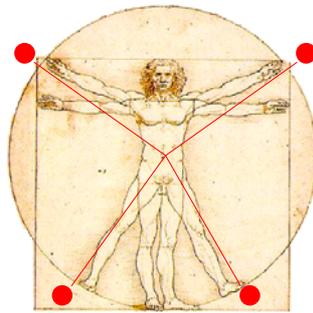


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN II. AÑO 2004

SEPARATA



CORRELACIONES PARA ENSAYOS DE HERRAMIENTAS Y DE
MAQUINABILIDAD.

Fernando Arranz Merino, Antonio Vizán Idoipe, Julio E. Labarga Ordoñez,
Esther Rincón Rincón



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior

Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Fernando Arranz Merino, Antonio Vizán Idoipe, Julio E. Labarga Ordoñez, Esther Rincón Rincón
Octubre, 2004

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECTIN04_006.pdf

© De la edición: *Revista Tecnológí@ y desarrollo*
Escuela Politécnica Superior.
Universidad Alfonso X el Sabio.
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).
ISSN: 1696-8085
Editor: Julio Merino García tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

Tecnológí@ y desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol.II. 2004.

CORRELACIONES PARA ENSAYOS DE HERRAMIENTAS Y DE MAQUINABILIDAD.

Fernando Arranz Merino^a, Antonio Vizán Idoipe^b, Julio E. Labarga Ordoñez^c, Esther Rincón Rincón^a

^aDr Ing. Industrial, Departamento de Tecnología Industrial, Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio. Avda. De la Universidad nº1, Villanueva de la Cañada, 28691 Madrid. España.

Tif.:918109758, email: farranz@uax.es

^bDr Ing. Industrial, Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, U. Politécnica de Madrid

^cDr Ing. Industrial, Instituto de Automática y Fabricación, U. de León

RESUMEN: En el presente artículo se buscará definir un ensayo que sea acorde con el estado tecnológico actual de todos los medios que intervienen en procesos de fabricación por arranque de viruta y en particular en el campo del decoletaje por la importancia económica que en él pueden tener. Así mismo se buscarán correlaciones entre variables de interés que permitan modelizar mejor lo que ocurre a medida que se desgasta la herramienta y las piezas obtenidas tienden a salirse de tolerancias y a presentar una mayor rugosidad.

PALABRAS CLAVE: vida de herramienta, maquinabilidad, desgaste, rugosidad.

ABSTRACT: In this paper, a new test is defined accordingly to the present tools and machines used at screw machining industry where tool life and machinability have economic meaning. Furthermore correlations between interest variables are investigated which allow to modelize the system behaviour more accurately.

KEY-WORDS: tool life, machinability, wear, roughness.

1. Introducción

El ensayo mas clásico de los que se hacen en relación a la vida de herramienta es el que determina dicha vida útil mediante operación de cilindrado con velocidad constante para cada filo, midiendo el desgaste de herramienta a intervalos y fijando un valor de este desgaste como criterio de inutilidad. Las normas [ISO93], [ANSI85], [UNE85], [JIS71], [JIS61], [DIN81], [AFNOR81] y [AFNOR97] están dedicadas en parte o totalmente, según los casos, a describir ensayos de este tipo. Algunos valores utilizados como criterios de vida útil se muestran en la tabla 1.1.

Norma	Valores del desgaste
[UNE85]	$VB_B=0,3$ mm; $VB_{B,max}=0,6$ mm, $KT=0,06+0,3*a$ (mm/rev) Desmoronamiento del filo (hta. de acero rápido)
[JIS61] [JIS71]	$VB_B=0,2$ mm en acabado y $VB_B=0,4$ mm torneado medio de acero; $VB_B=0,7$ mm general y $VB_B=1$ a $1,25$ mm desbaste de fundición
[DIN81]	$VB_B=0,2$ mm
[AFNOR81]	Desmoronamiento (hta. de acero rápido)
[AFNOR97]	No determina valores concretos

Tabla 1.1 Resumen de valores de desgaste utilizados como criterio de vida útil.

Otro criterio para determinar la vida útil de herramienta puede ser la salida de tolerancias dimensionales, geométricas o de acabado superficial durante la producción de piezas en serie. Este criterio se utiliza en los ensayos basados en productividad horaria de piezas dentro de tolerancias y están especialmente dirigidos al campo del decoletaje en el que los tornos suelen tener alimentación automática de barra, algunas normas y procedimientos de este tipo son [ASTM81], procedimiento de ensayo de C. T. Dec. (Centre Technique de L'industrie du Decolletage), procedimiento de simulación industrial de SIDENOR I+D. En la figura 1.1 se pueden observar la piezas definidas para estos ensayos y en la tabla 1.2 los valores impuestos sobre las tolerancias.

