

## Optimización de las condiciones de corte en el maquinado de madera. Estimación del desgaste del elemento de corte en fresado

Cutting condition optimization in wood machining. Tool wear estimation

A. AGUILERA <sup>1</sup>, P. J. MEAUSOONE <sup>2</sup>, P. MARTIN <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Tecnología de Productos Forestales, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile, e-mail: [aguilera@uach.cl](mailto:aguilera@uach.cl)

<sup>2</sup>ENSTIB. 27, rue du Merle Blanc - B.P. 1041, 88051 Epinal Cedex 9, France.

<sup>3</sup>ENSAM. 4, rue Augustín Fresnel Technopole 2000, 57078 Metz Cedex 3, France.

### SUMMARY

The Tool Material Couple application allows optimal cutting conditions to be set. These conditions determine the cutting speeds for maximum tool life and act as criteria to help solve tool wear problems by determining the point at which tools are no longer safe to operate. Measures of the cutting forces explain the behavior of the components during machining, and show an interesting evolution of the angle between the result component of the main cutting force  $F_c$  and the component of the tangential force  $F_y$ . This angle remained constant during 3000 m of machined MDF with a low chip thickness. It is possible to determine the effective machining time, the moment of the increased cutting force, and its angular variation. This can also be useful in determining the maximal length of cut for a specific tool, with conditions of correct surface roughness. The evolution of these changes can be followed and the value of both components of the cutting force determined precisely. The normal component of the cutting force is a critical factor in the angle variation.

*Key words:* cutting, MDF, wear, tool, COM.

### RESUMEN

La aplicación de la metodología de la Cupla Herramienta de Corte-Materia (COM) permite fijar las condiciones de corte. Estas condiciones permiten encontrar las velocidades de corte que maximizan la duración de vida del elemento de corte. Ellas han conducido hacia la problemática de la determinación del desgaste del elemento de corte como criterio determinante cuando la herramienta de corte alcanza un límite aceptable de trabajo. Se miden los esfuerzos de corte y se observa el comportamiento de la herramienta respecto de la distancia maquinada. Los resultados muestran una evolución muy interesante del ángulo comprendido entre la resultante del esfuerzo de corte  $F_c$  y la componente del esfuerzo de avance  $F_y$ . Este ángulo se mantiene constante durante los primeros 3.000 metros de MDF maquinados. Es posible conocer así el tiempo efectivo de maquinado, el momento cuando se produce el aumento del esfuerzo de corte y su variación angular. Es posible también determinar la longitud máxima de maquinado para la herramienta utilizada, con condiciones correctas del estado superficial de la pieza, además de seguir la evolución de estos cambios y también de conocer con una buena precisión el valor de los dos componentes del esfuerzo de corte. La componente normal del esfuerzo de corte es el factor crítico sobre la variación del ángulo.

*Palabras claves:* corte, MDF, desgaste, herramienta, COM.

## INTRODUCCION

Se estudia la aplicación de la metodología de la Cupla Herramienta de Corte-Material (COM) en el material madera. El COM es una metodología que ha sido desarrollada para ser utilizada en la industria de los metales. Su objetivo es el de definir con un número reducido de ensayos las condiciones óptimas de corte para una herramienta que trabaja sobre un material determinado. Los aspectos fundamentales tomados en cuenta son: la caracterización de la herramienta de corte (geometría y proceso de corte) y el conocimiento de la materia. En el caso de la madera, se trata de conocer bien sus características físicas (contenido de humedad y densidad) y mecánicas. Las ventajas que presenta esta metodología son las de reducir el tiempo de puesta a punto de una nueva producción y la de reducir las demoras en la industrialización.

Así, el objetivo último del COM es el de seleccionar las condiciones de corte que optimicen la velocidad de corte y la velocidad de avance. Estas condiciones maximizan de esta manera el tiempo de maquinado y minimizan el riesgo de ruptura de los elementos de corte.

Los problemas de determinación del desgaste del elemento de corte residen en la dificultad de poder cuantificarla. La industria mecánica utiliza el modelo de Taylor, pero la determinación de ciertas constantes es muy difícil para el caso de la madera. Algunas identificaciones prácticas son utilizadas (proyector de perfil y laser entre otros), pero el valor del desgaste es difícilmente cuantificable por estos métodos, porque demandan un posicionamiento perfecto del elemento de corte.

