



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

ESTUDIO DE LA CONDICIÓN DE LA HERRAMIENTA DURANTE EL MAQUINADO DE PIEZAS MEDIANTE EMISIÓN ACÚSTICA

Carlos Maradei

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
"Prof. Jorge A. Sábato"

Estudio de la condición de la herramienta durante el maquinado de piezas mediante emisión acústica (*)

por Ing. Carlos Maradei

Directores

Dr. José E. Ruzzante
Dra. Rosa Piotrkowski

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
CENTRO DE INFORMACION C A C

(*) Tesis para optar al título de *Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República Argentina

2001

Resumen

El fenómeno de emisión acústica (EA) puede ser empleado en el monitoreo de los procesos de mecanizado. La principal ventaja de la EA es que el rango de frecuencias de sus señales es mucho mayor que los de las vibraciones de las máquinas y los ruidos ambientales y no es intrusivo en las operaciones de corte. Además la EA está directamente relacionada con el estado de la herramienta, ya que es generada por la deformación plástica, rozamiento, fractura de virutas y propagación de fisuras. En el presente trabajo se han llevado a cabo mediciones de parámetros y obtención de señales de EA en operaciones de torneado sobre dos aceros de distinta maquinabilidad (SAE 1010 y SAE 12L14) y diversas condiciones de mecanizado a los efectos de extraer de ellos un parámetro, o conjunto de ellos, indicativo del estado de desgaste de la herramienta. Parámetros de EA tales como amplitud, cuentas, rise time, energía, eventos por segundo, duración han demostrado ser indicativos del desgaste del inserto aunque su uso en aplicaciones industriales es limitado ya que el establecimiento de un valor umbral para el control depende fuertemente de las variables del proceso. También se analizaron los espectros de frecuencia en distintas etapas del desgaste, realizándose histogramas de los picos de frecuencia en ellos encontrados. Un análisis posterior consistió en obtener el coeficiente beta de la teoría de ruido $1/f$ y los momentos centrados de 2º, 3º y 4º orden de la distribución del mismo para las señales obtenidas y analizar la tendencia de los mismos. De ellos, sólo el momento centrado de cuarto orden de la distribución de los coeficientes beta ha mostrado capacidad para discernir estados de la herramienta. El análisis que ha resultado más fructífero ha sido hecho con wavelets packets. En este trabajo se aplica la transformada wavelet packet a las señales de EA y con los coeficientes resultantes se calculan parámetros como la potencia y entropía de los coeficientes en el rango de frecuencia que la literatura señala de interés para el tipo de fenómeno aquí analizado. Ambos parámetros, especialmente la potencia, han demostrado ser indicativos del estado de la herramienta. Se hace presente la necesidad de realizar mayor cantidad de ensayos estudiando en manera más detallada el comportamiento de estos dos últimos parámetros. Asimismo se sugiere la posibilidad de usarlos como entradas de herramientas matemáticas como redes neuronales y algoritmos de lógica difusa que provean información sobre el estado de la herramienta.

1 Introducción

1.1 Emisión Acústica	1
1.2 Generación de Emisión Acústica. Fuentes microscópicas	3
1.2.1 Deformación plástica. Movimiento de dislocaciones	3
1.2.2 Fractura	4
1.2.3 Transformaciones de fase	5
1.3 Ondas acústicas	5
1.3.1 Descripción física	5
1.3.2 Ecuación de onda	6
1.3.3 Tipos de ondas acústicas	6
1.3.4 Atenuación	8
1.4 Sensores	9
1.5 Instrumentación en EA	10
1.5.1 Amplificadores	10
1.5.2 Registradores de transientes	11
1.5.3 Análisis digital	11
1.5.4 Parámetros de medición de la señal	12

2 Emisión Acústica en el mecanizado de materiales

2.1 Proceso de mecanizado en materiales. Fuerzas actuantes	14
2.2 Desgaste de la herramienta	16
2.2.1 Características generales	16
2.2.2 Mecanismos	17
2.3 Fuentes de Emisión Acústica en el mecanizado de materiales	18
2.4 Relaciones entre parámetros de Emisión Acústica y de mecanizado deducidas de análisis teóricos	18
2.5 Relaciones entre parámetros de Emisión Acústica y de mecanizado obtenidas de análisis estadísticos	21

3 Desarrollo experimental

3.1 Objetivo del trabajo	26
3.2 Equipo de Emisión Acústica	26
3.2.1 Descripción operativa del sistema	26
3.2.2 Parámetros de salida	28
3.2.3 Variables operativas del proceso de medición	29
3.3 Caracterización del material	30
3.3.1 Acero SAE 1010	30
3.3.2 Acero SAE 12L14	32
3.3.3 Insertos utilizados	35
3.4 Procedimiento experimental	35

4 Resultados y discusión

4.1 Curvas de desgaste	42
4.2 Clasificación de señales según estacionariedad	43
4.3 Evolución de los parámetros de Emisión Acústica	44
4.3.1 Ensayo nº 1	44
4.3.2 Ensayo nº 2	47
4.3.3 Ensayo nº 3	50
4.3.4 Comparación entre ensayos con tests estadísticos	53
4.4 Distribución de frecuencias	54
4.5 Evaluación del coeficiente beta	55
4.6 Análisis de señales con Wavelets	57

4.6.1	Introducción a Wavelets	57
4.6.2	Evolución de la potencia medida sobre los coeficientes de Wavelet Packets	61
4.6.3	Evolución de la entropía de los coeficientes de Wavelet Packets	63
4.7	Análisis de los ensayos nº 4 y nº 5	66
4.8	Análisis del ensayo nº 6	71

5 Conclusiones

5	Conclusiones	75
---	--------------	----

Anexos

1. Curva de sensibilidad del sensor utilizado en los ensayos
2. Parámetros característicos de los ensayos
3. Programas de Matlab
4. Salidas de Statgraphics

1. Introducción

1.1 Emisión Acústica

Formalmente se define Emisión Acústica como el fenómeno donde se generan ondas elásticas transientes por rápida liberación de energía en fuentes localizadas dentro de un material. Parte de la energía se libera en forma de ondas elásticas, en vez de disiparse en calor, dependiendo de la naturaleza de la fuente, de lo localizada que esté y de la rapidez de la liberación. La liberación rápida y localizada de energía genera ondas elásticas en el rango de frecuencias del ultrasonido, que pueden ser detectadas por transductores en contacto con la muestra, siempre que las ondas sean de amplitud adecuada [1]. El rango de frecuencias se encuentra entre 100 kHz y 1 MHz y las velocidades de las ondas se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Velocidades de ondas en distintos materiales (en km/s)

Material	c_1 (onda longitudinal)	c_2 (onda transversal)	c_r (onda Rayleigh)
Aluminio	6.3	3.1	2.9
Bronce	4.4	2.1	2.0
Fundición de hierro	5.0	3.0	2.7
Cobre	4.7	2.3	2.1
Plomo	2.2	0.7	0.66
Magnesio	5.8	3.1	2.9
Níquel	5.6	3.0	2.8
Acero	5.9	3.2	3.0

La fuente de energía de la EA es el cambio en el campo de tensiones en el material, por ello sin sollicitación no hay EA. Hay una gran variedad de fuentes de EA que en una primera clasificación divideremos en dos grupos. El grupo I corresponde a aquellas fuentes que involucran mecanismos microestructurales. En el grupo II están aquellas fuentes no relacionadas con la microestructura y que no presentan una característica particular.

Tabla 2. Fuentes de Emisión Acústica

Grupo I	Movimiento de paredes de los dominios magnéticos Multiplicación y movimiento de dislocaciones Transformaciones martensíticas Decohesión de precipitados Crecimiento y propagación de fisuras Procesos de corrosión
Grupo II	Pérdidas de gases o líquidos Procesos de soldadura Desgaste de rodamientos o bujes Detección de piezas sueltas Detección de descargas parciales en transformadores de alta tensión

La señal de EA puede clasificarse en discontinua o continua. La primera llamada "burst", está asociada con el crecimiento macroscópico de un defecto y tiene un alto contenido energético. En contraste con la discontinua, la emisión continua es de baja amplitud y se produce cuando en la red cristalina tiene lugar algún proceso de flujo plástico localizado. La emisión continua es la superposición de un gran número de eventos transitorios solapados [1]. En la emisión continua no están bien definidos el comienzo y el final de los eventos [2]. Una señal continua es tal que el tiempo promedio entre emisiones de similar amplitud sea menor o comparable con la

duración de la emisión. La norma ASTM E-1316, donde se define la terminología de EA, recomienda usar los conceptos de "burst" y emisión continua como descripciones cualitativas de la apariencia de la señal. Así en esta norma un evento es un cambio local en el material que da lugar a la emisión acústica. Un "burst" es la descripción cualitativa de una señal discreta relacionada con un evento de emisión ocurrido en el seno del material. Finalmente la emisión continua es la descripción cualitativa de un nivel sostenido de señal producido por eventos de EA de rápida ocurrencia [3].

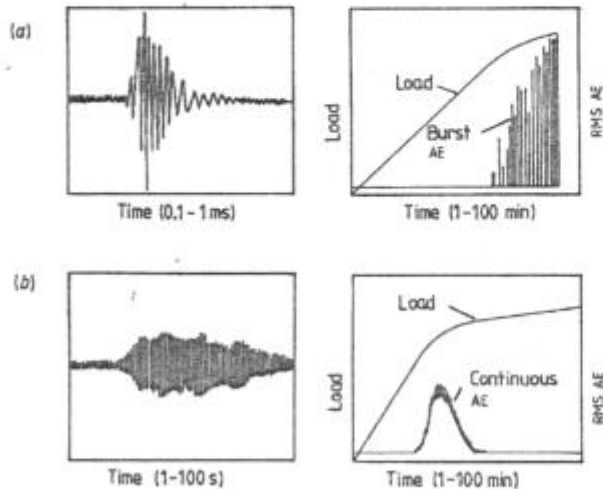


Fig. 1. a) Transientes cortos generando emisión discontinua o tipo burst. b) Fuentes de más larga duración generando emisión continua. Las imágenes de la izquierda son como las obtenidas de un osciloscopio y las de la derecha con un medidor de RMS (root mean square).

La EA puede ser utilizada de varias maneras: caracterización y tests de propiedades mecánicas, pruebas de preservicio, test de recalificación, monitoreo en línea, monitoreo de procesos de soldadura, detección y localización de pérdidas, aplicaciones geológicas, análisis de rúbrica mecánica (mechanical signature analysis).

La EA se distingue de otros métodos de ensayos no destructivos en dos aspectos claves:

- la señal tiene su origen en el mismo material, no en una fuente externa.
- la EA detecta procesos dinámicos asociados a la degradación de la integridad estructural, como crecimiento de fisuras o deformación plástica, mientras que otros métodos detectan discontinuidades geométricas (técnicas estáticas).

Una ventaja importante de la EA es que permite que el volumen total de la estructura sea inspeccionado de manera no intrusiva y de una sola vez. No es necesario rastrillar la estructura buscando defectos localizados, sólo se necesita conectar un número adecuado de sensores fijos. Esto lleva a ahorros importantes cuando se examinan estructuras de grandes dimensiones. En general la inspección con EA se usa para identificar zonas con problemas estructurales y luego se usan otros métodos para identificar de modo más preciso la naturaleza de los defectos [4]. Las consecuencias de estas diferencias fundamentales se resumen en la tabla 3 [4].

Tabla 3. Comparación entre Emisión Acústica y otras técnicas

Emisión Acústica	Otros métodos (Ultrasonido, etc.)
- Detecta movimiento de defectos	- Detecta forma geométrica de los defectos
- Requiere sollicitación	- No requiere sollicitación
- Cada inspección es única	- La inspección es repetible
- Más sensible al tipo de material	- Menos sensible al tipo de material
- Menos sensible a la geometría	- Más sensible a la geometría
- Menos intrusiva planta/proceso	- Más intrusiva planta/proceso
- Requiere acceso sólo a los sensores	- Requiere acceso a toda el área de inspección
- Testea toda la estructura a la vez	- Testea distintas zonas en secuencia
- Principal problema: depende del ruido	- Principal problema: depende de la geometría

1.2 Generación de EA. Fuentes microscópicas

Cuando, por ejemplo, una fisura aparece en el material, la superficie de ésta puede moverse y de esta forma liberar en forma de ondas elásticas parte de la energía elástica retenida. La propagación de estas ondas es el mecanismo por el cual el estado elástico modificado en la vecindad de la fisura es transmitido al resto de la pieza. Estos cambios acompañan procesos de deformación, fractura o transformaciones de fase. La energía de las ondas elásticas que constituyen la forma de onda es provista por el trabajo proporcionado por la carga externa.

1.2.1. Deformación plástica. Movimiento de dislocaciones

El origen de la EA en monocristales de aluminio y cobre es la repentina liberación de dislocaciones de una fuente (por ejemplo de Frank-Read) seguida por su propagación como grupo sobre una fracción apreciable de un plano de deslizamiento. La emisión puede ser radiación elástica acompañando a la aceleración de dislocaciones o un reacomodamiento del campo de deformaciones elásticas luego de una abrupta y local relajación plástica [5].

La detectabilidad de estas fuentes depende del desplazamiento r de la dislocación, de la velocidad del desplazamiento $\dot{r}$ y de la cantidad de dislocaciones n que se desplazan como muestra la relación (1.1) [6]

$$nr\dot{r} \geq 0.03 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (1.1)$$

Al inicio de la deformación una fracción importante de deslizamientos pueden propagarse grandes distancias (n y r altos) por lo que aún grupos de dislocaciones lentas son detectables. Al haber endurecimiento por trabajado se reduce la distancia recorrida (r) y por lo tanto la cantidad de eventos detectables. Es por ello que sólo en monocristales de alta pureza y policristales de grano muy grande (ambos con r alto) se pueda detectar movimiento no coordinado de dislocaciones individuales.

En metales policristalinos la máxima distancia que puede desplazarse una dislocación es la del radio del grano más grande. Por lo tanto en granos pequeños se necesita un movimiento cooperativo de dislocaciones, es decir n alto para compensar la disminución de r .

La resistencia mecánica, distribución y coherencia con la matriz de los precipitados también influyen en la EA. Así precipitados resistentes, espaciados ampliamente e incoherentes con la matriz generan niveles moderados de EA ya que el deslizamiento es uniforme y r es pequeño. Por el contrario precipitados débiles, espaciados cercanamente y coherentes con la matriz generan una intensa EA. Esto es así ya que los precipitados sufren un proceso de corte creando una inestabilidad local del estado de deformaciones.

1.2.2. Fractura

Dentro de las fuentes de EA por fractura podemos mencionar: microfractura por clivaje, microfractura intergranular, microfractura de partículas y coalescencia de microcavidades.

La microfractura por clivaje ocurre a temperaturas por debajo de la de transición dúctil-frágil en planos cristalográficos específicos. Estas microfisuras de clivaje se nuclean por discontinuidades preexistentes, apilamiento de dislocaciones o intersección de planos de deslizamiento. Las velocidades de propagación de las ondas transversales generadas son cercanas al límite teórico.

Los bordes de granos son sitios menos resistentes que el interior de ellos. Esto está asociado a la segregación de ciertos elementos químicos fragilizantes o con la formación de fases frágiles en los bordes. Una vez producida la fractura puede avanzar rápidamente sobre grandes distancias ya que el número de barreras es limitado (puntos triples de bordes de grano), generando abundante EA.