Norma	Tol. dimensionales	Rugosidad Ra	Tol. geomét.
[ASTM81]	$\Phi 22$ T=80 μ m $\Phi 23$ T=130 μ m $\Phi 15$ T=130 μ m	Acabado: 3,81 μ m Desbaste: 7,62 μ m Desbaste: 7,62 μ m	No hay
C. T. Dec. (Pieza mediana)	$\Phi 16$ T=60 μ m (cilind)	Cilindrado: 6,3 μ m Tronzado: 3,2 μ m	Coaxialidad: 0,1 mm
C.T. Dec. (Pieza pequeña)	$\Phi 7$ T=50 μ m (cilind) $\Phi 4$ T=50 μ m (talad) $\Phi 8$ T=50 μ m (ranur)	Cilindrado: 6,3 μ m Tronzado: 3,2 μ m	Coaxialidad: 0,1 mm
SIDENOR I+D	$\Phi 19$ T=60 μ m (cilind) $\Phi 10$ T=100 μ m (talad) L4 T=100 μ m (ranur) $\Phi 14$ T=100 μ m (ranur)	Cilindrado: 6,3 μ m Tronzado: 3,2 μ m	Coaxialidad: 0,1 mm

Tabla 1.2 Tolerancias sobre piezas de ensayos de maquinabilidad.

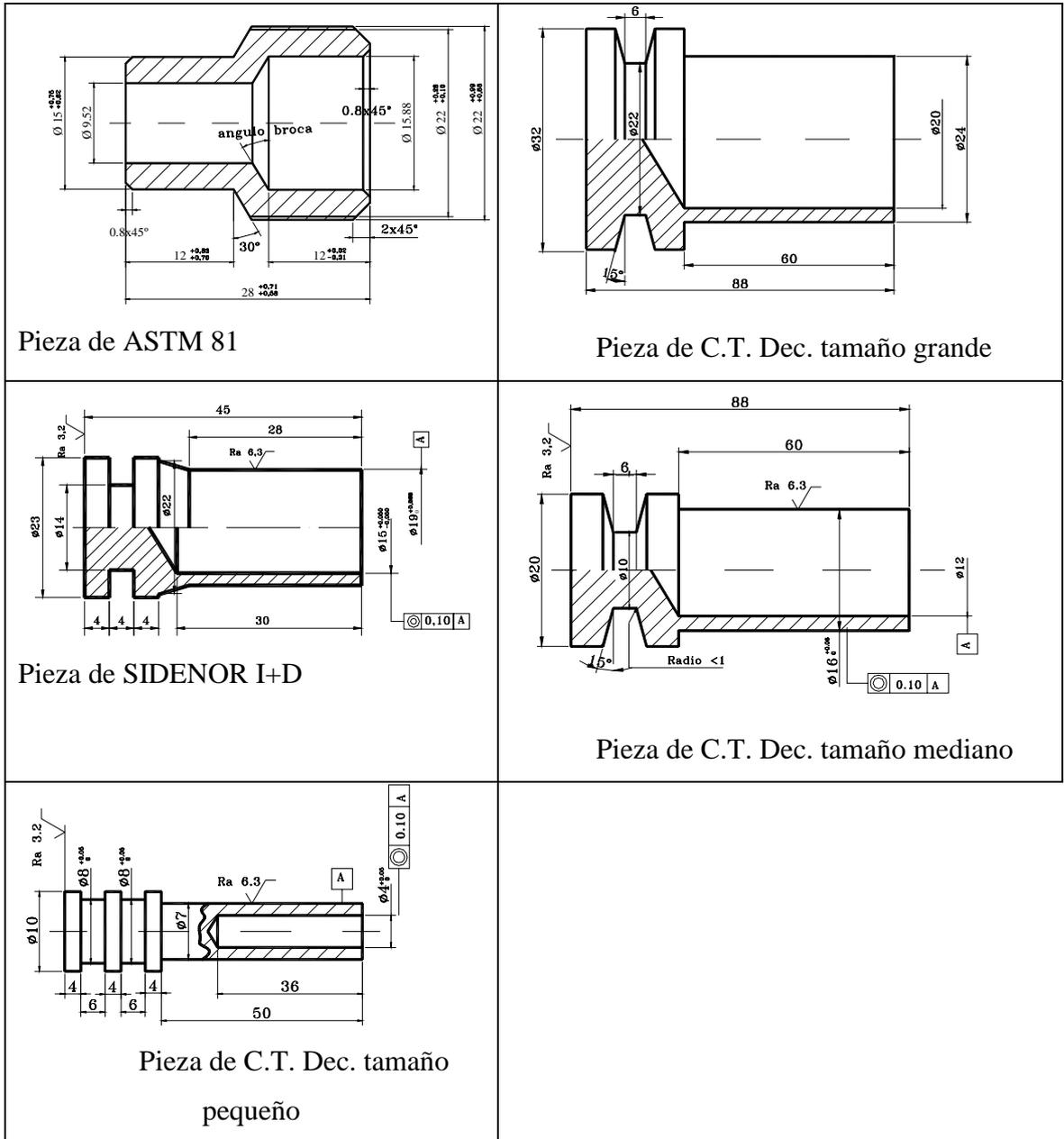


Figura 1.1 Piezas mecanizadas en ensayos de maquinabilidad.

