento en el número de aristas de la herramienta resulta en mayor energía específica de remoción de material (Santos 2001). Esto se encontró en la pesquisa de Anderson y otros (2011), en la cual también se mostró que las posiciones radiales y axiales influyen la potencia de corte. Las configuraciones angulares entre la herramienta y el material de trabajo definen la geometría de la cuña de corte de la herramienta y están directamente relacionadas a la eficiencia del corte, pues influye de manera decisiva el mecanismo de formación de la astilla, la vida de la herramienta, los esfuerzos de corte y, hasta determinan las condiciones de mecanizado para un determinado proceso. En relación a la vida de la herramienta, puede afirmarse que la reducción del número de aristas de corte aumenta la vida de la herramienta si los parámetros de corte han sido mantenidos constantes (Richetti y otros, 2004). La operación de fresado frontal los ángulos de posición normalmente utilizados en herramientas son 45°, 60° y 75°. A medida que  $\chi_r$  disminuye, la anchura de corte (b) aumenta y la espesura de corte (h) disminuye. De esta forma, la fuerza de corte necesaria para el cizallamiento del material es distribuida sobre una sección transversal de astilla más fina, implicando en una mayor presión específica de corte. Por este motivo una mayor potencia de corte es requerida para mecanizado con ángulos de posición menores.

Las herramientas de paso fino son más ventajosas para el mecanizado de materiales frágiles. Las herramientas de paso ancho, resultan en un acabado superficial más grotesco y en un mayor esfuerzo por arista de corte. Esa condición de mecanizado es favorable en operaciones donde un número excesivo de dientes, cortando simultáneamente, pueda causar vibraciones o en casos donde la baja potencia de la máquina es un factor limitador de las tasas de remoción de la astilla. Weingaertner (2006) sostiene que durante el fresado cada diente de la herramienta está sujeto a una carga de impacto cuando entra en la región de corte. La magnitud de esta carga depende del material de la pieza, de la posición de la herramienta, de los parámetros de mecanizado y de la geometría de la herramienta. Las fuerzas en el fresado son cíclicas y fuertemente proporcionales a la espesura de corte en cada posición.

De acuerdo con Sekulic et al. (2010) en el fresado frontal, las fuerzas de corte ejercida por los dientes frente a la fresa en la pieza de trabajo son cambiantes en el tiempo y el espacio de la corte. De estas fuerzas, solamente la fuerza activa consume potencia, por estar en el plano de trabajo y ser formada por la suma vectorial de las fuerzas de corte y de avance, sin embargo otras acciones no relacionadas a esas fuerzas como el flameado en el cuadro de herramientas depende directamente de la fuerza pasiva, ejerciendo influencia en el desgaste y en la fuerza efectiva de corte. Según Gomes (2004) et al. La ecuación de la fuerza de corte ( $F_c$ ) para la fresa frontal es obtenida por intermedio de la ecuación modificada de Kinzle (1).

$$F_c = K_s \times a_p \times f_z \quad (1)$$

Según Saranche (2007) en el fresado, el movimiento principal de corte está a cargo de la herramienta, de modo que, el desplazamiento de alimentación es dado por la mesa de fresar a la pieza, donde cada uno de los dientes de la herramienta corta una viruta en forma de cuña, entonces, el espesor de la viruta pasa de un valor mínimo a un valor máximo en el proceso y que dependerá: del movimiento de alimentación, del diámetro de la fresa utilizada y de la profundidad de corte. Esta característica del trabajo basado en los dientes o sus ángulos de filo, sometidos a esfuerzos variables producto del cambio de un mínimo a un máximo de las fuerzas actuantes, ha cobrado mucho interés por estar asociadas a la generación de superficies de ultra o nano precisión, donde la evaluación de la potencia consumida no puede tratarse de manera aislada, sino asociada a la combinación de factores que inciden en los gastos energéticos. Considerando las variaciones de la fuerza de corte, de la espesura de la astilla (h) y del número de aristas en contacto con la pieza (z), se tiene potencia consumida durante la operación de fresado también variable. Por esta razón, se utiliza un valor medio de  $K_s$  ( $K_{sm}$ ) para una espesura media de corte ( $h_m$ ). La potencia media de corte es dada por la ecuación 2.

$$P_c = K_{sm} \times h_m \times V_c \quad (2)$$

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos fueron programados y distribuidos utilizando un Diseño Experimental Factorial lo cual asegura una confiabilidad del 95% en el análisis, y de forma aleatoria por niveles indicados por los índices i, j y k respectivamente, mostrados en la tabla 1. El nivel (i) es el número de dientes de la herramienta  $Z_1 = 2$ ,  $Z_2 = 4$  y  $Z_3 = 8$  aristas, el nivel (j) corresponde a las dos velocidades de corte  $V_{c1} = 360$  m/min y  $V_{c2} = 440$  m/min y, finalmente, el nivel (k) para las condiciones de ángulo de posición de la herramienta  $\chi_{r1} = 45^\circ$  y  $\chi_{r2} = 65^\circ$ .