La imprecisión en la medición del desgaste del elemento de corte ha incentivado el desarrollo de un nuevo método, teniendo en cuenta al esfuerzo de corte y su dirección respecto de la cara de corte de la herramienta.

El método propuesto permite conocer la variación angular del esfuerzo de corte y de definir correctamente los factores "longitud maquinada" y "tiempo de maquinado". Una variación importante de éste ángulo permite fijar un límite de maquinado, siguiendo la Cupla Herramienta de Corte-Materia (COM) estudiada. Esta investigación dará en el futuro el conocimiento real del desgaste del elemento de corte en función del material maquinado.

La cuantificación del desgaste del elemento de corte tiene una gran importancia en el trabajo de la madera. En efecto, el desgaste progresivo genera un aumento del consumo de potencia de las máquinas y un deterioro de la superficie de la pieza. Se puede definir el desgaste como la pérdida de material de la arista de corte, debido a factores mecánicos y/o químicos asociados al proceso de corte. Los factores dependientes del elemento de corte, de las condiciones de corte y del material están íntimamente relacionados.

Un aspecto muy importante es la relación entre el desgaste del elemento de corte y los esfuerzos de corte. Es posible detectar el desgaste de los elementos de corte comparando la dirección de los esfuerzos de corte medidos con una herramienta nueva, y aquellos obtenidos con otro en uso (Anselmetti 1996).

En el caso del perforado, la determinación de los esfuerzos puede realizarse con una vigilancia automática del maquinado, siendo útil para detectar el límite del desgaste de los elementos de corte. Así, se puede hacer un control directo por medio de un sensor que mide directamente el desgaste sobre el elemento de corte, o indirectamente deduciendo el desgaste por la variación de un factor externo como lo es la medición de los esfuerzos de corte (Furet y Paturange 1996). Estos autores encontraron para el esfuerzo axial un aumento progresivo del esfuerzo, aumentando el número de perforaciones realizadas. Este aumento del esfuerzo se debe al desgaste en despulla de la arista de filo. Lo anterior trae como consecuencia un aumento del esfuerzo de penetración.

El proceso de desgaste del elemento de corte respecto a la longitud de madera maquinada muestra tres zonas características: el rechazo de la arista es importante al inicio (zona 1 de rodaje), una zona de estabilidad (zona 2 lineal) caracterizada por el trabajo "normal" de la herramienta, y una zona 3 que aparece cuando el elemento de corte ha alcanzado un desgaste importante, haciendo aumentar sensiblemente el rechazo de la arista. Normalmente cuando la herramienta trabaja en la zona 2 presenta una cierta variación angular debido a cambios en el esfuerzo de corte. El valor medio del esfuerzo normal se anula y el esfuerzo tangencial se mantiene constante. Según Franz (1958) existe una disminución del esfuerzo normal que tiende a cero cuando el ángulo de corte se aproxima a  $25^\circ$ . En la dirección de corte B, es decir, aquella dirección en la cual la superficie

trabajada y el movimiento de la herramienta son paralelas a las fibras, un ángulo de corte de  $10^\circ$  es un valor mínimo y su disminución puede generar un aumento de la energía de corte. Además, a  $10^\circ$  se encuentra el punto de cambio de signo, es decir, el valor para el esfuerzo de deformación de la viruta es igual a cero.

En los factores dependientes de la herramienta de corte es necesario hacer notar la relación existente entre la geometría de corte y el esfuerzo. En el caso del ángulo de corte, las leyes de corte muestran que el esfuerzo impuesto sobre un diente disminuye en forma continua cuando este ángulo aumenta. Para el ángulo de despulla, el esfuerzo no varía de una manera significativa (Chardin y Froidure 1968). Para la velocidad de corte, el esfuerzo es invariable cuando ésta varía entre 5 y 50 m/s: la velocidad de corte no tiene influencias significativas sobre el esfuerzo (Kivimaa 1950).

Los cambios de la geometría del perfil, debido al desgaste, están más correlacionados a los rendimientos de la herramienta que a la cantidad de desgaste (Sheikh-Ahmad y McKenzie 1997). De esta manera, la calidad superficial y la componente normal del esfuerzo son muy sensibles a los cambios de la geometría del perfil.

## MATERIAL

Se trabajó con una máquina desfondadora con control numérico CNC "Dubus" con las siguientes características:

- potencia máxima del motor de 1,5 kW,
- velocidad de rotación variable de 1.800 a 12.000 rpm,
- velocidad de avance variable de 0 a 180 m/min.