Muchas inclusiones y precipitados son frágiles a temperatura ambiente. La generación de EA de estos microconstituyentes dependerá de las propiedades de la partícula, la interfase con la matriz y las dimensiones de la partícula. En los aceros la fractura de inclusiones de MnS es una fuente importante de EA. El contenido de S, tamaño y forma de las inclusiones junto con el estado de tensiones son los factores que controlan la EA de las inclusiones.

La coalescencia de cavidades ocurre en una secuencia de procesos y se asocia al crecimiento de una fisura dúctil: a) durante la carga ocurren fisuras o desuniones en la interfase inclusión-matriz generando concentración de tensiones en la matriz b) se produce un crecimiento de las cavidades y de las tensiones por deformación plástica de los ligamentos entre inclusiones c) surgen cavidades secundarias d) las cavidades secundarias se unen formando una fisura de dimensiones del orden del espaciado de inclusiones.

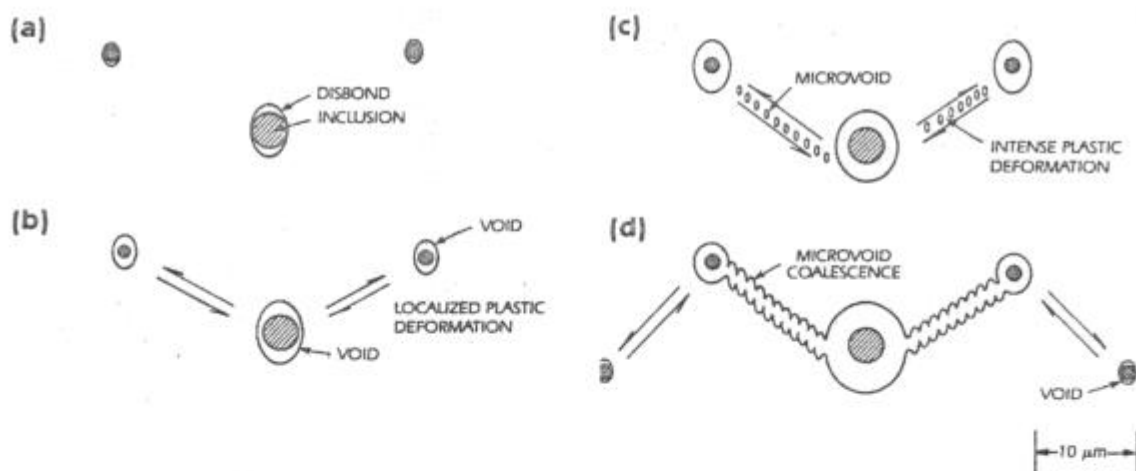


Fig. 2. Emisión acústica por propagación de fisura dúctil

En materiales con baja tensión de fluencia y alto endurecimiento por trabajado la velocidad de propagación (v) y el espaciado entre fisuras (r) es bajo y por lo tanto también es baja la cantidad de EA detectable. En materiales con alta tensión de fluencia y bajo endurecimiento por trabajado, la pérdida de área ocasiona una inestabilidad en el estado de deformaciones y ésta una coalescencia por corte. Las velocidades son intermedias y la distancia de propagación es la interinclusional. Este esfuerzo de corte es una fuente de EA potencialmente detectable.

La intensidad del pulso es proporcional al cambio de volumen por lo que se produce una fractura frágil, ésta genera un evento más intenso que una dúctil.

1.2.3. Transformaciones de fase

Las transformaciones de fase en estado sólido causan un desarrollo de tensiones internas debido a la diferencia en densidad, módulo de corte y coeficiente de expansión térmica entre las fases. Así surgen campos de tensiones, microfracturas, microplasticidad y otros mecanismos que relajan el campo de tensiones.

Se ha investigado el efecto en la EA de la velocidad de enfriamiento que acompaña a las transformaciones en aceros al carbono, concluyéndose que sólo en la transformación martensítica se obtiene una cantidad detectable de EA. En ella la estructura cristalina resultante es distinta a la de la matriz original, tiene un plano de hábito irracional y la dirección de deformación no es coplanar con dicho plano. Esto produce un cambio de volumen que actúa como generador de EA. Además al estar la transformación constreñida se crean tensiones residuales que al interactuar con el cambio de constantes elásticas producen más EA. Las tensiones pueden ser lo suficientemente altas como para producir deformación plástica y maclado generando aún más EA.

1.3 Ondas acústicas

1.3.1 Descripción física

Las señales de EA son la respuesta del sensor a la onda acústica que se propaga por el material desde la fuente. La mayor parte de la complejidad en estas señales se genera en la propagación de la onda. Es por ello que hay que conocer las propiedades del medio a través del cual se propagan dichas ondas.

Los átomos se mantienen unidos por fuerzas atractivas pero también existen fuerzas repulsivas de corto rango que impiden que se aproximen demasiado. La superposición de estas fuerzas resulta en una posición de equilibrio del átomo en la que tiene su mínima energía y por lo tanto es la configuración más estable. Al aumentar la temperatura, los átomos ganan cierta energía e incrementan las oscilaciones alrededor de sus posiciones de equilibrio. La energía cinética de los átomos es energía térmica. La relación entre la magnitud de la energía térmica y la intensidad de las fuerzas atractivas determinan si el material es un sólido, líquido o gas. En los sólidos, las posiciones de equilibrio retienen una relación geométrica fija entre ellas. La geometría de esta relación determina la estructura cristalina del sólido [7].

El movimiento de los átomos adyacentes está acoplado, de tal manera que permite la transferencia de energía cinética entre ellos. Para las componentes de mayor energía (alta frecuencia) de este movimiento atómico, el acople es débil y la correlación entre los movimientos atómicos se extiende sólo a los vecinos cercanos. Este tipo de movimiento correlacionado de corto rango, da como resultado una transferencia de energía difusiva en el material y se conoce como conducción térmica. Sin embargo, para movimientos atómicos de muy baja frecuencia el acople se puede extender sobre muchos átomos. Este movimiento correlacionado de largo rango es una onda acústica [7].

En una onda acústica muchos átomos se desplazan en una pequeña región en la misma dirección a partir de sus posiciones de equilibrio. Este desplazamiento es una deformación local en el cristal. La deformación es tal que su dirección y magnitud están cambiando constantemente al moverse los átomos. Como el movimiento atómico es pseudo-oscilatorio, también lo es la deformación. Así, una onda acústica es una deformación oscilatoria moviéndose a través de un material. Debido a que la deformación y el esfuerzo están siempre relacionados en un material, hay también un campo de esfuerzo oscilatorio [7].

1.3.2 Ecuación de onda

La ecuación de movimiento para desplazamientos en un medio isotrópico, homogéneo, elástico y lineal con una fuerza externa aplicada, llamada ecuación de elasticidad de Navier es

$$(\lambda + \mu)u_{k,ki} + \mu u_{i,jj} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1.2)$$

u_i = componentes del vector desplazamiento

λ, μ = constantes de Lamb.

En la notación empleada una coma en los subíndices significa una derivada parcial, esto es $u_{i,j} = \partial u_i / \partial x_j$. Los subíndices repetidos denotan una suma sobre todos los valores (convención de Einstein), o sea $u_{i,kk} = u_{i,11} + u_{i,22} + u_{i,33}$.

Una solución general de la misma puede escribirse como suma de dos tipos de funciones de desplazamiento

$$u_i = u_i^d + u_i^e \quad (1.3)$$

El primer sumando representa un movimiento en el que un cubo cambia de volumen sin rotar y el segundo hay un cambio en sus ángulos pero no en el volumen. Las ondas dilatacionales viajan con velocidad c_1 y las distorsionales con velocidad c_2 .

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.4)$$

Estas ecuaciones indican que la velocidad de onda aumenta con la fuerza restauradora atómica y disminuye con la densidad.

Un caso especial se da cuando el argumento de las funciones (1.3) es constante en un plano. Se dice que son ondas planas longitudinales para el primer sumando y ondas planas transversales para el segundo sumando. La mayor parte de las ondas originadas en una fuente puntual son esféricas, pero suficientemente alejadas de la fuente pueden aproximarse a planas en una región pequeña.

Una forma especial de las ondas planas son las ondas armónicas simples

$$u_1 = A \cos(k_1 x_1 - \omega t) \quad u_2 = A \cos(k_2 x_2 - \omega t) \quad (1.5)$$

donde k_i es el número de onda y ω la frecuencia angular.

1.3.3 Tipos de ondas acústicas

El camino recorrido por una partícula bajo la influencia de una onda acústica puede ser representado generalmente por una elipse con uno de sus ejes orientado en la dirección de propagación de la onda. El tipo de onda queda determinado por la relación entre el movimiento de la partícula y la dirección de viaje de la onda.

Las ondas que viajan a través de un medio cuyas dimensiones son mucho más grandes que la longitud de onda se llaman ondas de volumen. Hay dos tipos de estas ondas: longitudinales (compresión) y transversales (de corte). En ambos casos, el eje menor de la elipse se hace cero, con lo que se obtiene un movimiento lineal oscilatorio. Las ondas longitudinales son ondas donde este movimiento es paralelo a la dirección de la propagación de la misma

mientras que en las ondas de corte el movimiento es perpendicular a la dirección de propagación. Ambos tipos de onda se ilustran en la fig. 3.

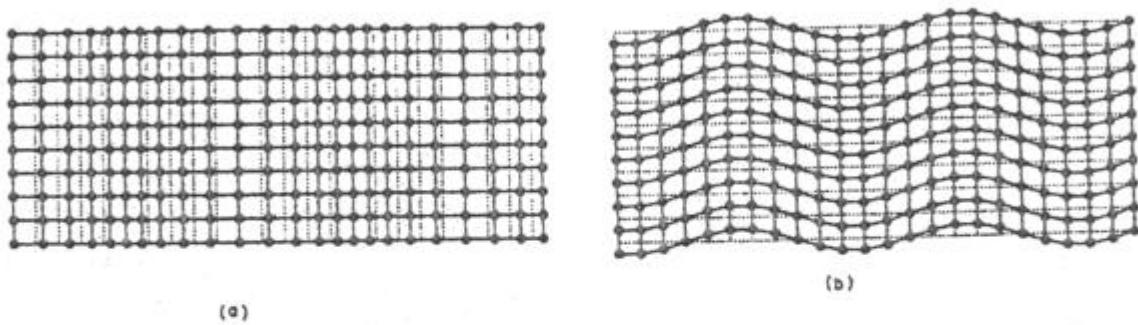


Fig. 3. Desplazamiento de partículas para ondas acústicas en un instante de tiempo. a) Onda longitudinal b) Onda transversal.

Como los movimientos relativos de las partículas son diferentes, también lo son las constantes elásticas y por consiguiente las velocidades. Las ondas acústicas frecuentemente tienen componentes longitudinales y transversales, pero cada componente viaja a su velocidad, por lo que en un medio sin atenuación y sin dispersión, una onda transitoria, tomada a una cierta distancia de su punto de origen, puede aparecer como dos ondas separadas, una longitudinal y otra transversal.

La anisotropía de las fuerzas de acople entre los átomos en la superficie de un sólido puede producir tipos adicionales de ondas. Una onda de superficie tiene su amplitud máxima en la superficie del sólido y ésta va decreciendo a medida que aumenta la distancia a la superficie. El plano de la elipse de movimiento de la partícula, puede ser paralelo (ondas de Love) o perpendicular (ondas de Rayleigh) a la superficie, pero ya que la mayoría de los sensores de EA detectan movimientos perpendiculares a la superficie, rara vez se puede detectar la componente paralela a la misma. La velocidad de la onda de Rayleigh es ligeramente inferior que la de la onda de corte (ver Tabla 1) [7].

Si el sólido está limitado por dos superficies, de tal manera que es una lámina y el espesor es del orden de unas cuantas longitudes de onda pueden aparecer ondas de Lamb. Estas ondas son esencialmente dos ondas de superficie sincronizadas ya sea simétricamente o antisimétricamente.

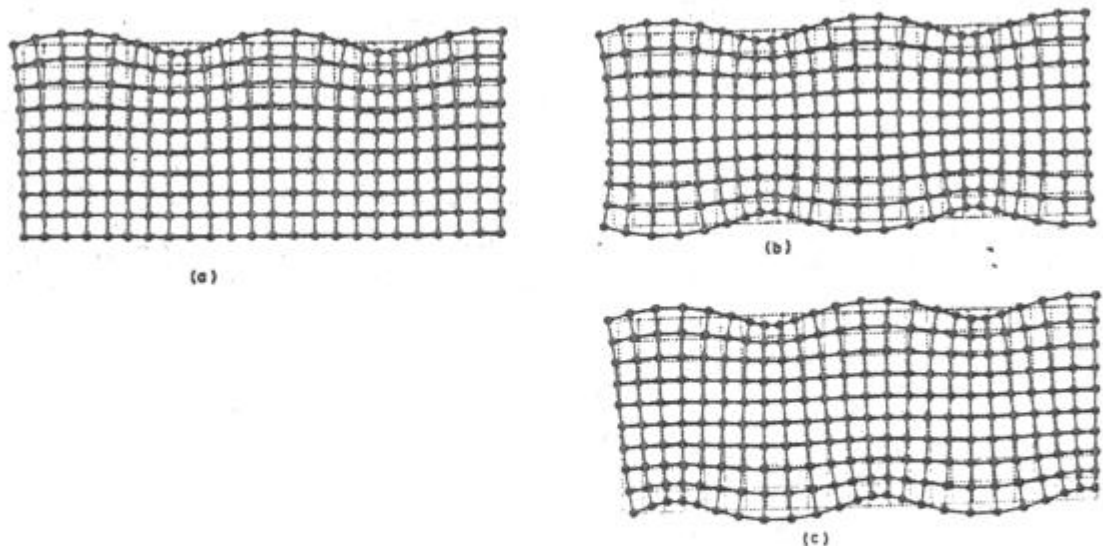


Fig.4. Desplazamiento de partículas para ondas acústicas en un instante de tiempo. a) Onda de Rayleigh b) Onda de Lamb primer modo simétrico c) Onda de Lamb primer modo antisimétrico.

1.3.4 Atenuación

Atenuación geométrica

Una onda generada en una fuente localizada se propaga en todas las direcciones. En un medio sin pérdidas, la amplitud de la onda decrece a medida que esta se aleja del centro para mantener la energía constante. El desplazamiento en la dirección radial, u_r , puede expresarse según (1.6)

$$u_r = -\frac{1}{4\pi c_1^2} \left\{ \frac{1}{r^2} g\left(t - \frac{r}{c_1}\right) + \frac{1}{rc_1} g'\left(t - \frac{r}{c_1}\right) \right\} \quad (1.6)$$

A distancias lejanas la amplitud decrece en proporción $1/r$. Este fenómeno es válido para ondas dilatacionales y distorsionales. Si las ondas son suma de ambas también la atenuación es con $1/r$.

Un fenómeno similar ocurre con las ondas de superficie, sólo que a distancias lejanas a la fuente la atenuación sigue una ley $1/r^{1/2}$. Esto puede explicarse como si una onda bidimensional se propagara en un cilindro. Como la superficie es proporcional al radio y la energía a u^2 tenemos el decrecimiento con $1/r^{1/2}$. Las ondas de Lamb también sufren una atenuación de $1/r^{1/2}$, ya que se propagan por una superficie.