Tabla 1: Distribución de los ensayos según un planeamiento experimental

	Z1= 2		Z2 = 4		Z3 = 8	
	$V_{c1}$	$V_{c2}$	$V_{c1}$	$V_{c2}$	$V_{c1}$	$V_{c2}$
$\chi_{r1} = 45^\circ$	111a	121a	211a	221 <sup>a</sup>	311a	321a
	111b	121b	211b	221b	311b	321b
	111c	121c	211c	221c	311c	321c
$\chi_{r2} = 65^\circ$	112a	122a	212a	222 <sup>a</sup>	312a	322a
	112b	122b	212b	222b	312b	322b
	112c	122c	212c	222c	312c	322c

Para la realización de los ensayos se utilizó una fresadora Romi modelo Interact IV, con rotación máxima de 4000 rpm y la potencia eléctrica de 16,4 kW (22 CV). El cuerpo de prueba fue montado sobre una plataforma dinamométrica Kistler 9265B, para monitoreo de las componentes de la fuerza de mecanizado, como mostrado en la Fig. 2.

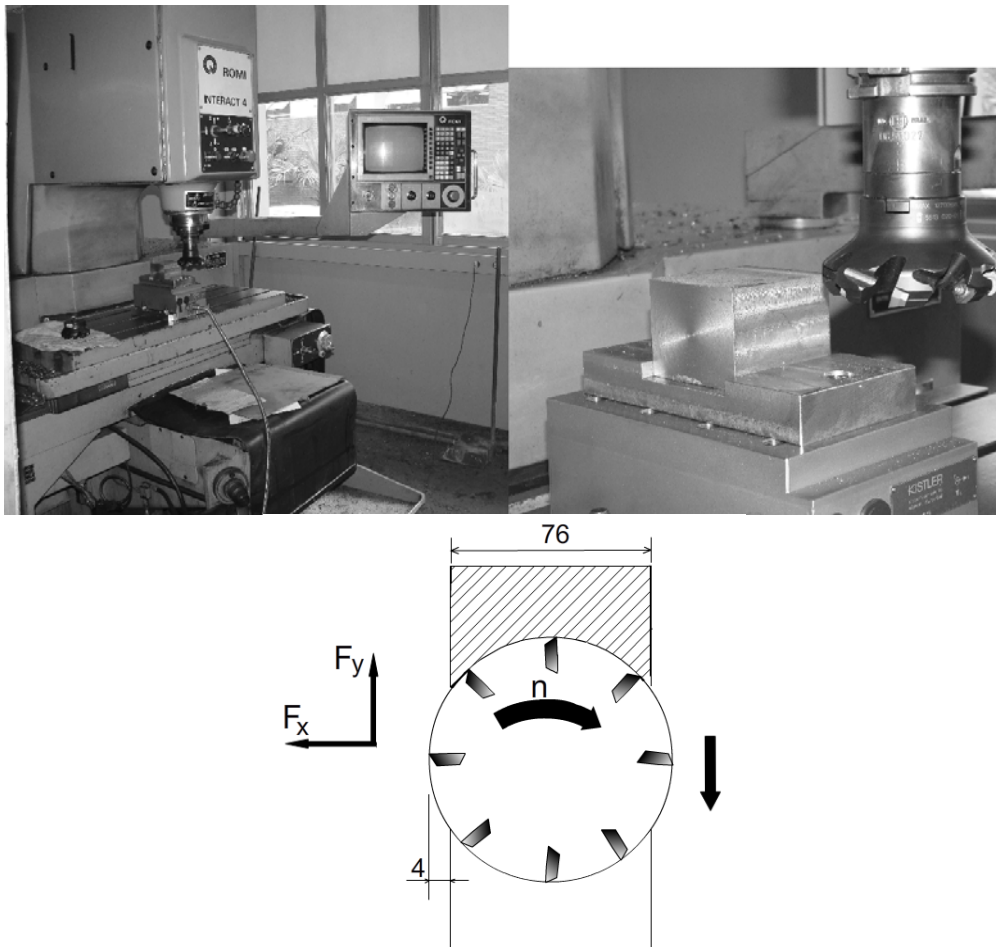


Fig. 2: Montaje y preparación del experimento.