La herramienta de corte utilizada tenía las características siguientes:

- diámetro: 14 mm - número de dientes: 1
- ángulo de ataque:  $18^\circ$  - material del diente: carburo
- ángulo del perfil:  $57^\circ$

Las condiciones de corte se eligieron según los datos proporcionados por la determinación de la zona óptima de corte utilizando el método COM (Aguilera 2000). Estas fueron:

- velocidad de corte : 6,46 m/s
- profundidad de corte : 2,0 mm
- ancho de corte : 5,0 mm
- espesor de viruta : 0,17 y 0,38 mm
- sección de corte inferior de :  $10 \text{ mm}^2$
- flujo de corte inferior de :  $40 \text{ cm}^3/\text{min}$

El material utilizado fue un tablero de fibras MDF con una humedad constante de 7% y una densidad para la zona de corte de  $890 \text{ kg/m}^3$  (Aguilera *et al.* 2000). Los parámetros de corte son ilustrados en la figura 1.

Las mediciones de potencia se realizaron con un wattímetro y una tabla trazadora. Los esfuerzos de corte se midieron con la ayuda de un dinamómetro piezoeléctrico, y la medición del estado superficial con el sistema laser-visión "Topovise" desarrollado en el ENSTIB (Triboulot *et al.* 1995).

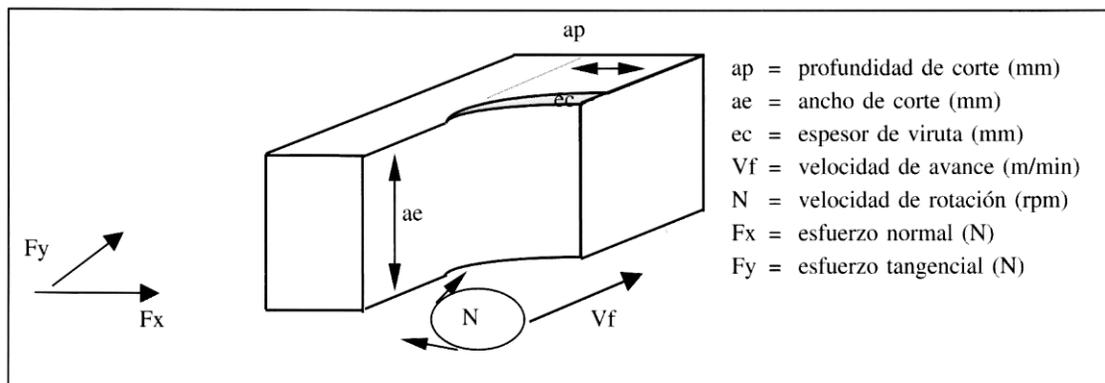


Figura 1. Parámetros de corte.  
Cutting parameters.

## METODOLOGIA

Se desarrolló una serie de ensayos que permitieron encontrar el dominio de validez residual de la herramienta de corte (Aguilera 2000). Para llegar a esto se aplicó la metodología COM descrita por las normas Afnor XP E 66-520-6 (AFNOR 1995). Esta metodología está compuesta por el programa de ensayos siguientes:

- ensayo de calificación,
- determinación de la velocidad de corte mínima,
- determinación de la zona de espesor de viruta mínimo-máximo,
- determinación de los datos límites,
- ensayo de desgaste,
- determinación de los parámetros auxiliares.

El objetivo de la aplicación de esta metodología es el de definir las condiciones óptimas de corte para una herramienta específica que trabaja sobre una materia conocida, de manera que la vida útil del elemento de corte sea maximizado y el estado superficial de la pieza sea correcto. El posicionamiento de la herramienta respecto de la materia se muestra en la figura 2.

Los principales criterios para observar el desgaste del elemento de corte son:

- El aumento de la potencia de corte,
- El aumento de los esfuerzos de corte,
- La determinación del estado superficial.

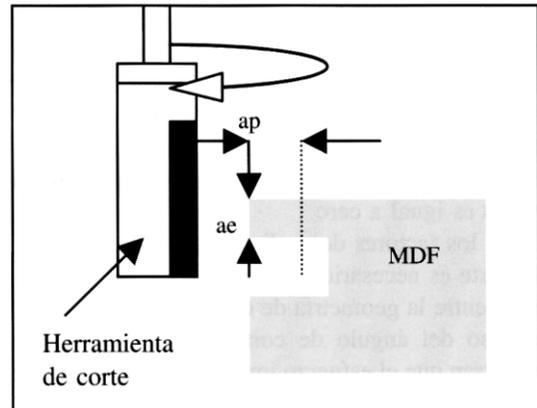


Figura 2. Posicionamiento de la herramienta de corte respecto de la materia.