Atenuación por dispersión

La dispersión es un fenómeno causado por la dependencia de la velocidad de las ondas con respecto a la frecuencia en ciertos sistemas físicos. La velocidad de la ecuación (1.4) es la velocidad de fase para distinguirla de la velocidad de grupo que es la velocidad a la que se propaga la energía de un paquete de ondas de varias frecuencias centradas en ω .

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (1.7)$$

En ausencia de dispersión ambas velocidades son iguales pero en sólidos finitos la velocidad de grupo es menor que la de fase. La presencia de dispersión se da en medios sólidos donde la longitud de onda es comparable con una o más dimensiones del medio. Esto trae efectos en EA cuando se trata de la localización de fuentes midiendo la diferencia en los tiempos de arribo [7].

Atenuación por dispersión y difracción

Las ondas interactúan con las discontinuidades presentes en el medio, como cavidades, fisuras, inclusiones. Cuando las ondas encuentran algún tipo de interfase son total o parcialmente reflejadas. De hecho se encuentra que hay energía propagándose en todas las direcciones en el caso de una onda plana que se encuentra con una cavidad o inclusión. En este caso se dice que se produjo dispersión ("scattering").

Una onda que encuentra una punta de una fisura, por ejemplo, en parte se refleja y en parte se transmite. Esta energía transmitida es difractada en la región de sombras de la fisura. Ambos fenómenos pueden disminuir (o en algunos casos incrementar) la amplitud de la onda.

Atenuación por mecanismos de pérdida de energía

En los mecanismos discutidos anteriormente, si el medio era elástico no había pérdida de energía mecánica. Pero en general la propagación de ondas es no conservativa. La energía mecánica puede convertirse en térmica debido a acoplamiento termoelástico. También puede perderse por: deformación plástica si el medio es tensionado más allá del límite elástico, creación de nuevas superficies en la extensión de fisuras, interacción con movimiento de dislocaciones.

Las pérdidas están asociadas a: 1) comportamiento viscoelástico 2) fricción entre superficies que deslizan 3) inclusiones o fibras en materiales compuestos no completamente unidas. También pueden aparecer por interacciones magnetoelásticas, interacción con los electrones de conducción en los metales.

Si el medio es homogéneo, las pérdidas ocurren uniformemente a medida que la onda viaja por el medio. Si la onda es una función armónica simple, el movimiento de la partícula puede describirse por:

$$y = Ae^{-\alpha x} e^{j(kx - \omega t)} \quad (1.8)$$

El coeficiente α en general depende de la frecuencia.

1.4 Sensores

Los sensores de EA son transductores que se aplican sobre la superficie del objeto a ensayar para detectar movimientos de la misma y convertirlos en una señal eléctrica. Esta señal está influenciada fuertemente por el tipo de sensor empleado.

En general en EA se usan sensores que tienen piezoeléctricos como elementos transductores. La piezoelectricidad es un efecto que aparece en algunos materiales que consiste en la aparición de un momento dipolar eléctrico al aplicárseles un esfuerzo. Se comprueba experimentalmente que la magnitud del momento dipolar eléctrico es proporcional al esfuerzo aplicado. Es un fenómeno que ocurre en materiales cuyos cristales no tienen centro de simetría. El dipolo se produce cuando una deformación cambia los centros de carga positiva y negativa de tal forma que éstos ya no coinciden. Un piezoeléctrico común es un cerámico llamado PZT (titanato zirconato de plomo) que también es ferroeléctrico, o sea conserva una polarización aún en ausencia de deformación.

La mayor parte de los sensores están diseñados para responder a la componente normal a la superficie de la onda incidente, aunque pueden diseñarse para detectar las dos componentes tangenciales a la superficie. El rango de frecuencias que usan los sensores de EA está entre 30 kHz y 1 MHz. El límite inferior está gobernado por el ruido de fondo en tanto que el límite superior por la atenuación que sufren las ondas de mayor frecuencia que restringen el rango de uso del sensor.

Los sensores son puestos en contacto con la superficie por medio de un acoplante o bien un adhesivo. Sin ellos o sin una fuerza firme que sujete al sensor sólo algunos puntos del objeto tendrían buen contacto con el sensor. Cualquier fluido (aceite, agua, glicerina) puede usarse como acoplante para la transmisión de la componente normal, en tanto que para la tangencial se necesitan fluidos de alta viscosidad (resinas epoxy) ya que los otros no transmiten los esfuerzos de corte. Los adhesivos transmiten bien ambos esfuerzos.

El elemento piezoeléctrico se conecta a tierra y a la señal principal. Hay 2 dimensiones importantes para su diseño: el espesor y el diámetro. El espesor controla las frecuencias a las cuales la salida es mayor. Las longitudes de onda correspondientes a esas frecuencias son $t = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2$. Atrás de los elementos activos se coloca un elemento de amortiguamiento (backing) hecho de epoxy curado con contenidos de partículas de alta

densidad (tungsteno). En este elemento muchas de las ondas pasantes se atenúan por dispersión y absorción por lo que poca energía vuelve al sensor. Además el amortiguamiento carga al elemento activo de modo que este último es menos resonante y cubre un ancho de banda mayor. Generalmente la frecuencia natural del sensor se escoge por arriba de la banda de interés, entre 1 y 2 MHz [1]. El diámetro define el área sobre la cual el sensor promedia el movimiento de la superficie. Si la onda es longitudinal e incide perpendicularmente al sensor la deformación es uniforme en la superficie del mismo. Si en cambio es una onda de Rayleigh que viaja paralela a la superficie la distribución de la deformación depende de la longitud de onda, que en el caso de ser igual al diámetro tendría una deformación nula. Este efecto de apertura hace que se escoja un diámetro lo menor posible. Una solución alternativa es disponer de una geometría cónica en lugar de cilíndrica que mantiene su ancho de banda en todas las direcciones con el costo de una menor sensibilidad [1]. Los sensores están cubiertos por una armadura que provee protección mecánica y minimiza la interferencia electromagnética.

Aparte de captar la señal, los sensores pueden ser usados como guardas. El propósito de los mismos es separar las señales que arriban antes a estos sensores que a los que están situados en región de interés.

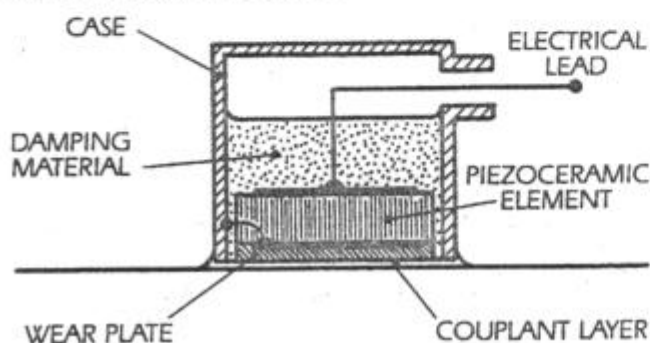


Fig. 5. Esquema de un sensor de emisión acústica

1.5 Instrumentación en EA

Todo sistema de EA tiene un sensor y un preamplificador, y generalmente se incluyen postamplificadores y procesadores de señal de distintos tipos. Los equipos más especializados incluyen registradores de transientes, analizadores de espectro, circuitos de discriminación espacial (guardas), analizadores de distribución. Los sistemas modernos de EA están basados en microcomputadoras con tarjetas de hardware diseñadas para medir las señales y parámetros de EA. Estas mediciones son pasadas al CPU de la microcomputadora que controla el despliegue de gráficos en tiempo real y su almacenamiento. Ver fig.1 del capítulo 3.

1.5.1 Amplificadores

Al conectar el sensor a un amplificador por medio de un cable coaxial se produce una pérdida de sensibilidad. La solución es conectar un preamplificador de ganancia fija cerca del sensor y un postamplificador de ganancia variable en el grupo principal de instrumentación. Hay modelos de sensores que incluyen al preamplificador dentro de la carcasa. Los preamplificadores tienen entrada de bajo ruido, filtros pasabanda y salida de baja impedancia capaz de soportar cables de 50 ohms [7]. El nivel de ruido a la entrada es proporcional a la raíz del ancho de banda por lo que, entre otras razones, se usan filtros pasabandas. Si se conoce el rango de frecuencias conviene usar filtros de banda angosta. En EA para definir las frecuencias alta y baja de estos filtros es necesario establecer un límite de 40 dB ya que las energías de aquellas frecuencias son altas. Por lo tanto una característica deseable en estos filtros es una rápida caída de la amplitud por octava. Otro parámetro importante es el rango dinámico que es la razón entre el máximo voltaje de salida sin distorsión del preamplificador y el ruido a la

entrada amplificado. En general está entre 60 y 80 dB y es conveniente que sea alto [5]. Muchos sistemas tienen postamplificadores con ganancia variable. La ganancia del sistema es la suma de ambas.

1.5.2 Registradores de transientes

Estos elementos digitalizan la señal en tiempo real, o sea toman los valores de la señal a una frecuencia determinada, no hacen un promedio de la señal en un momento determinado. Tienen un amplio rango de tasas de muestreo. El teorema de Nyquist establece que dicha tasa debe ser mayor a 2 veces la frecuencia más alta a los fines de no perder información.

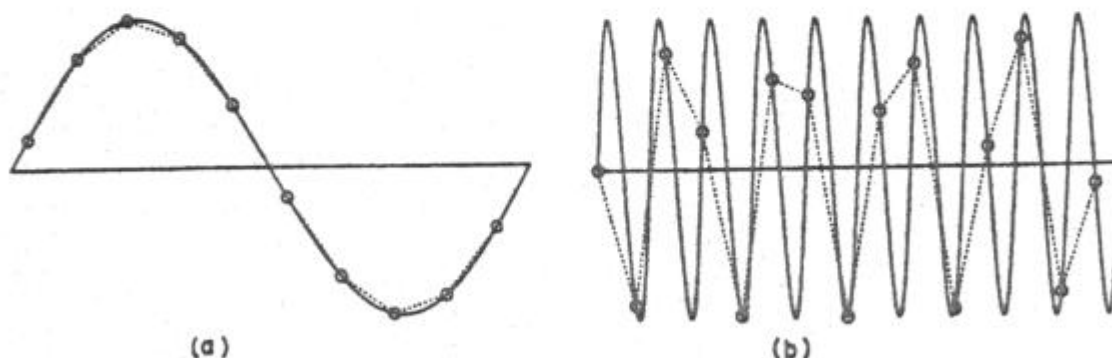


Fig. 6. Efecto de la tasa de muestreo: a) 10 muestras por periodo b) Menos de 2 muestras por periodo mostrando aliasing.

Tasas de muestreo bajas producen una distorsión llamada aliasing como se ve en la fig. 6 b). La presencia de frecuencias mayores a las de Nyquist hace que éstas se reflejen en las menores. Para prevenir este efecto es necesario usar filtros pasabajos antes de digitalizar.

Hay un modo de gatillado usado en estos elementos que es el pretriggering. En él la señal es continuamente digitalizada hasta que se llene la memoria. Entonces se desecha la primera parte y se guardan la última información. Esto permite analizar la porción de bajo nivel que ocurre antes de que la señal cruce el umbral.

1.5.3 Análisis digital

El empleo de las microcomputadoras amplió mucho el uso de las técnicas digitales en el análisis de la señal. Además de las limitaciones mencionadas en la digitalización, hay un tope en la velocidad de transferencia de datos hacia la computadora. Otra limitación en la cadena se encuentra en la velocidad de transferencia a un medio magnético de registro, que puede hacer perder una cantidad importante de información. Una estrategia es guardar registros en memoria y luego pasarlos a un soporte magnético (disco rígido) cuando disminuya la tasa de eventos. Para altas tasas este mecanismo da sólo una muestra de toda la EA producida.

Otra limitación se encuentra en la capacidad del registro. En un sistema como el usado en este trabajo puede llegar hasta 15 k, por lo que muestreando a una tasa de 4MHz daría una duración de 4 ms. En ciertas estructuras o en procesos la duración del evento puede ser mayor que la capacidad del registro y por lo tanto perder la cola del mismo. El contenido espectral de la misma es de frecuencias resonantes de la estructura, por lo que la pérdida en este aspecto no sería tan importante como lo es en la medición de la energía, largo del pulso o de la envolvente.

Uno de los cálculos básicos para distintos tipos de análisis es la transformada discreta de Fourier que pasa los datos del dominio del tiempo a los de la frecuencia. Esta se encuentra

implementada en algoritmos que aceleran el tiempo de cálculo llamados Fast Fourier Transform (FFT). Otro tipo de cálculo usado es el de correlación cruzada que nos dice cuan parecidas son dos señales $f_i(t)$ y $g_i(t)$ (1.9)

$$C_i(t) = f_i(t) \otimes g_i(t) \quad (1.9)$$

1.5.4 Parámetros de medición de la señal

Los sistemas modernos de EA aparte de digitalizar la señal involucran la medición de parámetros de cada hit recibido, siendo un hit cada señal que sobrepasa el umbral por cada sensor. Los cinco parámetros mayormente utilizados son: cuentas, amplitud, duración, rise time y energía que es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificada (MARSE measured area under rectified signal envelope) [4].

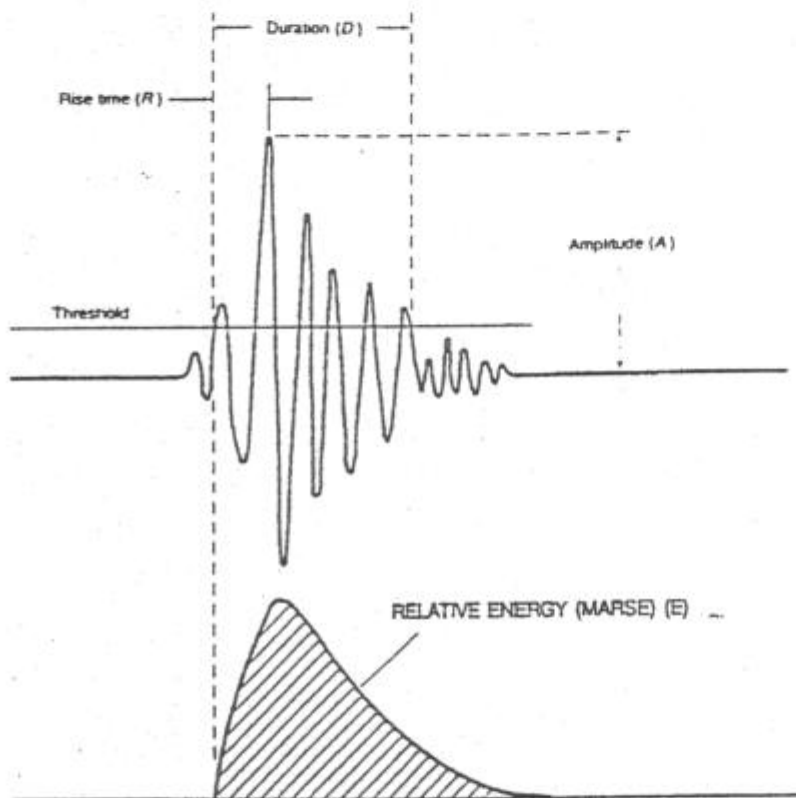


Fig. 7. Parámetros más usuales en Emisión Acústica

La amplitud determina la detectabilidad de la señal y está relacionada con la magnitud de la fuente del evento. Las cuentas (ringdown) son la cantidad de veces que el hit cruza el umbral. Depende de la magnitud de la fuente, de las propiedades acústicas y reverberantes de la probeta y el sensor, de la ganancia y umbral del equipo. MARSE es también conocido como cuentas de energía (E); es sensible a la amplitud y duración y menos dependiente con respecto al umbral. Es el más adecuado para medir la actividad total de EA. La duración depende de los mismos factores que las cuentas. Es valioso en la medición de procesos largos en la fuente y calificación de tipos de señal. El rise time, tiempo entre el inicio del hit y su pico, está gobernado por los procesos de propagación de la onda. Se usa para calificación de señales y separación de ruidos.