Tanto los ensayos de vida de herramienta, para determinar las constantes de la ecuación de Taylor, como los ensayos de productividad horaria permitirían asignar un valor de

maquinabilidad al material mecanizado, en general por comparación con uno de referencia [Sanz84], [Vivancos94], [Venkatesh86], [Enache 95].

Algunas normas [AFNOR81], [UNE90] también definen ensayos para comparar la maquinabilidad de los materiales utilizando herramientas de baja capacidad de corte, que han sido estudiados por algunos investigadores [Corta87], [Alberdi88]. Sin embargo las condiciones de corte y los resultados no serán equivalentes a los utilizados en el entorno industrial.

A la vista del estado actual en cuanto a tecnología disponible y en cuanto métodos de ensayo utilizados, deben hacerse algunas consideraciones:

- Por una parte hay que reflexionar sobre la necesidad de actualizar los ensayos teniendo en cuenta las máquinas, herramientas e instrumentos de medida disponibles y que ya están siendo utilizados en los talleres de mecanizado.
- Por otra parte será de gran interés explotar al máximo toda la información obtenible de ensayos que resultan de coste muy elevado, buscando la unificación de ensayos de vida de herramienta y de ensayos de maquinabilidad o de productividad horaria.

Se propone un ensayo de vida de herramienta dirigido a la industria del decoletaje, consistente en cilindrado de piezas en pasada única con máquina, herramienta y condiciones de corte representativas o típicas del entorno industrial. Se medirán la rugosidad y el diámetro en muestras sucesivas y con suficiente frecuencia como para monitorizar adecuadamente la evolución, así mismo se medirá el desgaste de la herramienta correspondiente a las sucesivas muestras, buscando la correlación entre las variables si es que existe.

El ensayo se realiza en un abanico de velocidades que cubran el rango de trabajo normal para la combinación de material mecanizado y herramienta utilizados.

Después del mecanizado de cada lote, se corrige la posición de la herramienta para la obtención del nuevo lote con el diámetro deseado.

Las ventajas de este ensayo propuesto frente a los ya existentes se pueden resumir en:

- Permite obtener con un solo ensayo la información que estaba relacionada con dos ensayos diferentes ([UNE 85] y productividad horaria).
- La corrección de la posición de herramienta actualiza el ensayo de productividad horaria en base a la utilización de tornos de control numérico.
- La correlación entre las variables de interés (desgaste, velocidad, variación de diámetro, rugosidad), permite describir mejor la evolución del sistema.

2 Materiales y métodos

Se realizará un ensayo de mecanizado en cilindrado y en una sola pasada, manteniendo fijos los valores de avance $a(0,27 \text{ mm/rev})$ y de profundidad $p(2 \text{ mm})$ y cambiando la velocidad en cada prueba según se indica en la tabla 2.1.

Al inicio de cada lote se mecaniza una pieza, se mide y se corrige posición de herramienta, después las cinco primeras piezas mecanizadas componen una muestra de la que se medirá el diámetro y la rugosidad y las cinco últimas piezas del lote forman otra muestra para la que se miden las mismas variables. Después del mecanizado de cada lote se toman imágenes de incidencia y desprendimiento para evaluar el desgaste.

Filo	Velocidad (m/min)	Nº piezas en cada lote
C	267	50
D	189	125
E	212	75

Tabla 2.1 Condiciones de corte.

El material mecanizado es un acero inoxidable austenítico, con adición de cobre para mejorar la maquinabilidad (AISI 304 Cu) en forma de barras calibradas que entran al torno a través del husillo con un alimentador automático de barras. El torno es un modelo industrial para decoletaje, de control numérico con una potencia de 11 kW en el husillo principal y una velocidad de giro máxima de 5000 rpm. La herramienta estudiada es una plaquita intercambiable comercial de cermet con recubrimiento de TiN y TiC y rompevirutas integrado. Se utiliza como fluido refrigerante/lubricante un aceite comercial diluido al 5%.