Cutting tool position in relation to the wood material.

Después de la realización de estos ensayos se aumenta el espesor de viruta desde su valor mínimo a su valor máximo de 0,38 mm; la velocidad de avance pasa de 4,0 a 9,0 m/min, el flujo de corte aumenta a 90 cm<sup>3</sup>/min y el resto de los otros parámetros de corte permanecen constantes.

De esta manera, los ensayos de desgaste se realizan sobre dos tipos de probetas (figura 3).

Estas mediciones son realizadas al inicio (0 metro), a los 100 metros y luego cada 200 metros de madera cortada, hasta el límite debido a una degradación de los estados superficiales y a un aumento de los esfuerzos y la potencia de corte.



Figura 3. Esquema tipo de probetas utilizadas.

Secuencia de ensayos:

- Medición de los esfuerzos de corte y estado superficial en probeta tipo a).
- Medición de la potencia de corte en probeta tipo b).

Diagram of used specimens.

Test sequences:

- Cutting forces and surface roughness measurements in type a) specimen.
- Cutting power measurement in type b) specimen.

## RESULTADOS

Utilizando los medios de análisis (esfuerzos de corte, potencia y estados superficiales) se buscó conocer la influencia del desgaste del elemento de corte sobre estos parámetros y determinar de una manera más simple sus límites.

El criterio principal del análisis del desgaste es el esfuerzo de corte. Se sabe que existe una correlación positiva entre el retroceso de la arista de corte y el aumento de los esfuerzos (Furet y Paturange 1996, Kivimaa 1950).

Se calcula el ángulo " $F_c F_y$ " entre el esfuerzo de corte y su componente tangencial  $F_y$  (figura 4). Este ángulo puede variar de un valor positivo a un valor negativo según los cambios del esfuerzo normal  $F_x$ . Se consideran los valores promedio para las dos componentes  $F_x$  e  $F_y$ , y se calcula la tangente del ángulo. Los resultados son presentados en la figura 4.

Se pueden distinguir claramente, figura 5, tres zonas que muestran la evolución del desgaste:

- Zona 1: "rodaje" del elemento de corte, de 0 a 500 m,
- Zona 2: "lineal" o de estabilidad, entre 500 y 3.000 m,
- Zona 3: "caída" o de fuerte retroceso de la arista, a partir de los 3.000 m.

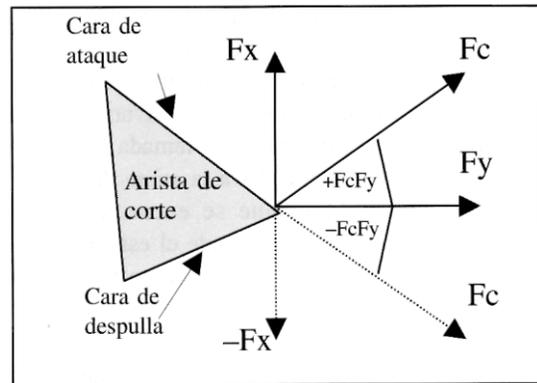


Figura 4. El ángulo " $F_c F_y$ " para medir el desgaste del elemento de corte.

" $F_c F_y$ " angle to measure the tool wear.

En la zona 1, se observa una evolución del ángulo de  $-13$  grados en su origen (desgaste = 0) hasta un valor cercano a  $-2^\circ$ , que corresponde a 500 m de madera cortada. La tendencia, en esta zona, es de encontrar rápidamente un punto de equilibrio hacia un ángulo comprendido entre  $\pm 2^\circ$ . Es interesante observar que al inicio, se produce un rechazo neto al corte, debido a una incorrecta geometría de la arista de corte. Progresivamente el desgaste tiende a estabilizarse por efecto del maquinado produciendo una disminución simultánea del esfuerzo normal y del ángulo " $F_c F_y$ ".