Otra medición muy usada es el valor RMS (root mean square) que es ideal para el monitoreo de emisión continua, en particular en procesos de fabricación, y es también útil para bursts [1]. Su definición es

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} v^2(t) dt} \quad (1.10)$$

Esta definición es tal que la potencia de la señal es directamente proporcional al cuadrado del V_{rms} . El tiempo de medición del V_{rms} es mayor que la duración promedio de los bursts de EA por lo que no puede seguir la envolvente de los mismos. Eventos de alta repetición y amplitud pequeña aparecerán como una salida constante en tanto que eventos de amplitud grande y de ocurrencia en largos intervalos mostrarán picos.

Referencias

1. C. B. Scruby, "An Introduction to Acoustic Emission", J. Phys. E. Instrum., Vol. 20 N°8, pp. 946-953, 1987
2. J. E. Ruzzante, Emisión Acústica (parte 1), CNEA –NT 9/91
3. ASTM, "Standard terminology for Nondestructive examinations", ASTM E-1316-93b, Section B, Vol. 03.03 "Nondestructive testing", 1993
4. A. A. Pollock, Acoustic Emission inspection, Methods of non Destructive Evaluation, Metals Handbook, Ninth Edition, Vol. 17, pp. 278-294, 1989.
5. H.N.G. Wadley, C. B. Scruby and J. H. Speake, "Acoustic Emission for physiscal examination of metals", International Metals Review, N°2, 1980
6. ASNT, Non Destructive Testing Handbook, Acoustic Emission Testing, Vol. 5, 2nd Edition, pág. 72, American Society for Non Destructive Testing, 1987
7. A. G. Beattie, "Acoustic Emission, Principles and Instrumentation", Journal of Acoustic Emission, Vol. 2 N° 1-2

2. Emisión acústica en el mecanizado de metales

2.1 Proceso de mecanizado en metales. Fuerzas actuantes

Examinaremos el corte ortogonal en el cual el material es removido por un filo simple, paralelo a la superficie de trabajo y perpendicular a la dirección de corte, siendo éste un caso de dos dimensiones. La razón es que la mayoría de las operaciones de mecanizado son geométricamente complejas y si bien ningún análisis puede hasta el momento predecir ajustadamente las condiciones de corte en situaciones prácticas, se puede explicar cualitativamente el fenómeno observado. Dentro del corte ortogonal, como trabajaremos a altas velocidades, se describirá el modelo de la zona fina de deformación de Merchant. Las suposiciones adoptadas en su análisis son:

- La punta de la herramienta está afilada y no hay fricción o labrado ("ploughing") entre material y herramienta
- La deformación es plana, no hay deformación hacia los costados
- Los esfuerzos en el plano de corte están uniformemente distribuidos
- La fuerza resultante R en la viruta sobre el plano de corte es igual, opuesta y colinear con la fuerza R aplicada a la viruta en la interfase herramienta viruta

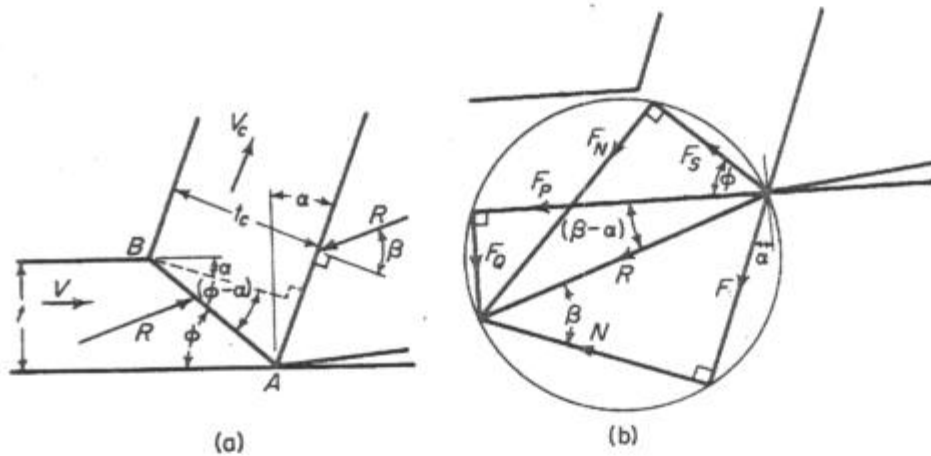


Fig. 2.1. Diagrama de fuerzas del modelo utilizado

En la figura 2.1 se muestra la descomposición de la resultante R en una componente paralela a la dirección de la velocidad de corte (F_p) y otra perpendicular a la misma (F_Q). Dichas componentes tienen las expresiones (2.1) y (2.2). Una segunda descomposición resulta en la fuerza de rozamiento sobre el flanco y una perpendicular a esta última.

$$F_p = \frac{tb\tau \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (2.1)$$

$$F_Q = \frac{tb\tau \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (2.2)$$

En las relaciones anteriores τ es el esfuerzo de corte en el plano de corte, considerado uniforme sobre dicho plano, ϕ es el ángulo de corte, α es el ángulo de ataque de la herramienta, t es el espesor de la viruta sin deformar, b es el ancho de corte. El ángulo β es considerado el ángulo de fricción entre la herramienta y la viruta. El ángulo de corte ϕ se puede determinar experimentalmente a partir de la relación espesor-viruta en el material de trabajo según (2.3) y (2.4).

$$r = \frac{t}{t_c} \quad (2.3)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (2.4)$$

Aplicando el principio de mínima energía y considerando a β y τ independientes de ϕ se obtiene (2.5)

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \quad (2.5)$$

Conocidos τ , b , α , t , t_c se pueden calcular las componentes de las fuerzas.

Si bien este modelo describe bien cualitativamente el proceso, cuantitativamente no, ya que la ecuación (2.5) resulta inexacta. Otros autores llegan a ecuaciones lineales de ϕ en función de $(\beta - \alpha)$ [1].

La potencia se calcula como

$$P = F_p \cdot V \quad (2.6)$$

donde V es la velocidad superficial.

La deformación puede ser concebida como un proceso de deslizamiento de planos preferenciales como se muestra en la figura 2.2. De ella puede deducirse una expresión para la deformación de corte y la velocidad de deformación (2.7) y (2.8)

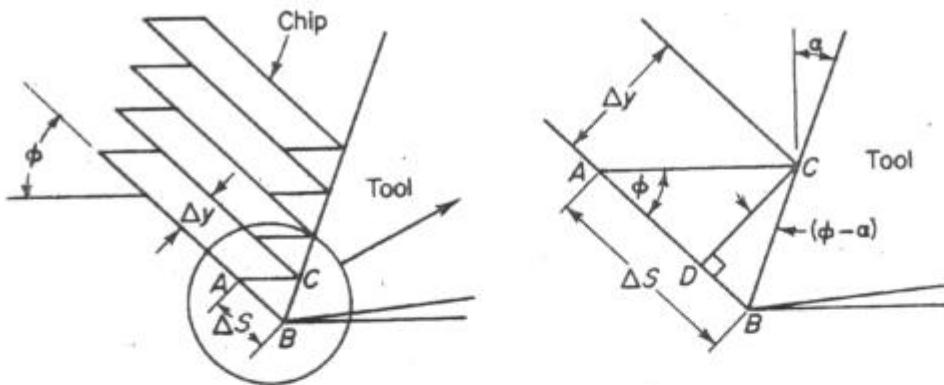


Fig. 2.2 Modelo de la deformación por corte en mecanizado (por Piispanen)

$$\gamma = \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} \quad (2.7)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta S}{\Delta y \Delta t} = \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \frac{V}{\Delta y} \quad (2.8)$$

2.2 Desgaste de la herramienta

2.2.1 Características generales

La figura 2.3 muestra las superficies típicas de desgaste de la herramienta en un mecanizado en un corte transversal. La figura 2.4 muestra como se puede desgastar una herramienta afilada. A lo largo de la superficie de ataque el movimiento de la viruta y los altos esfuerzos normales producen un cráter. En la superficie de salida se produce el desgaste del flanco por el movimiento relativo entre pieza y material y los altos esfuerzos normales. Finalmente la punta del filo aumenta su radio por adhesión del material, fenómeno llamado filo recrecido ("built-up edge", BUE). Los cambios producidos en la geometría alteran el estado de tensiones, pudiendo producir la fractura de la herramienta.



Fig. 2.3 Superficies típicas de desgaste

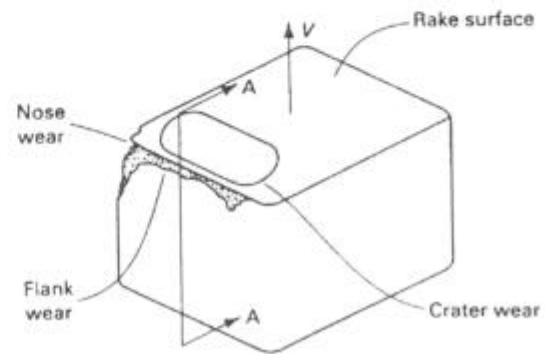


Fig. 2.4 Superficies comunes de desgaste en insertos para torneado

La distribución de esfuerzos (fig. 2.5) normales es causada por las fuerzas normales actuantes sobre la superficie de ataque, la punta cortante y la superficie de salida. Los esfuerzos de corte están asociados a procesos de pegado ("sticking") y de deslizamiento. En la zona donde se produce el pegado la fuerza normal tiene una magnitud tal que resulta en una componente de corte igual al esfuerzo de fluencia del material endurecido por trabajado. La viruta en esta zona se adhiere y periódicamente se separa por los planos de fractura de corte. En la zona de rozamiento existen fuerzas de fricción y esfuerzos de corte asociados que varían en función de los esfuerzos normales y el coeficiente de fricción. La lubricación y rugosidad de la pieza afectan el valor de estos esfuerzos.



Fig. 2.5 Distribución de esfuerzos en la superficie de desgaste

2.2.2 Mecanismos

Los cuatro mecanismos principales de desgaste son: agarrotamiento, desgaste por fusión, desgaste dominado por oxidación-difusión, desgaste dominado por plasticidad (fig. 2.6) [2]. Para pares de materiales en contacto se han realizado mapas de desgaste para detectar bajo qué condiciones de presión y velocidad se dan los mecanismos mencionados. La temperatura es una variable dependiente de la presión, velocidad y tamaño de la superficie de desgaste.

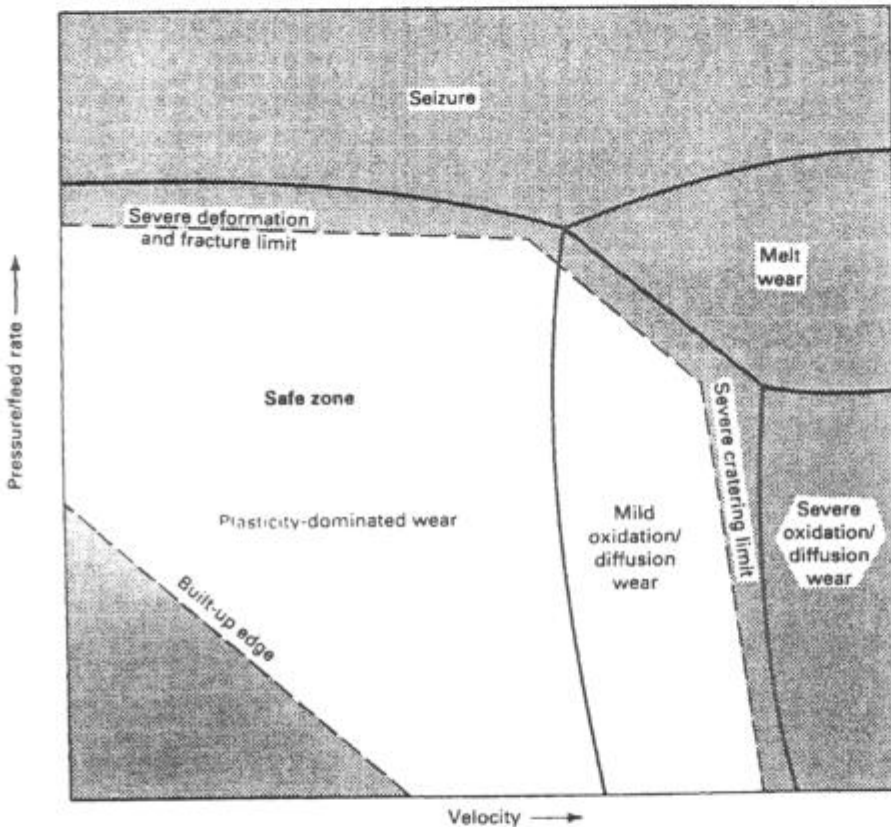


Fig. 2.6 Mapa de mecanismos de desgaste. El área punteada es la zona segura de operación para herramientas de corte.

- **Mecanismos iniciales:** Debido a la rugosidad de los materiales el contacto entre piezas es una fracción pequeña del área proyectada. Esto provoca un aumento de la temperatura y de los esfuerzos que desencadena una remoción del material por agarrotamiento o fusión en la aspereza. Si las fuerzas de corte quedan iguales, disminuye la presión pasando a mecanismos de plasticidad y/o oxidación/difusión moderada.
- **Mecanismos en el estado estacionario:** el proceso más común en la cara de salida es el de abrasión en cual hay deformación plástica y fractura de partículas. En la cara de ataque puede ocurrir que se produzca un cráter siendo la difusión el mecanismo dominante ya que en dicha zona se da el máximo de temperatura. En el filo de corte se puede formar un filo recrecido (BUE) por la adhesión de partículas del material a la herramienta. Si las presiones no son altas ese material no es removido y se altera la geometría del filo causando inestabilidades y daños a la superficie de trabajo. En procesos en los que la herramienta corta alternativamente se produce fatiga térmica y por impacto.
- **Mecanismos terciarios:** Durante el período anterior se agranda la zona de desgaste llegando a un valor crítico que acelera el proceso. Se produce una rápida oxidación difusión o condiciones locales de agarrotamiento o fusión que llevan a una rotura rápida de la herramienta.

2.3 Fuentes de EA en el mecanizado de metales

Las investigaciones sobre el proceso de EA en el mecanizado de metales han sido generalmente limitadas al llamado corte ortogonal.

De los procesos anteriormente mencionados como fuentes de EA, la deformación plástica y la fractura son de importancia en el maquinado de metales. En la configuración de corte ortogonal podemos distinguir tres zonas en la generación de fuentes de EA:

- a) Zona de deformación primaria: el filo de la herramienta al ir poniéndose en contacto y presionar al material, hace que la zona que se encuentre delante del filo se corte y la viruta así formada se mueve sobre la cara anterior de la herramienta deformándose parcialmente.
- b) Zona de deformación secundaria: es la interfase viruta-herramienta donde hay rozamiento (sliding) y deformación parcial.
- c) Zona terciaria: el rozamiento entre la superficie nueva generada por el arranque de la viruta y el flanco constituye una fuente de EA.