El diámetro medio de cada pieza, representada en la figura 2.1, se mide con una máquina medidora de tres coordenadas que toma ocho puntos repartidos por la superficie. También se mide la rugosidad superficial con un rugosímetro utilizando la longitud básica de 0,8 mm.

La medición del desgaste se hace a partir de las imágenes tomadas por una cámara digital que utiliza el objetivo de una lupa estereoscópica y el adecuado software de adquisición de imágenes, un ejemplo es el de la figura 2.2.

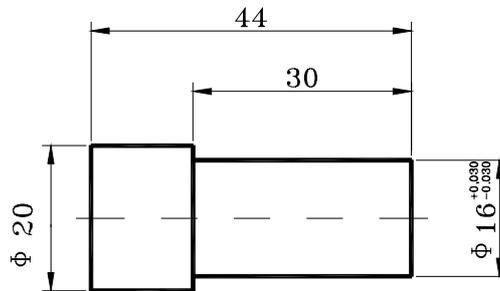


Figura 2.1. Pieza mecanizada en el ensayo.



Figura 2.2. Imagen del filo C.

La metodología para buscar relaciones entre estado de desgaste de herramienta, variación de diámetro y rugosidad pasa por un análisis de las representaciones gráficas de estas variables, el establecimiento de unas relaciones funcionales coherentes y la determinación de parámetros mediante herramientas estadísticas. El tipo de relación funcional utilizado con más frecuencia para el estudio de la vida útil de herramienta es el producto de potencias, como una generalización de la ecuación sencilla de Taylor. La utilización de regresión lineal múltiple con estas relaciones requiere la aplicación previa de logaritmos, lo que suele tener un efecto beneficioso sobre los residuos del modelo, aproximándolos mejor a una distribución normal.

3 Resultados y discusión.

3.1 Relación funcional $Ra(VB_B, V)$

Para una herramienta como la utilizada para los ensayos con $r_e=0,8$ mm y el avance $a=0,27$ mm/rev se puede calcular de forma analítica la rugosidad aritmética media teórica obteniendo el valor $Ra = 2,93$ μm . Los valores de rugosidad medidos sobre las piezas sin embargo son diferentes, estas diferencias se consideran el efecto del desgaste de la herramienta y las condiciones dinámicas en el proceso de corte. Para tener en cuenta la influencia del desgaste y la pérdida de forma se utiliza la variable VB_B (desgaste medio en incidencia en la zona B). La influencia de las condiciones dinámicas puede considerarse a través de la velocidad de giro del husillo principal y en el caso de los ensayos llevados a cabo, con diámetro de cilindrado constante, se puede utilizar indistintamente la velocidad de corte lineal V .

La relación funcional que se propone como hipótesis para construir el modelo es la (ec. 3.1). Para comprobar la adecuación de este tipo de relación funcional se analiza el gráfico de la figura 3.1.

Por una parte se observa que la rugosidad inicial no es cero, sino un valor igual o superior al valor teórico ($Ra = 2,94$ μm), por lo que la relación funcional buscada no puede ser válida para todos los valores de VB_B . Por otra parte se observa que a medida que el desgaste en incidencia es mayor, se diferencian más los comportamientos de cada filo en función de la velocidad, comenzando a ser más clara esta diferencia para $VB_B > 0,2$ mm.

$$Ra = K_1 \cdot VB_B^{m_1} \cdot V^{m_2} \quad (\text{ec. 3.1})$$

Tomando los datos correspondientes a todas las piezas de la muestra para las que $VB_B > 0,2$ mm se tienen 75 datos para realizar la regresión lineal de (ec. 3.2). Los coeficientes obtenidos se reflejan en la (ec. 3.3).

$$\ln Ra = \ln K_1 + m_1 \cdot \ln VB_B + m_2 \cdot \ln V \quad (\text{ec. 3.2})$$