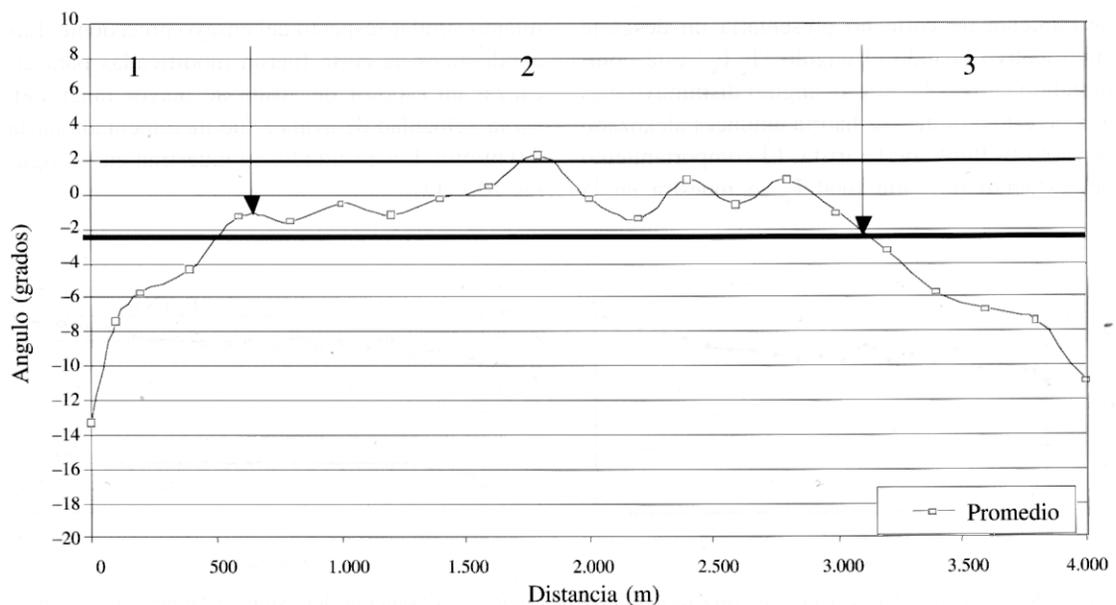


Figura 5. Comportamiento del ángulo " $F_c F_y$ " en función de la distancia de madera cortada. Behavior of the " $F_c F_y$ " angle in relation to cutting wood distance.

Así, y en la medida que la distancia maquinada aumenta, el valor promedio para el esfuerzo tangencial se mantiene constante mientras que el esfuerzo normal disminuye progresivamente. De esta manera, esta primera zona llamada "de rodaje" permite hacer retroceder a la arista de corte a un nivel de equilibrio que se encuentra en los 500 m de madera cortada, donde el esfuerzo normal disminuye para estabilizarse a partir de esta distancia.

En la zona 2 se observa claramente el comportamiento estable del ángulo, con una tendencia a posicionarse en  $0^\circ$  y fluctuando dentro de la zona  $\pm 2^\circ$ . La extensión de esta zona va de 500 hasta 3.000 m de madera cortada.

La zona 3 muestra la caída de la curva desde la distancia de 3.000 m. Lo anterior se debe a que el esfuerzo tangencial y el esfuerzo normal comienzan a aumentar. Sin embargo, es más importante el aumento del esfuerzo normal, lo que provoca la caída del ángulo " $F_c F_y$ ". La influencia del desgaste del elemento de corte está marcada por el aumento de este esfuerzo que frena a la herramienta en su rotación.

Es posible entonces fijar la duración de vida de la herramienta de corte cuando ésta trabaja el MDF, para condiciones de corte situadas en la zona de funcionamiento óptimo, y para una distancia maquinada de 3.000 m. Esto corresponde a 7'35" min de tiempo real de corte. Debe indicarse que la herramienta de corte no presentaría un desgaste significativo cuando el ángulo " $F_c F_y$ " está comprendido entre  $\pm 2^\circ$ . Si este ángulo disminuye más allá de estos límites, se habría entonces alcanzado la vida útil límite de la arista. El comportamiento del esfuerzo de corte total  $F$  se muestra en la

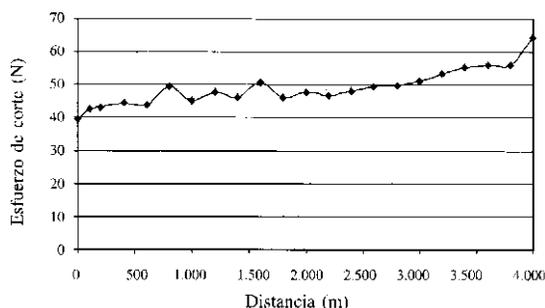


Figura 6. Evolución del esfuerzo de corte respecto de la distancia cortada.  
Cutting force evolution with the length of wood machined.

figura 6, y los esfuerzos tangencial y normal en la figura 7.