También cabe agregar como fuente, la rotura de viruta y la caída de viruta, ya sea continua o discontinua, sobre el material de trabajo o herramienta [3].

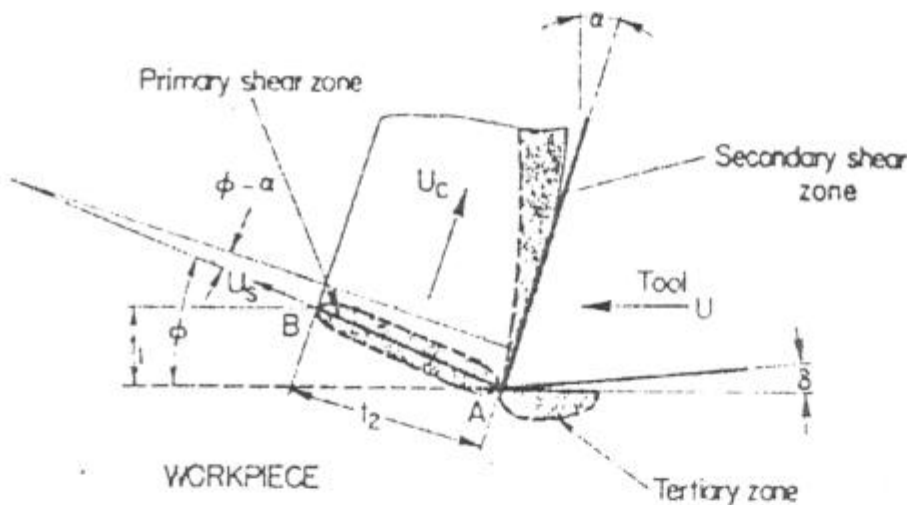


Fig. 2.7 Zonas de interés en el proceso de corte de metales

- α = ángulo de ataque
- δ = ángulo del flanco
- ϕ = ángulo de corte
- U = velocidad de corte
- U_c = velocidad de la viruta
- U_s = velocidad en el plano de corte
- t_1 = ancho de viruta sin cortar
- t = ancho de la viruta

2.4 Relaciones entre parámetros de EA y de mecanizado deducidas de análisis teóricos

Las relaciones deducidas por Kannatey-Assibu y Dornfeld [3] se concentran en las dos primeras zonas productoras de EA. La generación de EA por desprendimiento de viruta puede ser minimizada desviando la viruta formada fuera del área de trabajo. Las fuentes de la zona terciaria pueden ser disminuidas usando herramientas afiladas y considerando sólo la etapa inicial del mecanizado.

En cuanto a la potencia en la zona primaria tenemos que, bajo condiciones estacionarias, τ_k (esfuerzo de corte) y γ (tasa de deformación de corte) son constantes por lo que la potencia en esta zona resulta según (2.9)

$$W_p = b_1 t_1 \tau_k \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} U \quad (2.9)$$

En la zona secundaria se distinguen dos partes: la primera, alejada del filo, de deslizamiento y la segunda de deformación, cercana al filo (zona de pegado). En la primera de estas zonas rige la ley de Coulomb para el rozamiento en el cual μ (coeficiente de rozamiento) es constante. Con ello se llega

$$W_{c_1} = \frac{1}{3} \tau_k b_1 (l - l_1) U_c \quad (2.10)$$

En la segunda de estas zonas el área de contacto y el esfuerzo de fricción son constantes por lo que

$$W_{c_2} = \tau_k b_1 l_1 U_c \quad (2.11)$$

Por lo tanto en la zona secundaria la potencia será

$$W_c = W_{c_1} + W_{c_2} = \frac{1}{3} \tau_k b_1 (l + 2l_1) \frac{\sin \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} U \quad (2.12)$$

Sumando las potencias para las dos zonas y teniendo en cuenta que $RMS^2 = C(dE/dt)$ se obtiene una relación entre parámetros de EA (RMS) y los del mecanizado.

$$RMS = C_3 \left[\tau_k b_1 U \left\{ \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} t_1 + \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\sin \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

b_1 = ancho del corte

U = velocidad de corte

U_c = velocidad de la viruta

l = largo de la zona de contacto herramienta-viruta

l_1 = largo de la zona de pegado (sticking)

t_1 = velocidad de alimentación

α = ángulo de ataque

ϕ = ángulo de corte

De las experiencias realizadas por los autores se deduce que la constante C_3 depende del ángulo de ataque, por lo que la expresión queda como (2.14)

$$RMS = C_4 \sin \alpha \left[\tau_k b_1 U \left\{ \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} t_1 + \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\sin \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

En las figuras 2.8 vemos la dependencia del RMS con la velocidad de corte y en la 2.9 el ajuste entre RMS experimental y el modificado según (2.14)

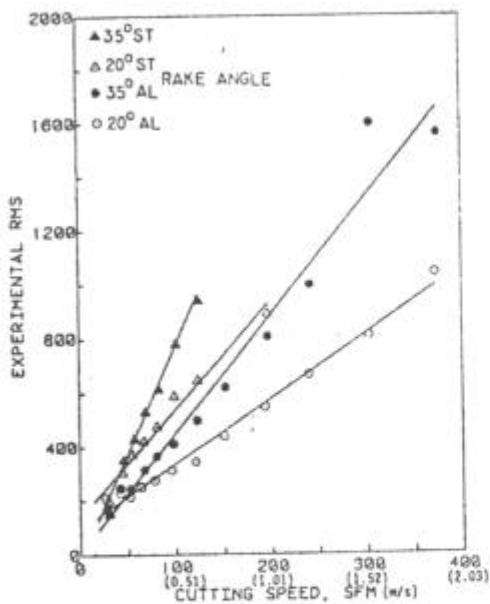


Fig. 2.8. RMS experimental vs. velocidad de corte para Al 6061-T6 y SAE 1018

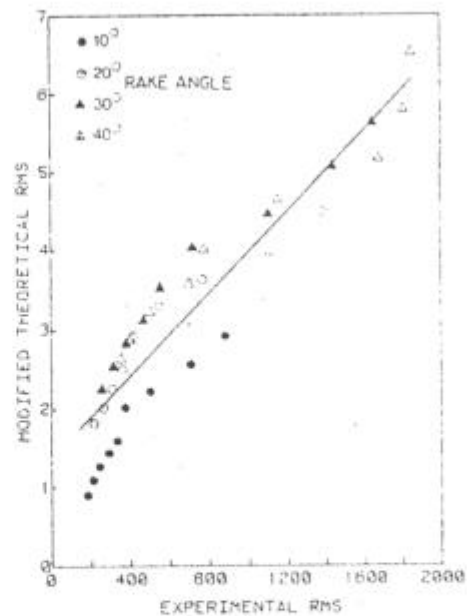


Fig. 2.9. RMS teórico modificado vs. RMS experimental

En el presente trabajo, el desgaste producido en el flanco es importante y por lo tanto también la fricción entre él y la pieza y la EA generada en la zona terciaria, que no es tenida en cuenta en el modelo de arriba. Debido a la naturaleza de la fricción como fuente de EA, los cambios en la EA con el desgaste de la herramienta dependen fuertemente del material. En ciertos casos el RMS aumenta con el desgaste, en tanto que en otros disminuye [4] (ver figuras 2.9 y 2.10). Además al progresar el desgaste cambian parámetros de corte tales como ángulo de ataque, ángulo de corte, profundidad de corte por lo que la relación anterior tendría que ser reevaluada. Es por ello que se usan análisis estadísticos de parámetros de EA para el monitoreo del desgaste de la herramienta.

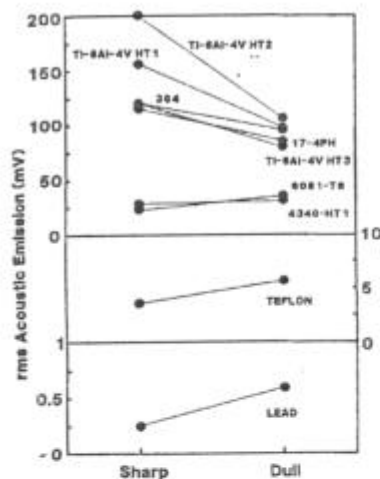


Fig. 2.9. Cambio del RMS con el desgaste. Las condiciones de desgaste no son idénticas para todos los materiales. Velocidad de corte: 100 cm/s (aprox. para todos); prof. de corte: 0.25 mm (excepto 0.13 para SAE 4340); velocidad alimentación: 0.046 mm/rev.

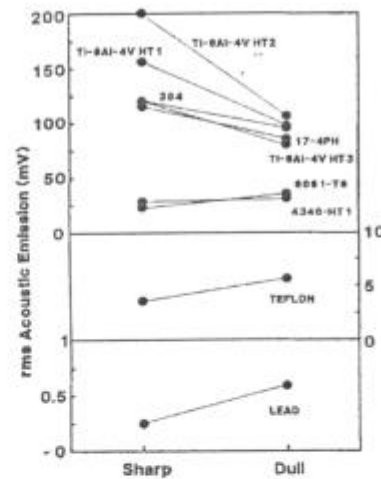


Fig. 2.10. Cambio del RMS con el desgaste por inserto de diamante a 35°. Las condiciones de desgaste son casi idénticas para todos los materiales. Velocidad de corte: 120 cm/s (aprox. para todos); prof. de corte: 0.51 mm (excepto 0.25 para Ti-6Al-4V); velocidad alimentación: 0.11 mm/rev.

Se han desarrollado modelos analíticos para EA generada en la fractura de la herramienta. A partir de la aplicación de relaciones de tenacidad a la fractura, Diei y Dornfeld [5] llegan a una expresión (2.15) que relaciona el voltaje del pico de EA producida en la rotura con el área y la fuerza en la fractura de la herramienta. La amplitud de la señal en la fractura presenta un pico importante que es alrededor de un orden de magnitud mayor que en las condiciones normales de corte.

$$V_p \approx c_2 E_1 F (\Delta A)^{1.5} \tag{2.15}$$

V_p = pico del RMS de EA en la fractura de la herramienta
 F = fuerza de corte resultante en la fractura de la herramienta
 $F (\Delta A)^{1.5}$ = es un parámetro de fractura de EA para estudios de sensibilidad de la señal de EA a la fractura de la herramienta durante el mecanizado.

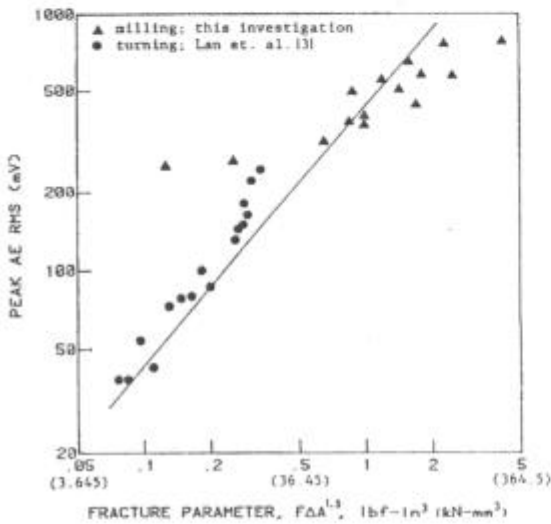


Fig. 2.11. Pico de voltaje del RMS versus parámetro de fractura derivado.

2.5 Relaciones entre parámetros de EA y de mecanizado obtenidas de análisis estadísticos

Muchos métodos para el monitoreo del desgaste de la herramienta fueron propuestos, aunque ninguno ha tenido una aceptación universal. La principal ventaja de EA es que el rango de frecuencias de sus señales es mucho mayor que los de las vibraciones de las máquinas y los ruidos ambientales y no es intrusivo en las operaciones de corte. Aparte la EA está directamente relacionada con el estado de la herramienta ya que es generada por actividades del mecanizado como ser la deformación plástica, rozamiento y fractura de virutas y herramienta. La desventaja es que estas señales necesitan ser procesadas para extraer la información más provechosa de las mismas. A continuación se realiza un racconto de los diversos esquemas de procesamiento que se han intentado.

Cabe mencionar el uso de parámetros estadísticos como el coeficiente de asimetría o momento centrado de tercer orden ("skew") y el momento centrado de cuarto orden ("kurtosis") para el nivel de RMS de EA, ambos parámetros calculados considerando que dicha señal tiene distribución β [6]. Ambos muestran una fuerte variación con el desgaste; el valor de la pendiente de las curvas skew vs. desgaste y kurtosis vs. desgaste se incrementa a medida que progresa el último.

Posteriormente se usó un esquema de promediado en el dominio del tiempo ("Time Domain Averaging", TDA) para el procesamiento de señales intermitentes de RMS como en [7], que corresponde a un trabajo de fresado. Los autores llegan a la conclusión de que la aproximación

por TDA debería ayudar en la extracción de un nivel medio de energía para el contacto del filo de corte en el fresado que reflejaría el estado del inserto.

En [8] se usaron esquemas de reconocimiento de patrones según el esquema de la figura 2.12.

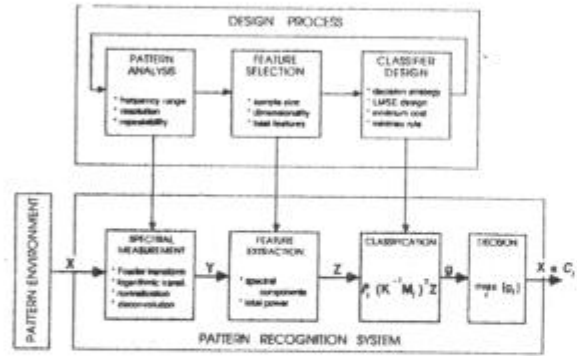


Fig. 2.12. Esquema del diseño de un sistema de reconocimiento de patrones

Para ello se usaron como parámetros las componentes que se obtienen de aplicar sobre la señal la transformada rápida de Fourier (FFT). La selección de parámetros se realiza para reducir la cantidad de datos a usar para la clasificación; en este caso fue usado como criterio la dispersión clase-promedio ("class-mean scatter") que maximiza la separación entre clases y minimiza la varianza dentro de las clases. Como clasificador se utilizó la aproximación por mínimo error cuadrático medio (LMSE) y una estrategia de decisión consistente en dividir las señales en continuas o transitorias. Las señales continuas están asociadas con el corte en la zona primaria y el desgaste en la cara y flanco de la herramienta, mientras que las señales transitorias resultan de la fractura de la herramienta o rotura de viruta. Con este esquema se logra un casi perfecto reconocimiento de la rotura de la herramienta. En cambio en lo que respecta al desgaste de la herramienta la performance se encuentra entre el 84 y 94%, debido a los cambios graduales en el nivel de desgaste del flanco. De hecho se han realizado sistemas para detección de rotura de la herramienta que operan en ambientes industriales [9].

Liang y Dornfeld [10] reportaron que los coeficientes del modelo autoregresivo (AR) de una serie temporal del valor RMS de la EA mostraban buena sensibilidad al desgaste de la herramienta en un rango amplio de condiciones de mecanizado. Estos parámetros fueron luego usados por Dornfeld [11] como parte del procesamiento de la señal en un esquema como el de la figura 2.13

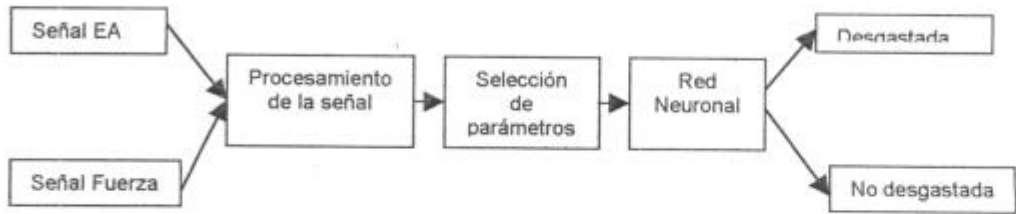


Fig. 2.13. Esquema de análisis de [11].