$$Ra = e^{-4,3707} \cdot VB_B^{0,5304} \cdot V^{1,1794} \quad (\text{ec. 3.3})$$

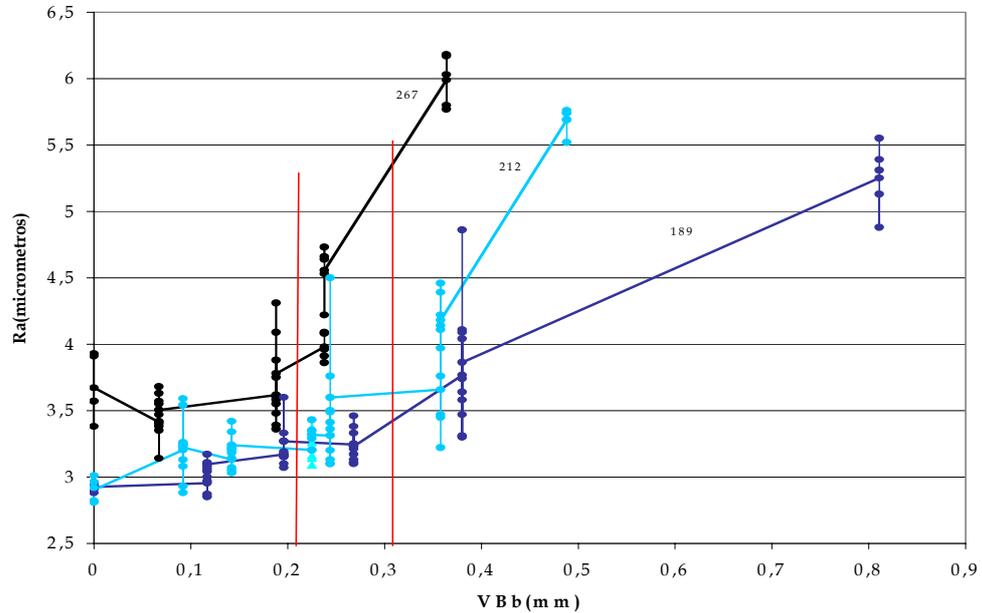


Figura 3.1. Rugosidad en función del desgaste y la velocidad.

Para el análisis estadístico se obtuvo un coeficiente de correlación múltiple $R=0,8947$ y el coeficiente de correlación corregido $\bar{R}=0,8912$ que indica una relación lineal aceptable en el modelo en logaritmos.

Representando conjuntamente los valores reales y los obtenidos mediante la (ec. 3.3) se obtiene la figura 3.2 en la que se puede ver que la ecuación aproxima mejor desde $VB_B = 0,15$ mm para $V=267$ m/min y desde $VB_B=0,25$ mm para $V=189$ m/min. Generalizando se puede pensar que, para bajas velocidades, la rugosidad no crece excesivamente hasta que el desgaste en incidencia toma un valor alto, mientras que para elevadas velocidades el efecto de la variación de la geometría por desgaste es notable desde pequeños valores de VB_B . Esto podría ser indicativo de interacción entre el desgaste del filo y los efectos dinámicos (fuerzas y vibraciones) en su influencia sobre la rugosidad superficial.

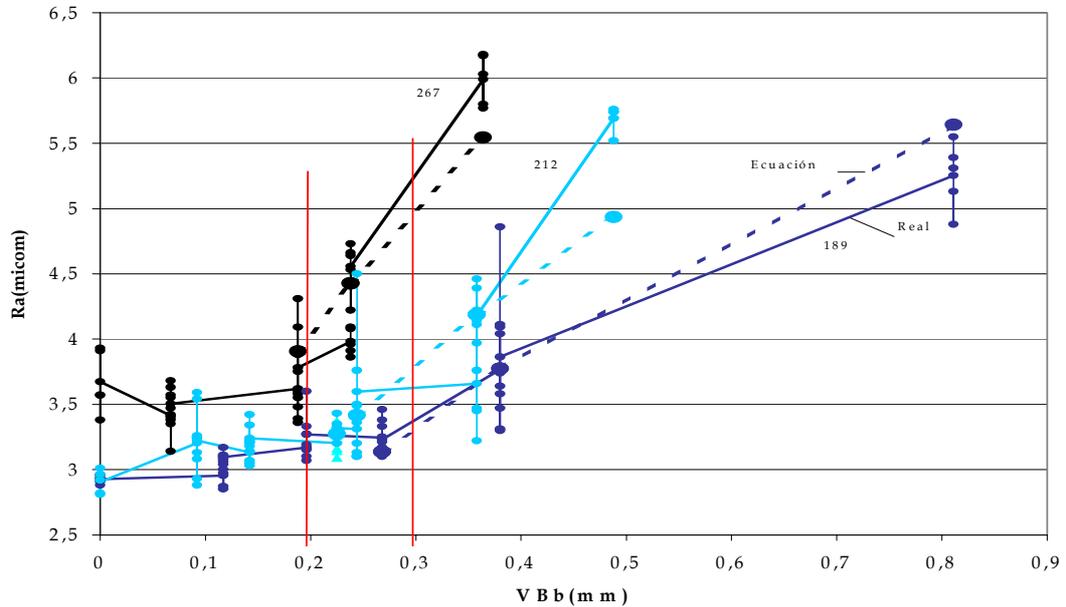


Figura 3.2. Valores reales y de ecuación Ra

Para tener una idea del grado de aproximación de la ecuación al comportamiento real del sistema se pueden representar los pares de valores ($Ra(\text{ecuación}), Ra(\text{real})$) que corresponden a un valor concreto de variables independientes (VB_B, V), como aparece en la figura 3.3. Si el modelo simulara perfectamente al sistema todos los puntos deberían caer en la diagonal. Sin embargo, la dispersión de los puntos da una idea de la variabilidad estocástica y de la importancia de variables con influencia que no están contempladas en el modelo como:

- Longitud de barra que queda en el alimentador y que puede afectar al nivel de vibraciones cuando gira a elevada velocidad.
- Posición en que se mide la rugosidad de la pieza, bien sea en la zona más alejada del husillo principal (del empotramiento) donde la pieza responde como una viga más elástica, o en la zona más próxima al husillo, donde la pieza ha actuado como una viga muy rígida durante el mecanizado.
- Variaciones en el espesor de viruta.