Los efectos debidos a la potencia de corte sobre el desgaste. Como se aprecia en la figura 8, la evolución de la potencia de corte es equivalente a aquella de los esfuerzos de corte. Considerando lo anterior, en la medida que el desgaste de la arista de corte aumenta, esto se refleja en un aumento de la potencia siendo más acentuado a partir de 3.000 m de madera cortada.

El estado superficial. Es posible observar en la figura 9 los resultados de las mediciones del estado superficial. En esta figura, se constata una tendencia hacia la degradación del estado superficial cuando la distancia maquinada aumenta. En general, se observa un comportamiento poco significativo del efecto del desgaste sobre el estado superficial. En efecto, el factor más importante sobre la calidad superficial es el espesor de viruta. En estos ensayos este factor se mantuvo constante.

Comportamiento del ángulo " $F_c F_y$ " con espesor de viruta máximo. Se buscó saber cuál es el comportamiento del ángulo " $F_c F_y$ " si se trabaja bajo condiciones de corte diferentes con un espesor de viruta máximo. Se encontró un comportamiento similar respecto del ensayo precedente. Las condiciones de corte fueron modificadas para alcanzar un espesor de viruta de mayor magnitud, así la velocidad de avance fue incrementada hasta 9.0 m/min. Los resultados se muestran en las figuras 10 y 11.

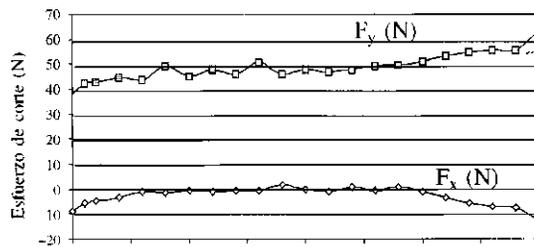


Figura 7. Evolución del esfuerzo tangencial  $F_y$  y normal  $F_x$  respecto de la distancia de madera cortada.  
Tangential  $F_y$  and normal  $F_x$  cutting forces evolution with the length of wood machined.

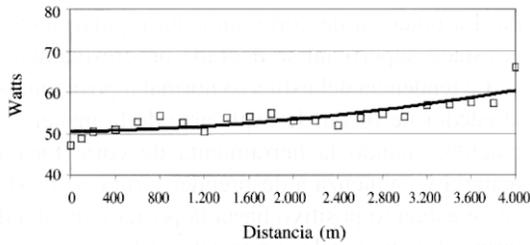


Figura 8. Influencia del desgaste de la arista de corte sobre la potencia de corte.

Tool wear influence in cutting power.

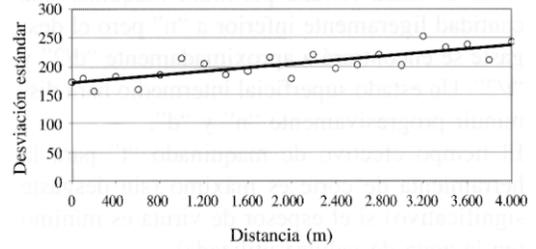


Figura 9. Comportamiento del estado superficial respecto del desgaste de la arista de corte.

Surface roughness behavior in relation to tool wear.

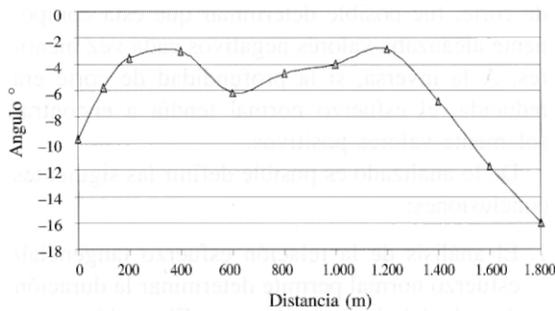


Figura 10. Ángulo "F<sub>c</sub>F<sub>y</sub>" con espesor de viruta máximo ( $e_c = 0.38$  mm).

Angle "F<sub>c</sub>F<sub>y</sub>" with maximal chip thickness.