En [11] se concluye que las redes neuronales de resonancia adaptativa (ART neural networks) son más adecuadas para el monitoreo de la condición de la herramienta que las redes neuronales con alimentación hacia adelante (feedforward neural networks) en el sentido de que las primeras tienen capacidad de autoorganización en tanto que las segundas necesitan un entrenamiento fuera de línea para funcionar. Sin embargo el esquema con redes ART muestra sensibilidad a los cambios en las condiciones de corte. Con este esquema se obtuvieron performances del 96%.

Los algoritmos basados en la transformada de Fourier (como ser FFT) no pueden generar una dependencia de la frecuencia en el tiempo ya que su base exponencial ($\exp(-i\omega t)$) se extiende sobre toda la duración de la señal. Es por ello que se han usado otro tipo de transformadas que incluyan esta dependencia. Así Du y Yan [12] utilizaron la transformada TFD de Wigner (Time-Frequency Distribution) en el procesamiento de las señales. Con el producto de la transformada TFD obtienen un índice que aumenta su valor a medida que progresa el desgaste del inserto. Sin embargo los autores no dan un valor umbral del índice o grado de confiabilidad del sistema empleado. Asimismo, estos autores marcan la necesidad de separar los transientes de la señal y los cambios debido al desgaste de los producidos por las condiciones de corte.

Más tarde, con el desarrollo de la teoría de las onditas (wavelets) hacia fines de 1980 y principios de los 90, Wu y Du [13] introdujeron la transformada "wavelet packet" en el procesamiento de las señales de vibraciones en el mecanizado. Los coeficientes obtenidos de la transformación son luego usados como parámetros para determinar el estado de la herramienta. Lo que se realiza es una compresión de la señal, tomando sólo los coeficientes más significativos de la transformación y comparándolos luego con ciertos valores umbrales para clasificar el estado de la herramienta. Siguiendo esta metodología los autores logran un 100% de efectividad en el monitoreo de vibraciones en torneado y en el del desgaste de insertos en agujereados.

Siguiendo otra línea de análisis, otros investigadores han empleado lógica difusa ("fuzzy logic") como metodología de clasificación [14]. Fu, Hope y Javed usaron lógica difusa para fusionar los parámetros obtenidos de cuatro señales: corriente, fuerza de corte, emisión acústica y vibraciones, ya que según estos autores combinando las ventajas parciales de múltiples sensores se hace más confiable el sistema. De la primera tomaron el valor medio y de las tres restantes emplearon el valor medio de la señal y valor medio de la densidad espectral dividida en 10 rangos de frecuencia. En la experiencia por ellos realizada determinan el desgaste de un inserto dado con una confiabilidad máxima de 96%.

Así se han realizado combinaciones de los métodos antes expuestos. Por ejemplo Xiaoli y Zhejun [14] han obtenido parámetros de la transformación wavelet packet (WPT) y los clasificaron con un método de clustering difuso ("fuzzy clustering method"). Los parámetros usados fueron los valores RMS de los coeficientes de WPT en ciertos rangos de frecuencia que fueran sensibles al desgaste. Para eliminar el efecto de las condiciones de corte, como velocidad de corte y profundidad de corte, se usó como parámetros el valor RMS de los coeficientes de la transformación WPT en determinados rangos de frecuencia. En [15] se separa la señal continua, asociada al desgaste, de la transiente tomando un valor umbral mayor al promedio, pasado el cual la señal es transiente. La performance de este sistema resultó del 90%.

Otra combinación de métodos fue propuesta por Niu, Wong, Hong, Liu [16] en el cual se controla la estacionariedad de la EA mediante (2.15)

$$E(X_t) = \mu_x \quad R_x(t, t + \tau) = R_x(\tau) \quad (2.15)$$

siendo μ_x y $R_x(\tau)$ constantes. Las señales transitorias son procesadas con WPT descomponiéndose la señal en una parte transitoria que es la que corresponde a los coeficientes más significativos de la transformación, y con el resto de los coeficientes la señal de tipo continuo con la cual se monitorea el desgaste. De las señales continuas se obtienen los parámetros de skew, kurtosis y la banda de frecuencia de potencia, que luego de sufrir un procesamiento posterior, alimentan una red neuronal ART2 que clasifica los estados de la herramienta. Para insertos de herramientas sin acanaladuras (sin ruido por rotura de viruta) la clasificación ha sido cercana al 100%, en tanto que para insertos de herramientas acanaladas es necesario hacer la separación anterior para eliminar el ruido producido por la rotura de la viruta. Con los coeficientes WPT de la parte transitoria de la onda, se obtienen los parámetros necesarios para alimentar una red neuronal ART2 que nos da información de cuál de los siguientes procesos están ocurriendo: fractura de la herramienta, picado de la misma o rotura de la viruta. El esquema de procesamiento se ilustra en la figura 2.14

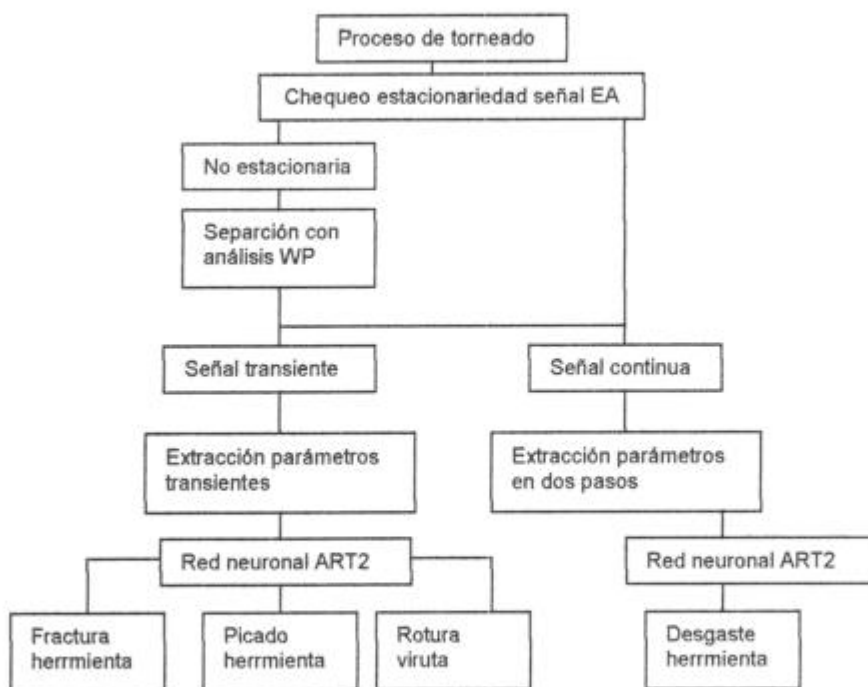


Fig. 2.14. Esquema de procesamiento de la señal en [15]

Un tercer método que aplica metodologías anteriores fue propuesto por Kamarthi, Kumara y Cohen [17]. En él se obtienen los parámetros a partir de la descomposición en waveletes por la transformada wavelet discreta (DWT). Estos se agrupan en 17 clusters de los cuales se obtiene un parámetro que es la raíz cuadrada de la energía de los coeficientes que hay en cada cluster. Estos parámetros, junto con velocidad de corte y tasa de alimentación, se introducen en una red neuronal recurrente ya que el desgaste se incrementa monótonicamente. La red neuronal es usada para obtener una estimación del desgaste del flanco y no clasificar el desgaste entre un número de estados como en los casos anteriores. También se aplicó la misma metodología pero extrayendo los parámetros mediante FFT, concluyéndose que los resultados obtenidos ajustan mejor con DWT que con FFT. El RMS de los errores de la estimación del desgaste del flanco es de 0.0239 mm que está dentro del rango usado en la etapa de entrenamiento de la red neuronal. Esto muestra que la metodología proporciona un valor del desgaste del flanco razonablemente preciso para las aplicaciones industriales.

Referencias

1. E. J. A. Armarego, R. H. Brown, "The machining of metals", Prentice Hall, pp. 59-62, 1969
2. L. Alden Kendall, "Tool wear and tool life", Metals Handbook, Vol. 16, Ninth Edition, pp. 37-48, American Society of Metals, 1989
3. E. Kannatey-Asibu Jr., D. A. Dornfeld, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", Journal of Engineering for Industry, Vol. 103, 1981
4. C. R. Heiple, S. H. Carpenter, D. L. Armentrout, A. M^c Manigle, "Origin of Acoustic Emission produced during single point machining", Materials Evaluation, Vol. 52, 1994
5. E. N. Diei, D. A. Dornfeld, "A model of tool fracture generated acoustic emission during machining", Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, 1987
6. E. Kannatey-Asibu Jr., D. A. Dornfeld, "A study of tool wear using statistical analysis of metal cutting Acoustic Emission", Wear, Vol. 76, 1982
7. E. N. Diei, D. A. Dornfeld, "Acoustic Emission sensing of tool wear in face milling", Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, 1987
8. E. Emel, E. Kannatey-Asibu Jr., "Tool failure monitoring in turning by pattern recognition analysis of Acoustic Emission signals", Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, 1988.

9. J. Roget, P. Souquet, N. Gsib, "Application of Acoustic Emission to the automatic monitoring of tool condition during machining", *Materials Evaluation*, Vol. 46, 1988
10. S. Y. Liang, D. A. Dornfeld, "Tool wear detection using time series analysis of acoustic emission", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, 1989
11. G. S. Choi, Z. X. Wang, D. A. Dornfeld, "Detection of tool wear using neural networks", 4th WorldMeeting on Acoustic Emission and 1st International Conference on Acoustic Emission in Manufacturing, 1991
12. R. Du, D. Yan, "Time-Frequency Distribution of Acoustic Emission signals for tool wear detection in turning", 4th WorldMeeting on Acoustic Emission and 1st International Conference on Acoustic Emission in Manufacturing, 1991
13. Y. Wu, R. Du, "Feature extraction and assesment using wavelet packets for monitoring of machining processes", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 10(1), 1996
14. P. Fu, A. D. Hope, M. A. Javed, "Fuzzy classification of milling tool wear", *Insight*, Vol. 39(8), 1997
15. L. Xiaoli, Y. Zhejun, "Tool wear monitoring with wavelet packet transform-fuzzy clustering method", *Wear*, Vol. 219, 1998
16. Y. M. Niu, Y. S. Wong, G. S. Hong, T. I. Liu, "Multicategory classification of tool conditions using wavelet packets and ART2 network", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, 1998
17. S. V. Kamarthi, S. R. T. Kumara, P. H. Cohen, "Flank wear estimation in turning through wavelet representation of Acoustic Emission signals", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 122, 2000

3. Desarrollo experimental

3.1 Objetivo del trabajo

Como se mostró en la sección 2.5 es necesario realizar análisis estadísticos de los parámetros obtenidos de los ensayos. En el presente trabajo se seguirá esta metodología buscando parámetros, que en forma individual o conjunta tengan potencialidad de indicar el estado de la herramienta en lo posible independientemente de las condiciones de mecanizados.

Con los datos obtenidos de los ensayos se los someterá a una serie de análisis conducentes a obtener parámetros indicativos del desgaste. Un primer paso en esta serie de análisis, ya establecido en la literatura, es separar las señales discontinuas de las continuas, siendo estas últimas las que contienen la información sobre el desgaste de la herramienta. En el presente trabajo se seguirá la metodología propuesta por Y. M. Niu, Y. S. Wong, G. S. Hong, T. I. Liu [1] para realizar la separación entre señales continuas y discontinuas. Una segunda instancia consistirá en ver la tendencia de los parámetros usuales de EA como ser amplitud, duración, rise time, energía, cuentas. Un tercer análisis consistirá en calcular el coeficiente β de la teoría de ruido $1/f$ para ver su comportamiento respecto del desgaste, para lo cual estamos usando la transformada de Fourier. Un análisis posterior consistirá en aplicar la transformada Wavelet Packet a las señales y obtener parámetros de los coeficientes de dicha transformación como ser la potencia y la entropía medidas a partir de estos últimos.

3.2 Equipo de emisión acústica

Es importante hacer una distinción en cuanto a la terminología empleada en sistemas de EA, la cual se detalla en la Norma ASTM E-1316. En ella se distingue "AE hit" que es cualquier señal que excede el umbral y causa que un canal del sistema acumule datos. Por otra parte está el "evento" que es el conjunto de hits de EA que fue recibido de una fuente única, producto de un cambio local en el material que da lugar a EA según la norma [2].

3.2.1 Descripción operativa del sistema

El sistema utilizado en la experiencia es el MISTRAS 2001 de Physical Acoustics Corporation (PAC). Las señales de EA provenientes de la estructura son convertidas a señales eléctricas por los sensores, luego amplificadas por los preamplificadores y medidas por la tarjeta AEDSP-32/16B que contiene 2 canales para procesamiento de señales y forma de onda. La fig. 1 muestra la capacidad de ampliación del sistema mediante chasis de expansión hasta un límite teórico de 256 canales.

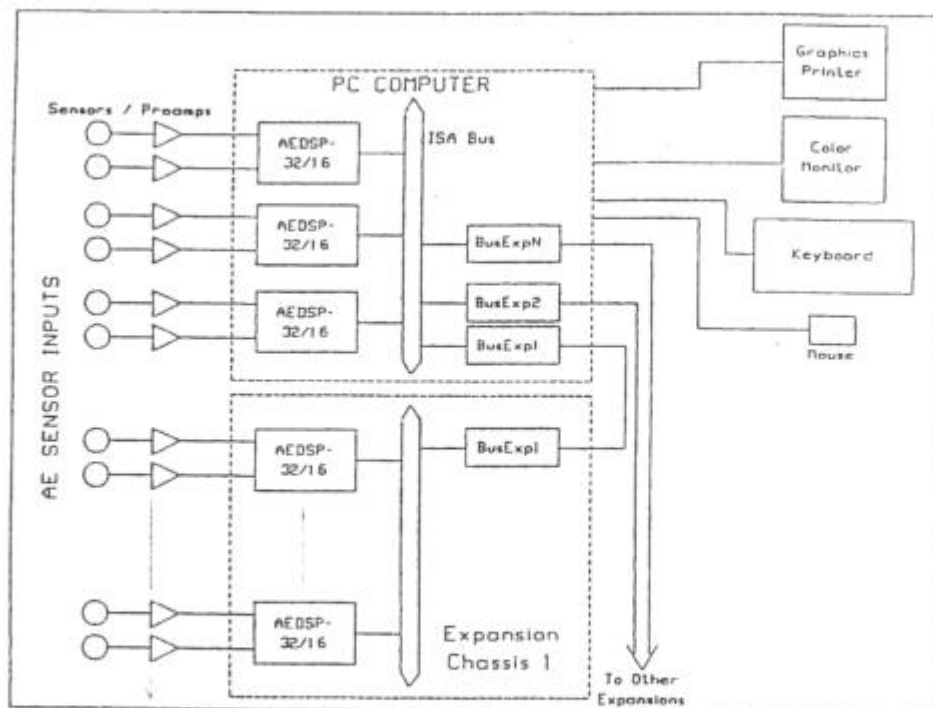


Fig. 1 Diagrama de bloques del sistema MISTRAS

La fig. 2 muestra el diagrama de bloques de la tarjeta AEDSP-32/16B, en el cual se aprecia que aparte de los 2 canales hay 2 entradas paramétricas (que pueden ser usadas para señales de carga, corriente, etc.) y un detector/contador de ciclos (útil en ensayos de fatiga).