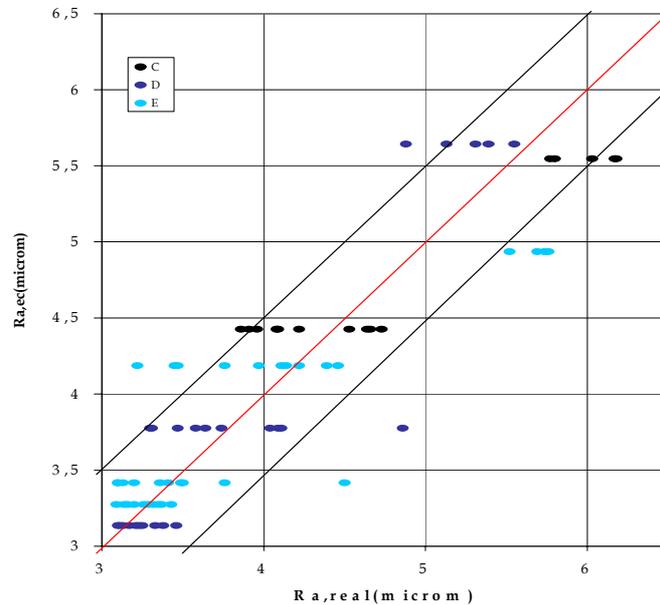


Figura 3.3. Valores reales frente a los del modelo

3.2 Relación funcional $Diam'$ (VB_B, V)

La utilización de tornos de control numérico permite introducir correcciones de herramienta de forma muy rápida y cómoda por lo que al inicio de cada lote se mecaniza una pieza con la que se introducen las correcciones necesarias para llevar la herramienta al diámetro nominal. Esta forma de operar es representativa de lo que se hace en los talleres industriales y representa la adaptación de los ensayos a las ventajas que ofrecen los tornos de control numérico frente a otros más antiguos como los automáticos por levas.

Sin embargo, la corrección de herramienta no puede estar calculándose de forma continua y existirá un tamaño de lote y una tasa de cambio de diámetro óptimos desde el punto de vista económico. Para buscar esos valores óptimos sería muy deseable conocer una relación funcional como la (ec. 3.4) donde $Diam' = (d\ Diam / dt)$.

$$Diam' = K_2 \cdot VB_B^{l1} \cdot V^{l2} \quad (\text{ec. 3.4})$$

Para estimar los parámetros se han utilizado los datos de cinco pruebas, tres de velocidad constante y dos con velocidad variable de un lote al siguiente, según aparece en la figura 3.4. Se puede observar que por debajo de $VB_B=0,15$ mm los valores de las pendientes no parecen seguir ningún patrón determinado, sin embargo por encima de $VB_B=0,15$ mm se puede considerar que el valor del desgaste en incidencia puede ser un factor con influencia preponderante sobre la pendiente de variación de diámetros por unidad de tiempo y estos son los datos que se utilizarán.

El valor señalado en la figura 3.4 como “desestimado” se elimina del tratamiento estadístico por aplicación del criterio de Chauvenet, al ser un valor negativo en claro desacuerdo con la tendencia de los demás puntos. Para realizar la estimación de parámetros se aplican logaritmos según la (ec. 3.5).

$$\ln Diam' = \ln K_2 + l_1 \cdot \ln VB_B + l_2 \cdot \ln V \quad (\text{ec. 3.5})$$

Utilizando regresión lineal múltiple se obtendrá la (ec. 3.6) con un coeficiente de correlación lineal $R=0,9252$ y un coeficiente de determinación $\bar{R}=0,9094$ que indica que la aproximación del modelo lineal en logaritmos es aceptable.

$$Diam' = e^{-49,4434} \cdot VB_B^{1,7991} \cdot V^{8,7398} \quad (\text{ec. 3.6})$$

Reflejando en un gráfico los valores reales y estimados mediante la (ec. 3.6) para VB_B mayor de 0,15 mm, se obtiene la figura 3.5, en la que se puede observar que la ecuación aproxima bastante bien excepto para el punto desestimado y en las proximidades de $VB_B = 0,15$ mm. Parece existir una velocidad límite por debajo de la cual los efectos del desgaste no son apreciables $V_{lim}>212$ m/min y por encima de la cual los efectos del desgaste en la variación de diámetros cobra mucha importancia $V_{lim}<238$ m/min.