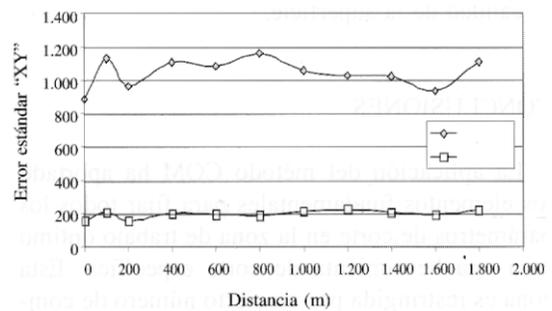


Figura 11. Estados superficiales respecto del desgaste y del espesor de viruta.

Surface roughness in relation to tool wear and chip thickness.

Es posible observar en la figura 10 un comportamiento similar al registrado con el ensayo realizado con el espesor de viruta mínimo. Se encuentran aquí las tres zonas que permiten definir los estados del desgaste de la arista de corte. Sin embargo, con el cambio de las condiciones de corte, éste ángulo tiende a estabilizarse cerca de los  $-5^\circ$  (entre  $0$  y  $-2^\circ$  para  $e_c$  min.). La influencia del espesor de viruta es importante, ya sea sobre el ángulo o en el esfuerzo normal  $F_x$ . Así, si el espesor de viruta se hace cada vez más grande, el valor promedio del esfuerzo normal tendrá una tendencia a ser más negativo. Cuando su valor cae más allá de su valor de estabilización es porque el elemento de corte ha alcanzado su duración de vida límite.

El límite obtenido se sitúa a 1.200 m de MDF maquinado, lo que corresponde a aproximadamente 3.19 minutos de tiempo efectivo de corte. Para los dos ensayos (espesor de viruta mínimo y máximo) se trabajó con probetas del mismo largo. En el caso del espesor de viruta mínimo, se realizaron 289 cortes sobre la probeta de 1.086 mm de largo,

hasta encontrar la caída de la curva y 236 cortes para el espesor de viruta máximo. Es decir, que trabajando con un espesor de viruta mayor, el límite de la duración de vida del elemento de corte se reduce, encontrándose con un largo de madera maquinada menor. Por otra parte, la cantidad de piezas procesadas es muy próxima a aquella con un espesor de viruta más pequeño. El criterio que permitirá elegir entre un valor u otro es el estado superficial. El resultado se aprecia en la figura 11, donde se observa que las dos curvas siguen una tendencia relativamente constante. La influencia del desgaste sobre el estado superficial es significativo si el elemento de corte presenta una degradación muy importante de la arista de corte, y con un avance por diente importante.

Entonces, es posible elegir un estado superficial según el objetivo perseguido teniendo en cuenta, entre otros, los siguientes puntos:

- Un estado superficial de buena calidad permite maquinar una cantidad "n" de piezas y el desgaste de la arista de corte se encontrará a una

distancia "d" y un tiempo "t". Un estado superficial de mala calidad permitirá maquinar una cantidad ligeramente inferior a "n" pero el desgaste se encontrará a aproximadamente "d/2" y "t/2". Un estado superficial intermedio hará disminuir progresivamente "n" y "d",

- El tiempo efectivo de maquinado "t" para la herramienta de corte es máximo (sin desgaste significativo) si el espesor de viruta es mínimo (en la zona de validez utilizada),
- Para un tiempo de maquinado igual a "t/2" con un espesor de viruta importante, la cantidad de piezas procesadas es similar y la productividad es aumentada pero con una deterioración de la calidad de la superficie.

## CONCLUSIONES

La aplicación del método COM ha aportado los elementos fundamentales para fijar todos los parámetros de corte en la zona de trabajo óptimo para una herramienta de corte específica. Esta zona es restringida por un cierto número de componentes tales como el material, la herramienta de corte o el proceso, determinando así su utilidad para un maquinado dentro de límites claramente establecidos.

Los ensayos realizados para la determinación del desgaste del elemento de corte han permitido encontrar de una manera relativamente simple la duración de vida de éste. Analizando los componentes del esfuerzo de corte, se puede conocer la variación angular que se produce entre ellos. Un cambio brusco del componente normal del esfuerzo de corte es determinante para la obtención del límite de la duración de vida del elemento de corte.

Se visualizan claramente tres zonas donde el comportamiento de la variación angular presenta características bien definidas. Una primera zona cuando la arista de corte se encuentra sin desgaste muestra un rechazo al corte debido probablemente a los depósitos metálicos que se encuentran sobre la arista que alteran su geometría. Una segunda zona donde el comportamiento del ángulo es constante con ligeras fluctuaciones entre  $\pm 2^\circ$ , con esfuerzos de corte y estados superficiales sin gran variabilidad. El punto que separa esta zona de la siguiente permite identificar el límite para la duración de vida máxima de la herramienta de corte. La última zona muestra la caída del ángulo. El

componente normal muestra valores cada vez más importantes indicando que la arista está desgastada. La potencia de corte aumenta regularmente y el estado superficial se degrada progresivamente.