La adquisición de la potencia se hizo a través del monitoreo de la corriente eléctrica del motor, utilizándose de un sensor de corriente por efecto Hall, modelo NW-SCD-50-R, cuya franja de amperaje es de 0 (A) a 50 (A), la tensión de alimentación del sistema es de  $\pm 9$  (VDC) y la señal de salida en la franja de 0 (VDC) a 5 (VDC). Las señales, tanto de fuerza como de potencia, son convertidos de analógico para digital (A/D) y captados por el sistema PowerDAQ modelo PD2-MFS-8-500/14. Para análisis de estas señales fueron utilizados un microcomputador y el software Labview 8.1 de la National Instruments.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cada ensayo realizado fueron monitoreadas doce señales de fuerza y potencia y consideramos su media de acuerdo con la tabla 2. Para analizar los datos de la Tabla 2 arriba se hicieron gráficos como en las Fig.3 y Fig.4, respectivamente.

Tabla 2: Resultados medios para los esfuerzos y potencia consumida.

	Z2							
	$V_{c1} = 360$ m/min				$V_{c2} = 440$ m/min			
	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	P (W)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	P (W)
$\chi_r = 45^\circ$	1140	941	339	4700	584	467	206	3580
$\chi_r = 65^\circ$	954	797	323	4077	839	616	289	3877
	Z4							
	$V_{c1} = 360$ m/min				$V_{c2} = 440$ m/min			
	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	P (W)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	P (W)
$\chi_r = 45^\circ$	684	533	516	4602	646	521	531	4618
$\chi_r = 65^\circ$	683	466	394	4491	594	393	359	4351
	Z8							
	$V_{c1} = 360$ m/min				$V_{c2} = 440$ m/min			
	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	P (W)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	P (W)
$\chi_r = 45^\circ$	959	786	677	5397	862	726	632	5341
$\chi_r = 65^\circ$	786	533	535	5069	682	477	503	5117

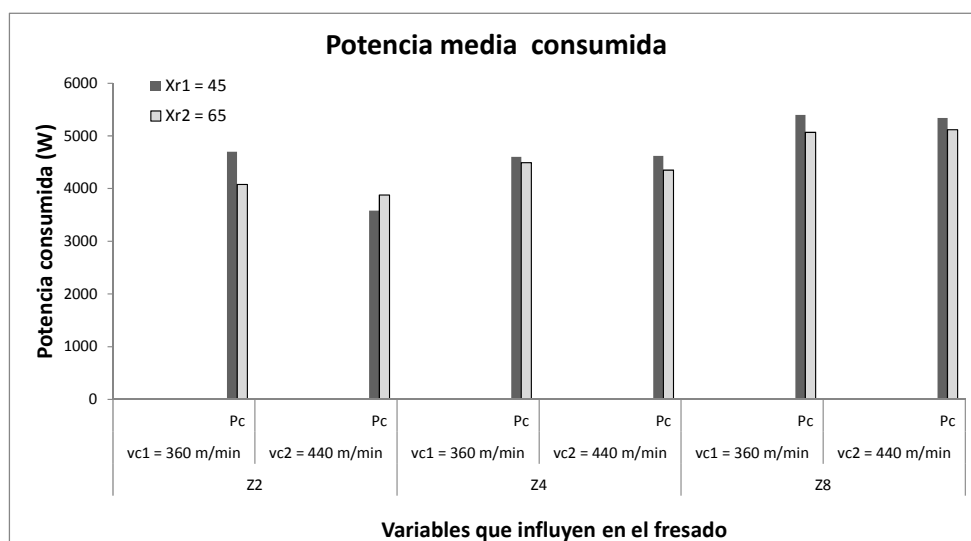


Fig. 3: Potencia de corte versus velocidad de corte, aristas y ángulo de posición.

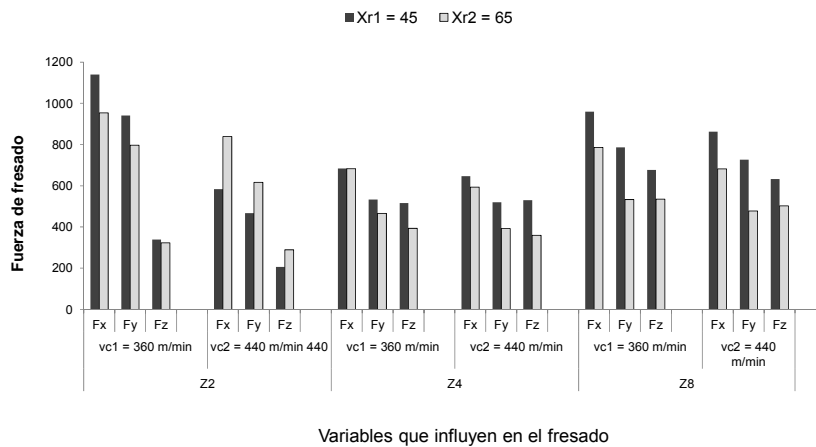


Fig. 4: Esfuerzos de corte versus velocidad de corte (m/min), aristas y ángulo de posición.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados y la discusión presentada, se puede concluir las siguientes conclusiones principales:

- i) Se puede decir con confianza 95% que todas las variables analizadas interfieren en el proceso, así como las mismas interfieren entre sí;
- ii) Para la condición de contraste de las variables se debe optar por mecanizado con velocidades de corte 360 m/min, pasos medios (4 dientes) independientes del ángulo de posición  $\chi_r$ , debiéndose evitar valores bajos de ángulo de posición  $\chi_r$  y velocidad de corte;
- iii) La potencia consumida aumentó con la disminución del ángulo de posición ( $\chi_r$ ), como era de esperarse, pues la fuerza de cizallamiento fue distribuida sobre una sesión transversal de herramienta generando mayor presión específica de corte;
- iv) Para un mismo paso, el aumento de la velocidad de corte minimiza los esfuerzos en el fresado;
- v) El aumento del número de dientes de la herramienta aumentó las fuerzas de mecanizado independiente del aumento de la velocidad de corte; y
- vi) Existe una tendencia de esfuerzo (F<sub>x</sub>, F<sub>y</sub> e F<sub>z</sub>) mínimo para las condiciones medias de Zi.

## AGRADECIMIENTOS

Los responsables por la investigación agradecen a la Universidad Federal de Uberlândia, en especial a los investigadores del LEPU, por el cambio de experiencia y ayuda en la realización de los testes y al Programa PIBIC/FAPEMIG por haber proporcionado los recursos para la realización de la investigación.

## REFERENCIA

- Andersson, C., Andersson, M. J. y Ståhl, E., Experimental studies of cutting force variation in face milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(1), 67-76, (2011).
- Benardos, P.G y Vosniakos, G.C., Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*:18(5-6), 343-354, (2002).
- Caldeirani Filho, J. y Diniz, A. E., Influence of Cutting Conditions on Tool Life, Tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process, *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*: 24(1), 1-10 (2002).
- Costa, A.R., Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Insertos Intercambiáveis. Tesis de Maestría, Fac. Eng. Mecânica – UNICAMP, Campinas, Brasil (2003).
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. y Coppini, N. L., *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 5ª edición, pp. 244, Artliber Ed., São Paulo, Brasil (2006).
- Durán, O, Rodríguez, N and Consalter., L.A Definición Automática de la Geometría de Herramientas de Corte usando Algoritmos Genéticos. *Inf. Tecnol.*, 19(2), 51-58. (2008).
- Fang, N., Characteristic Variations of Chip Morphology and Cutting Forces in Face Milling with Flat-Faced and Grooved Tool Inserts. *JSME International Journal: series A*, 46(3), 230-236, (2003).
- Gomes, J.O. y Vallejos, R.V., Análisis de la Utilización de Fresas de Punta Esférica de Filos Helicoidales y Rectos para el Afinado de Superficies Complejas en Acero H13 (48 HRC). *Inf. Tecnol.*: 15(4), 31-38, (2004).
- Guenza, J.E., Análise do Desempenho do Fresamento em Altas Velocidades de Corte do Ferro Fundido GG25 em Aplicação Industrial. Tesis de Maestría, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil (2008).
- Melo, A.C.A. y otros tres autores, Investigação Experimental da Temperatura de Usinagem no Fresamento de Topo com a Variação da Velocidade de Corte e da Penetração de Trabalho. Citas del 9º Colóquio de usinagem, 1-8, Uberlândia, Brasil (2003).
- Richetti, A. y otros 4 autores, Influence of the number of inserts for tool life evaluation in face milling of steels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(7-8), 695-700, (2004).
- Santos, A.L.B., Metodologia Via Redes Neurais para a Estimativa da Rugosidade e do Desgaste de Ferramentas de Corte no Processo de Fresamento Frontal, Tesis de Doctorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil (2001).
- Saranche, L.M., Gu dez, V.M. y Ramírez, R., Análisis Multifactorial Del Consumo Energético de un Proceso de Fresado Frontal. *Inf. Tecnol.* 18(1), 67-72, (2007).
- Sekulic, M. y otros tres autores, The influence of mechanical properties of workpiece material on the main cutting force in face milling. *Metalurgia*, 49(4), 339-342, (2010).
- Weingaertner, W.L. y otros tres autores, Evaluation of high-speed end-milling dynamic stability through audio signal measurement. *Journal of Materials Processing Technology*, 17(9), 133-138, (2006).
- Da Silva, M.B y otros. Analysis of wear of cemented carbide cutting tools during milling operation of gray iron and compacted graphite iron. *Wear*, 27(9-10), 242-62432, (2011).