Al igual que en el estudio de la rugosidad, se puede obtener una idea rápida de la fidelidad del modelo representando los pares de valores ($Diam'$ (ecuación), $Diam'$ (real)) que corresponden a un mismo valor de variables independientes (VB_B , V), en la figura 3.6 se representan estos valores.

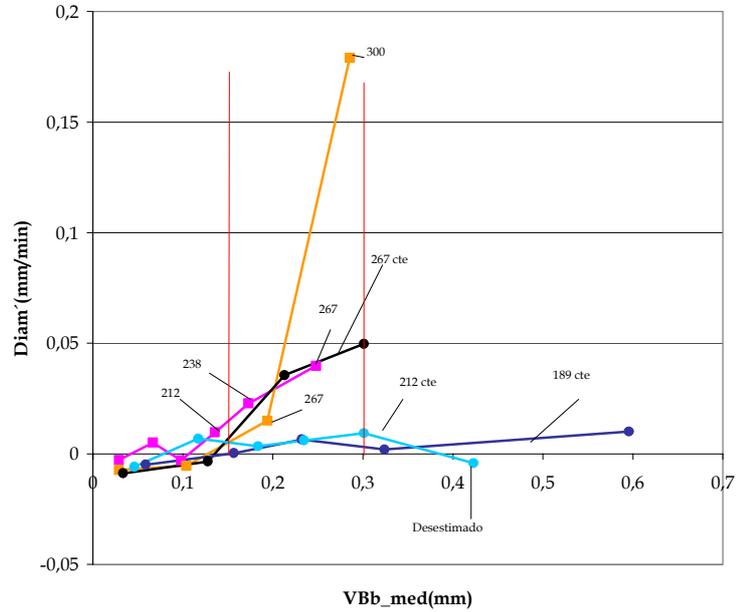


Figura 3.4. Variación de diámetros con del desgaste y la velocidad.

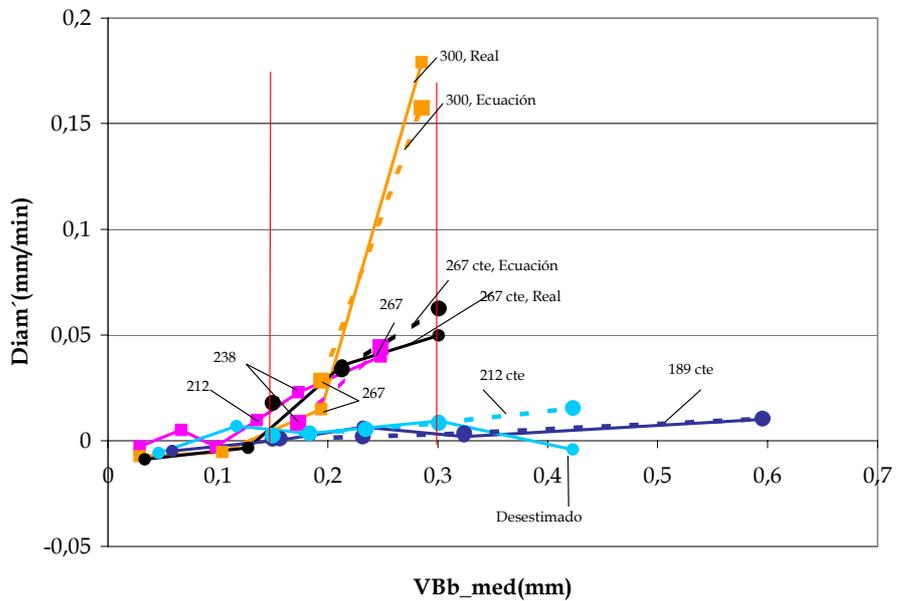


Figura 3.5. Datos reales y estimación mediante ecuación.

Aunque pueden influir otros valores en la variación de diámetros, a la vista de los resultados parece razonable pensar que existe un valor de desgaste de herramienta a partir del cual los diámetros de las piezas cambian rápidamente, dependiendo en gran medida de la velocidad de corte. La (ec. 3.6) junto con una expresión que aporte información de la evolución del desgaste en función del tiempo $VB_B(V,t)$ permitiría establecer adecuadamente el tamaño del lote para supervisión de tolerancias dimensionales.