La tendencia del esfuerzo normal a posicionarse alrededor de  $0^\circ$  puede explicarse de la manera siguiente; cuando la herramienta de corte toca la materia y comienza a desprender viruta, se produce un esfuerzo positivo hasta la posición media de viruta. Luego con la viruta que se hace cada vez más gruesa, se produce la disminución progresiva de este esfuerzo para alcanzar su valor más negativo con espesor máximo de viruta. Con los ensayos realizados haciendo aumentar la profundidad de corte, fue posible determinar que esta componente alcanzaba valores negativos cada vez menores. A la inversa, si la profundidad de corte era reducida, el esfuerzo normal tendía a encontrar solamente valores positivos.

De lo analizado es posible definir las siguientes conclusiones:

1. El análisis de la relación esfuerzo tangencial/ esfuerzo normal permite determinar la duración de vida del elemento de corte. El cambio angular de esta relación muestra tres zonas de comportamiento bien definidas.
2. El esfuerzo normal es muy sensible al desgaste. Este esfuerzo caracteriza muy bien el comportamiento del ángulo " $F_c F_y$ ".
3. La potencia de corte y el estado superficial no permiten explicar un aumento del desgaste. Los cambios de valores del esfuerzo total dan resultados más precisos en la búsqueda del desgaste de la arista de corte.
4. El control del esfuerzo normal durante el corte permite definir el límite de trabajo de una herramienta de corte.
5. El comportamiento del estado superficial está relacionado sobre todo con el espesor de viruta. La influencia del desgaste sobre este parámetro es insignificante.
6. Para estas condiciones de corte, con espesor de viruta mínimo, la fluctuación del ángulo " $F_c F_y$ " se encuentra entre  $\pm 2^\circ$ . Si el espesor de viruta es máximo, el ángulo " $F_c F_y$ " se sitúa entre  $\pm 5^\circ$ .
7. El método COM permite delimitar las condiciones de corte en una zona donde la duración de vida del elemento de corte está de acuerdo con el cuidado de un trabajo en seguridad.

## BIBLIOGRAFIA

- AGUILERA, A. 2000. Optimisation des conditions de coupe pour l'usinage du bois. Application de la méthode du Coupe Outil Matière au défonçage des panneaux de fibres de densité moyenne. Tesis de doctorado. Université Henri Poincaré, Nancy I, ENSTIB, 14 febrero 2000, 176 p.
- AGUILERA, A., P. J. MEAUSOONE, P. MARTIN. 2000. Wood material influence in routing operations: the MDF case. Paper in process of revision, presented to Holz als Roh-und Werkstoff.
- AFNOR. 1995. Domaine de fonctionnement des outils coupants. Couple outil matière. Partie 6: mode d'obtention du couple outil matière en fraisage. Indice de classement: E 66-520-6.
- ANSELMETTI, B. 1996. Surveillance de la coupe et CFAO. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes : 79-84.
- CHARDIN, A., J. FROIDURE. 1968. Etude de l'usure des dents de scie. Introduction. Centre Technique Forestier Tropical.
- FRANZ, N. C. 1958. An analysis of the wood cutting process. Ph.D. thesis, Univ. Of Michigan, Am Arbor, Mich. 152 p.
- FURET, B., N. PATURANGE. 1996. Détermination de protocoles d'utilisation du capteur d'efforts en perçage: Intellitool. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes: 119-124.
- KIVIMAA, E. 1950. Cutting force in woodworking. The State Institute for Technical Research, Finland. Publication 18. 102 p.
- KOCH, P. 1964. Wood Machining Processes. A volume in the wood processing series. Edited by Frederick F. Wangaard, Yale University.
- SHEIKH-AHMAD, J. Y., W. M. MCKENZIE. 1997. Measurement of tool wear and dulling in the machining of particleboard. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar: 659-672.
- TRIBOULOT, P., C. SALES, A. ZERIZER, P. MARTIN. 1995. "Correlation of fracture toughness of bonded joints with quality (roughness) of knife-planed MDF surfaces", *Holzforschung* Vol. 49 (5): 465-470.