La tarjeta provee de +28 V a los preamplificadores y tiene el AST (Auto Sensor Test) que se puede usar en los sensores/preamplificadores integrados provistos por PAC y sirve para controlar el acoplamiento y sensibilidad de los sensores. La señal es almacenada en un buffer y luego pasada a un módulo de filtrado. Este tiene cuatro filtros pasaaltos (10, 20, 100, 200 kHz) y cuatro filtros pasabajos (100, 200, 400 kHz y 1 MHz) seleccionables individualmente. Luego la señal va a un filtro pasabajo de 8° orden para antialiasing y después a un convertidor analógico digital (ADC) de 8 Megasamples por segundo máximo y 16 bits de resolución. La extracción de parámetros puede ser hecha a más de 20000 hits por segundo.

La salida del ADC pasa a un procesador de señales digitales (TMS320C40 referido como C40-DSP) y a un extractor de parámetros (ASIC Feature Extractor) de funcionamiento en tiempo real. Este circuito cumple las siguientes funciones: detección de hits, generación de las señales de control para el procesamiento del hit, extracción de parámetros en conjunto con C40-DSP. Este último lee los parámetros obtenidos, normaliza los datos y si es pedido hace filtrado y determinación de alarma. También colecta y procesa formas de onda y señales paramétricas, además de coordinar con otras tarjetas la información a enviar. Toda la información la pone en la memoria de salida

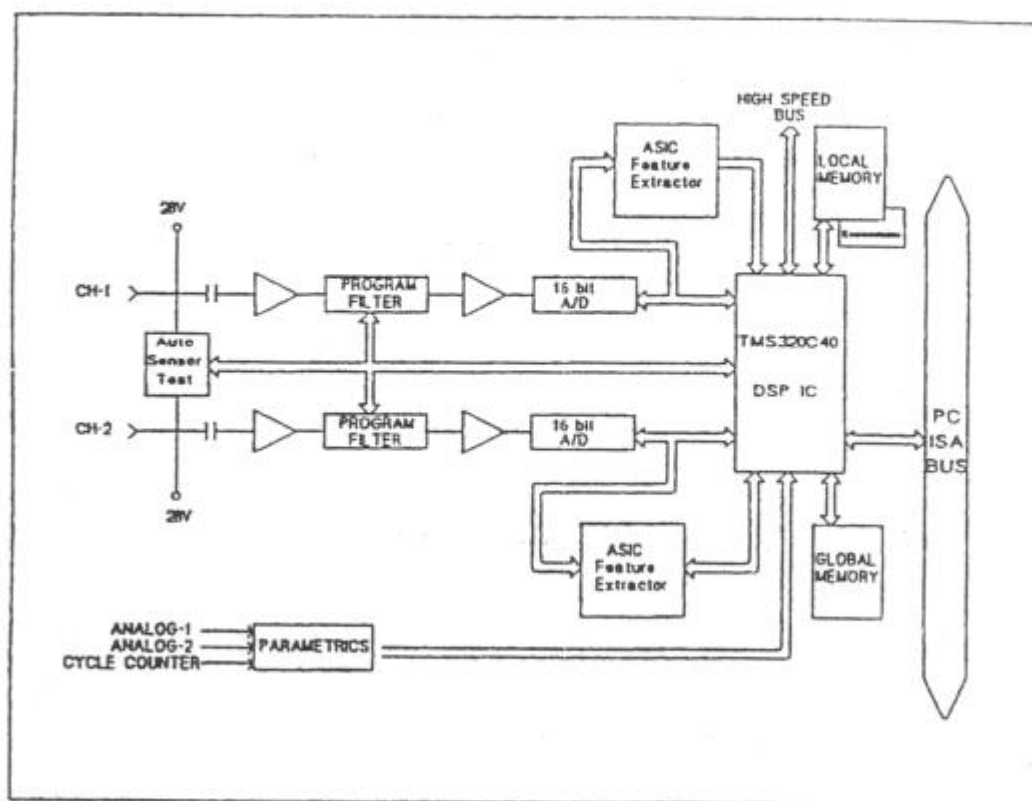


Fig. 2 Diagrama de bloques de la tarjeta AEDSP-32/16B

Los datos son almacenados en archivos de extensión DTA, cada 16 K que se acumulan en la memoria de la PC. Estos archivos permiten ver nuevamente las señales y los parámetros que interesan en el momento de su repetición.

3.2.2 Parámetros de salida

Los parámetros de salida figuran en la tabla 1 [3].

Tabla 1. Parámetros de salida de sistema de EA

Características de la señal	Resolución	Rango
Tiempo del hit/tiempo de test	250 nanosegundos	0-407 días
Fuerza de la envolvente (PAC Energy)	1 cuenta	0-65535
Energía verdadera	1 cuenta	$0.28 \cdot 10^{14}$
Amplitud	1 dB	10-100 dB
Rise Time	1 μ s	0-65.5 ms
Duración	1 μ s	0-65535 μ s
Cuentas	1 cuenta	0-65535 cuentas

Cuentas para el pico	1 cuenta	0-32768 cuentas
RMS	0.15 mV	0-6 V
Umbral	1 dB	15-99 dB
Paramétricos análogos (2)	10 mV	-10 a +10 V
Contador de ciclos	1 ciclo	0-4.295 10 ⁹
Hits perdidos	1 hit perdido	0-65535 hits perdidos
Tasa de verdadera energía	1 cuenta	0-4.295 10 ⁹

A excepción de los 2 últimos parámetros, los demás pertenecen al set de datos del hit. Hay otros parámetros que pueden extraerse independientemente de la ocurrencia de un hit, periódicamente entre 1 ms y 60 s como ser: tiempo del test, hits perdidos, entradas paramétricas (por tarjeta; por ejemplo la carga aplicada en un ensayo de tracción que entra como un voltaje), contador de ciclos, tasa de energía verdadera, RMS.

3.2.3. Variables operativas del proceso de medición

Las variables operativas del proceso de obtención de datos de EA figuran en la tabla 2 [3].

Tabla 2. Variables operativas proceso de medición

Características de la señal	Resolución	Rango
HDT (tiempo de definición del hit)	2 μ s	40 μ s – 130 ms
HLT (tiempo muerto del hit)	2 μ s	40 μ s – 130 ms
PDT (tiempo de definición del pico)	2 μ s	40 μ s – 130 ms

PDT = su función es determinar el tiempo al que ocurre el pico verdadero de la forma de onda. puede tomarse como valor para el mismo D/C (D=espaciado del sensor, C= velocidad de la onda más rápida).

HDT = su función es determinar el fin del hit, cerrar la medición y guardar los atributos de la señal. Debe ser lo más corto posible para reducir el efecto de que dos eventos sean considerados como un solo hit. Para definir ese parámetro podemos usar dos técnicas. En la técnica 1 la idea es incluir en el hit todas las consecuencias del evento fuente (reflexiones, caminos alternativos). En esta técnica el HDT es relativamente largo siendo un valor razonable del parámetro L/C (L=long. característica de la estructura, C= velocidad de onda típica en el material) o 20/AC (A= coeficiente de atenuación), el menor.La técnica 2 consiste en aumentar la salida del sistema desechando las reflexiones y midiendo solamente la parte principal de la señal. En esta técnica el HDT es relativamente corto con valor razonable de 20/F (F = frecuencia resonante del sensor).

HLT = su función es inhibir la medición de reflexiones y partes tardías del evento. Si se usa la técnica 1, el valor debe ser lo menor posible (no menos de 300 μ s ya que es el tiempo que tarda el ICC en pasar los datos al buffer). Si se usa la técnica 2, el valor de HLT se puede obtener haciendo los cálculos de la técnica 1 para el HDT.

PAC da valores recomendados de estos tres parámetros en función del material.

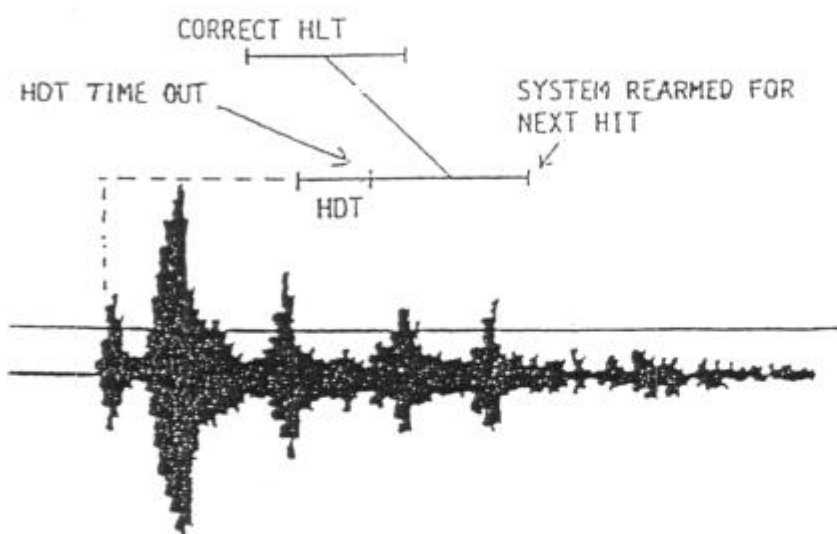


Fig. 3 Señal mostrando los tiempos HDT y HLT.

La tasa de muestreo, filtro bajo, filtro alto, pre-trigger y largo del hit son las variables del sistema que controlan el proceso de medición. Todos ellos se pueden establecer vía software. El filtro alto no puede ser mayor que la mitad de la tasa de muestreo como lo establece el teorema de Nyquist. El pre-trigger se usa para registrar la señal antes de que ésta exceda el umbral. El largo del hit (hit length) establece la cantidad de información en el mensaje de la forma de onda. Así a 4 MHz de muestreo y 1 K de hit length tenemos 256 μ s de datos para la forma de onda. El largo puede variar entre 1K y 15 K.

3.3 Caracterización del material

3.3.1 Acero SAE 1010

Las composiciones de aleantes del acero SAE 1010 se encuentran en los siguientes rangos [4]:

C = 0,07%-0,14% Mn = 0,25%-0,60% P_{max} = 0,04% S_{max} = 0,05%

El tamaño de grano del acero SAE 1010 es heterogéneo, con granos grandes entre 7 y 8 (32 μ m y 22 μ m) y los chicos entre 9 y 10 (16 μ m y 10 μ m) según Norma ASTM E112. Según Norma ASTM E45 método A se encontraron inclusiones tipo D2 (óxidos globulares) serie gruesa (fig. 4 y 5). Las inclusiones tienen contenidos variables de Al, Si, Mn, S, Ca y Fe como se muestra en las figuras 6 y 7 obtenidas por microanálisis con EDAX. El tamaño promedio de los mismos es de 2 μ m. También se observaron bandas de perlita (fig.5) en la dirección de trefilación (dirección longitudinal) con una separación promedio de 145 μ m. El perfil de dureza a lo largo de un radio tiene un promedio de 86 HRB con un desvío inferior al 5% como requiere la norma ISO 3685 para los ensayos de desgaste de herramientas (fig.8)

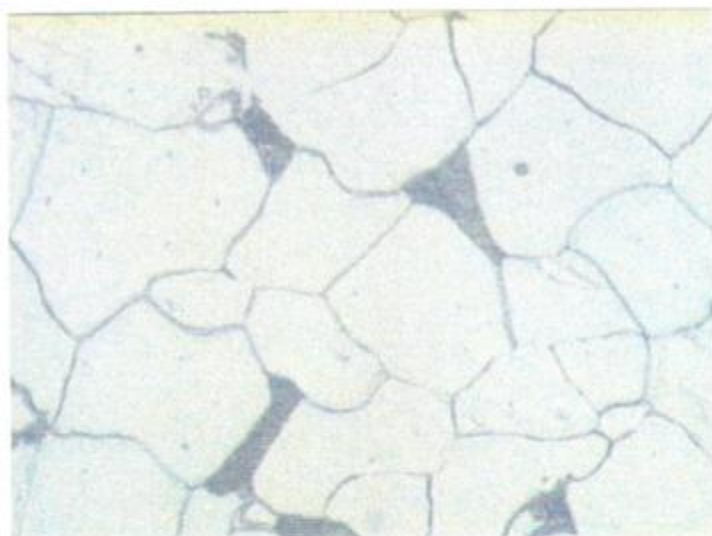


Fig. 4 Metalografía acero SAE 1010 sección transversal 500x.



Fig. 5 Metalografía acero SAE 1010 sección longitudinal 100x

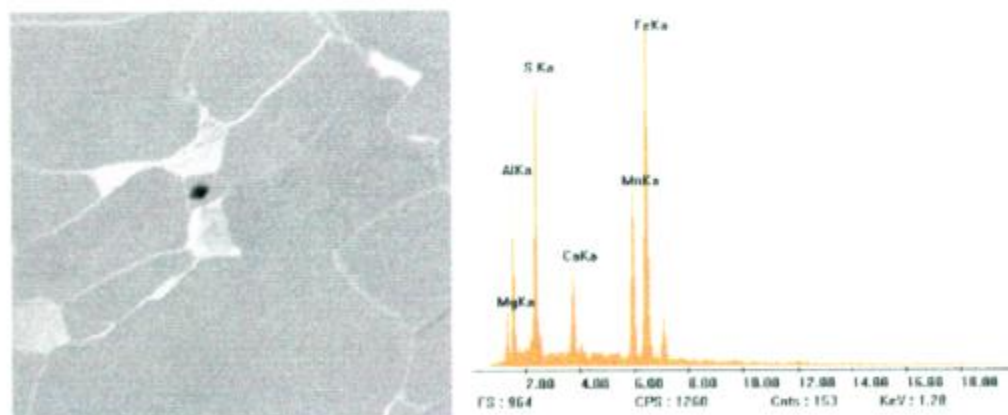


Fig. 6 Microfotografía 800x mostrando un precipitado (punto negro del centro) de Al=13.5%, Mg=6.3%, S=11.4%, Ca=4.5%, Mn=18.9%, Fe=45.4% (der.)(10fesmgm,10fesmg).