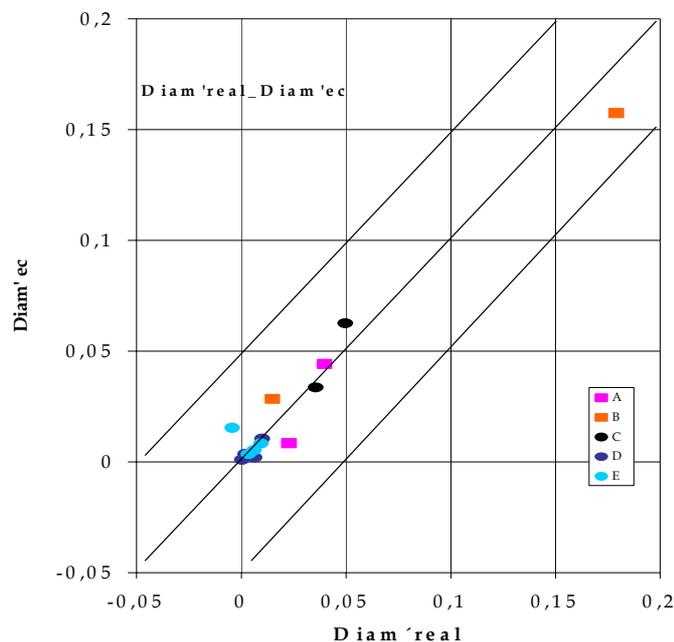


Figura 3.6. Aproximación del modelo $Diam' (VB_B, V)$ a la realidad.

4 Conclusiones

Utilizando los medios tecnológicos actuales se propone un ensayo para obtener información que puede ser de aplicación en el ámbito industrial y en particular para el segmento del decoletaje. En este ensayo se aprovecha gran cantidad de información y no sólo los valores extremos cuando se alcanza el criterio de vida de herramienta o la salida de tolerancias.

Se propone un modelo basado en relaciones funcionales del tipo de producto de potencias, que permite un tratamiento estadístico sencillo para relacionar las variables de interés. Las ecuaciones permiten concretar una idea abstracta que es la relación entre el desgaste de la herramienta y el aumento de rugosidad y variación de diámetro de la pieza mecanizada.

Las ecuaciones utilizadas ponen de manifiesto la interacción entre los efectos del desgaste representados por VB_B y los efectos dinámicos representados por la velocidad de corte V .

Se observa como para pequeños desgastes ($VB_B < 0,15$ mm) tanto la rugosidad como la variación de diámetros tienen una variación puramente estocástica, mientras que para desgastes mayores las variables VB_B y V son factores de influencia que pueden explicar el comportamiento del sistema.

5 Bibliografía

- AFNOR NF A 03-654/ Juin 1981. Produits Siderurgiques. Methodes de contrôle de l'usinabilité par tournage des aciers destinés au décolletage et des aciers de construction à l'aide d'outils en acier rapide.
- Alberdi,A.; Etxebarria,J.; Letona,I.; "Hacia el índice único de maquinabilidad de los ensayos acelerados de corta duración". IMHE. Abril 1988. Pág 133-145.
- ANSI/ASME B94.55M-1985. Tool life testing with single-point turning tools.
- ASTM E 618. Evaluating machining performance of ferrous metals using an automatic screw/bar machine. 1981.
- Corta,R.; Letona,I; "Determinación de la maquinabilidad mediante un ensayo de cilindrado acelerado". IMHE. Mayo-Junio. 1987. Pag 160-163.
- DIN 6583 (09.81) Begriffe der Zerspantechnik. Standbegriffe. (1981), Terms of cutting procedures-Tool life criteria.
- Enache,S.; Strajescu,E.; Opran,C.; "Mathematical model for the establishment of the materials machinability". Annals of the CIRP. Vol. 44/1. 1995. Pag. 79-82.
- ISO3685:1993. Tool life testing with single-point turning tools.
- JIS B 4011 (1961). Method of life test for single point tools.
- JIS B 4011 (1971). Method of life test for single point carbide tools.

- Sanz Glaria, Isidro V.; "Maquinabilidad relativa". IMHE nº 106. Agosto-Septiembre. 1984. Pág. 45-58
- UNE 16-148-85. Ensayos de duración de herramientas de torno de corte único.
- UNE 36-423-90; Ensayos de Acero. Determinación del índice de maquinabilidad. Métodos de torneado de corta duración. 1990
- Venkatesh, V.C.; Narayanan, V.; "Machinability correlation among turning milling and drilling Processes". Annals of the CIRP Vol. 35/1. 1986. Pag. 59-62.
- Vivancos, J.; Sierra, C; "Estudio de la maquinabilidad de un acero F-1550 18CrMo4 y de una fundición nodular con matriz perlítica". XI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. 1994. Pág. 455-464.