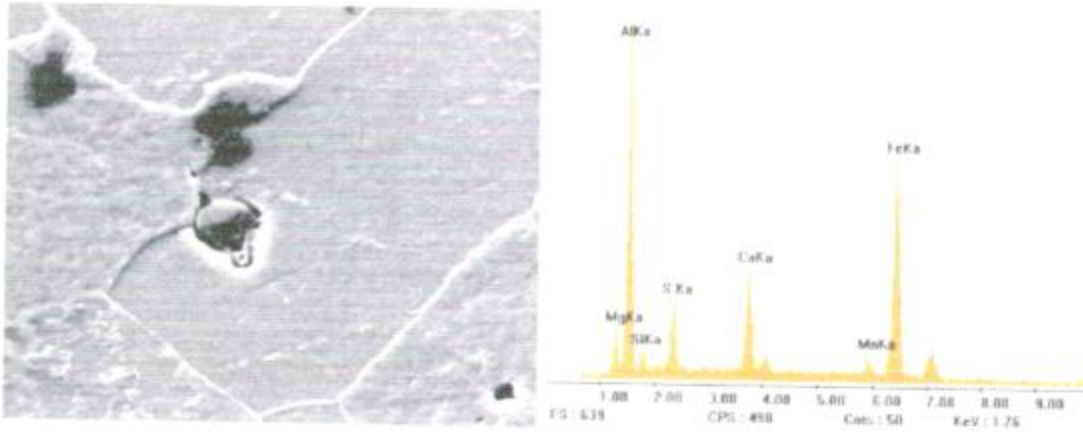


Fig. 7 Microfotografía 3200x mostrando una inclusión de 5 μm de composición Mg =4.9% Al = 39.5% Si 1.5% S=3% Ca =4.3% Mn =2.3% Fe =44.4% (10alfe2m.bmp;10alfe)

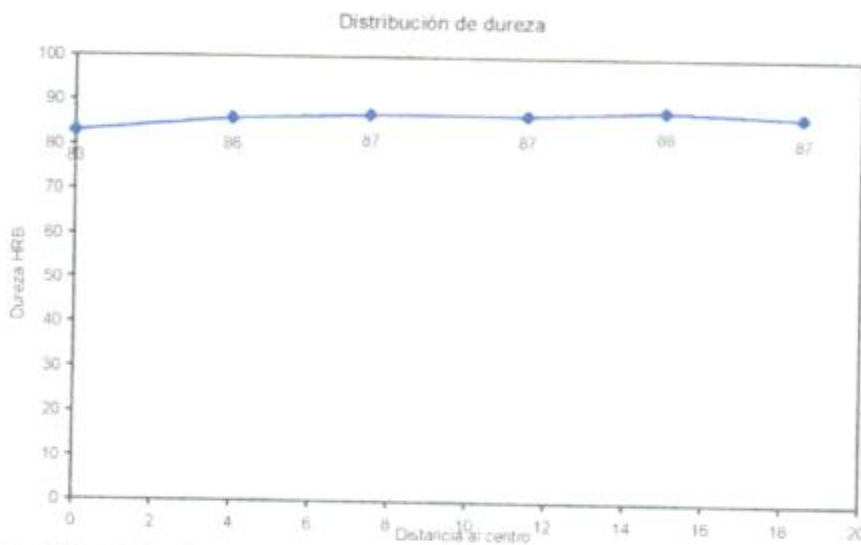


Fig. 8 Perfil de dureza de la sección de la barra de acero SAE 1010

3.3.2 Acero SAE 12L14

Las composiciones de aleantes del acero SAE 12L14 se encuentran en los siguientes rangos [4]:

$C_{max} = 0,15\%$ $Mn = 0,85\%-1,15\%$ $P = 0,04\%-0,09\%$ $S_{max} = 0,26\%-0,35\%$ $Pb = 0,15\%-0,35\%$

Estos aceros son resulfurizados, refosforados y con un agregado de plomo lo que proporciona un mayor contenido inclusionario al material. Al ser las inclusiones frágiles, la viruta obtenida es más corta que la del acero SAE 1010 y por lo tanto puede ser evacuada fácilmente durante la operación de maquinado.

El tamaño de grano del acero SAE 12L14 es 8 (22 μm) según Norma ASTM E112. Según Norma ASTM E45 método A se encontraron inclusiones tipo D1 (óxidos globulares) serie gruesa y tipo A5 (sulfuros) serie fina (figs. 9 y 10). Las inclusiones y precipitados tienen contenidos variables de S, Pb, Mn y Fe como se muestra más adelante en los gráficos obtenidos por microanálisis con EDAX (figs.11 y 12). Los precipitados de Pb son alargados y

tienen tamaños variables de 15 μm hasta 80 μm . Se observaron bandas de inclusiones (fig. 10) en la sección longitudinal (sentido de trefilación) con una separación promedio de 86 μm . El perfil de dureza a lo largo de un radio tiene un promedio de 87 HRB con un desvío inferior al 5% como requiere la norma ISO 3685 para los ensayos de desgaste de herramientas (fig. 13).

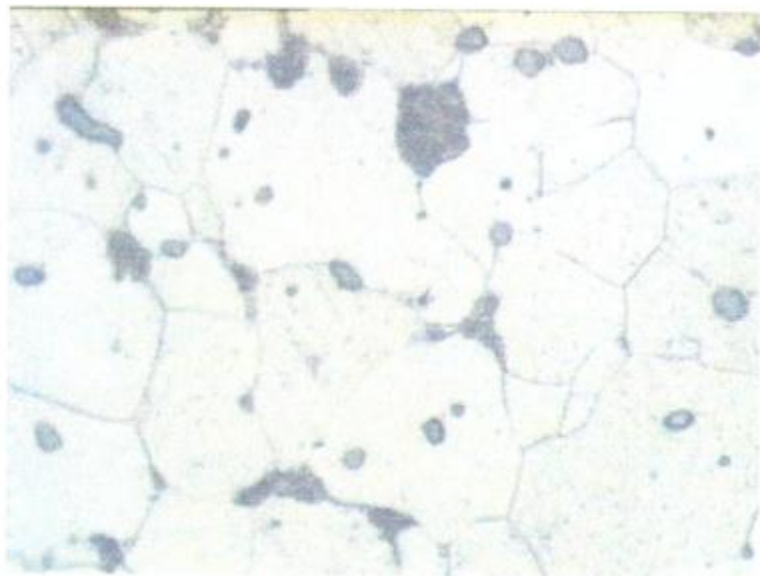


Fig. 9 Metalografía acero SAE 12L14 sección transversal 500x.



Fig. 10 Metalografía acero SAE 12L14 sección longitudinal 100x.

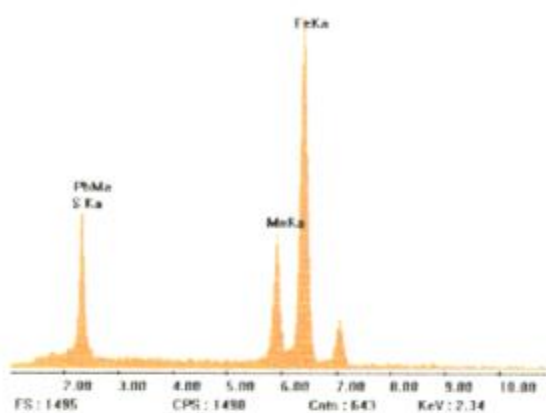
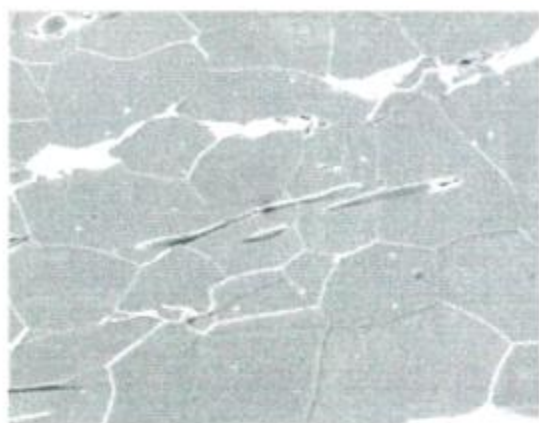


Fig. 11 Microfotografía de 800x mostrando 3 inclusiones de composición S=7.3%, Pb=10.9%, n=18.9%, Fe=62.9% (12pbfem, 12pbfe)

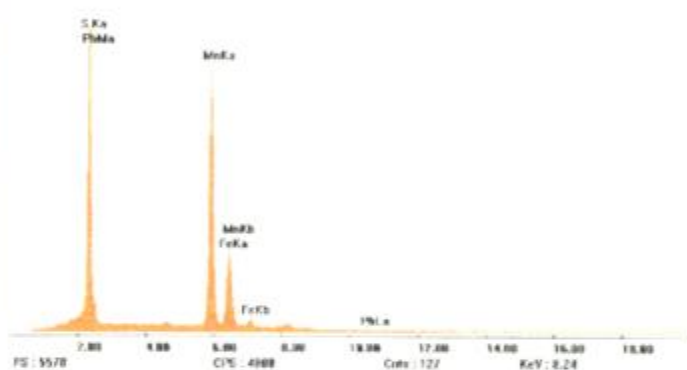
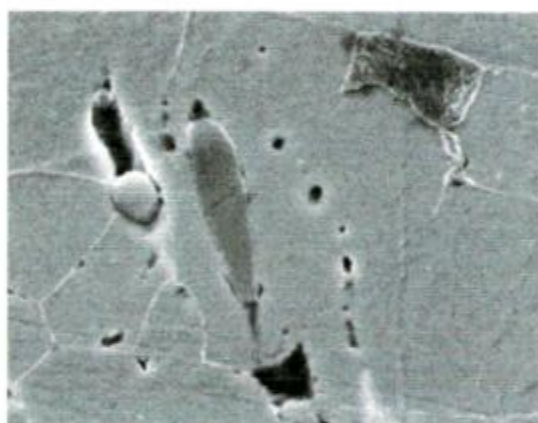


Fig. 12 Microfotografía 3200x mostrando una inclusión alargada de 20μm de composición S=11.2% Pb = 40.3% Mn =41.5% Fe=7%. (12pbmnm, 12pbmn)

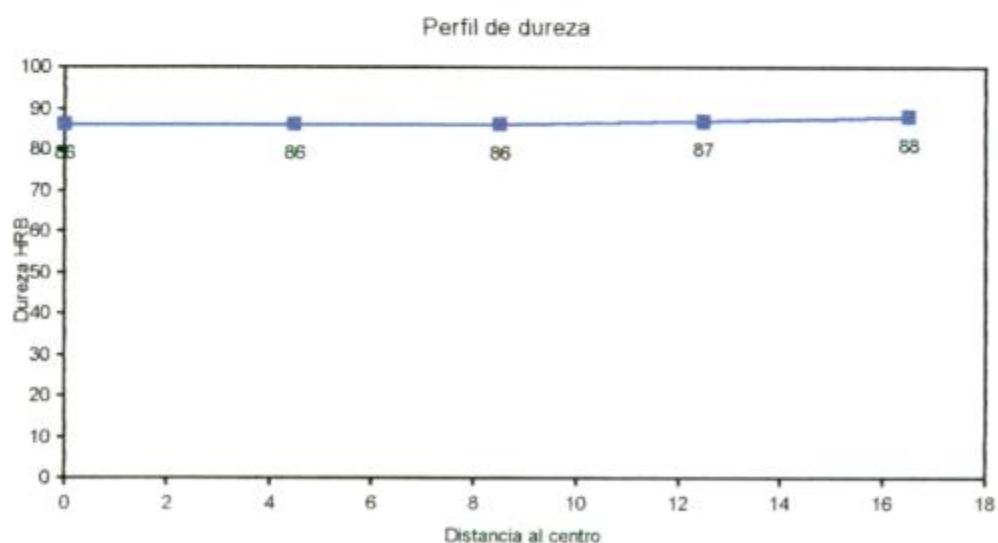


Fig. 13 Perfil de dureza de la sección de la barra de acero SAE 12L14

3.3.3 Insertos utilizados

Se usaron insertos de carburo sinterizado sin recubrimiento de calidad P20 clasificado según recomendación ISO R513. El grado P comprende los insertos de carburo de tungsteno altamente aleados. En el grado P, la escala que va de 1 a 50 representa insertos desde máxima dureza hacia máxima tenacidad a medida que crece el número [5]. Las especificaciones del fabricante se dan a continuación.

Inserto Calidad: P20
Fabricante: Pulvimetalurgia Rossi
Código: SNUN 120408

Portainsero Fabricante: Pulvimetalurgia Rossi
Código: CRH-CSDNR-2020 K12

3.4 Procedimiento experimental

El equipo de EA fue montado en el taller como indican las figuras 13 y 14

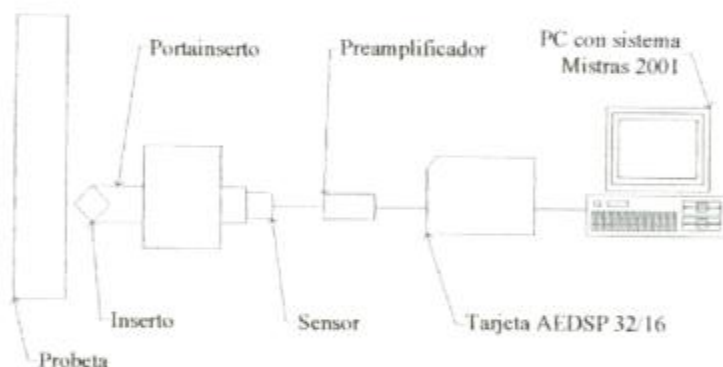


Fig. 13 Esquema del dispositivo experimental

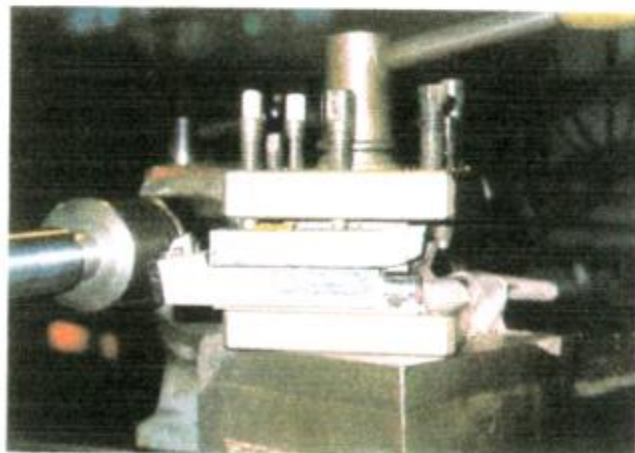


Fig. 14 Dispositivo experimental instalado en el taller

En el anexo I se muestra una curva de calibración del sensor usado en los ensayos.

Los parámetros mencionados en la descripción del equipo de EA fueron ajustados con los siguientes valores para todos los ensayos.

Preamplificador: 40 dB
Umbral: fijo a 30 dB
Peak Definition Time: 200 μ m
Hit Definition Time: 3500 μ m
Hit Lockout Time: 500 μ m
Frecuencia de muestreo: 4 MHz
Filtro bajo: 20 KHz
Filtro alto: 1200 KHz
Pretrigger: 20 μ m
Largo del Hit: 15 K

Con la frecuencia de muestreo y el largo del hit seleccionados se alcanza a registrar 3840 μ m por hit .

En un primer momento (en experiencias de prueba) se tomó un umbral de 40 dB pero para disminuir la cantidad de hits que resultaban saturados se disminuyó la ganancia a 30 dB.

Tabla 3. Largo de las probetas

Número de Probeta	SAE 1010 (mm)	SAE 12L14 (mm)
1	335	324
2	326	324
3	335	324
4	335	324
5	335	324
6	335	324
7	335	323
8	335	324
9	335	324
10	335 ¹	323
11	335	323
12	335	324
13	335	323
14	335	324
15	335	323

¹ a partir de la 3ª pasada es 331 mm

Antes de comenzar la experiencia se realizó una pasada de unos 0.2 mm sobre cada probeta del lote para asegurar que la profundidad de las pasadas sucesivas fuera la misma a lo largo de toda la probeta. Con este procedimiento, sin embargo no se logra quitar cierta conicidad en el torneado; o sea que hay una diferencia de décimas en el diámetro del final de la pasada con respecto al inicio. Una vez terminada esta pasada de ajuste se coloca un filo nuevo del inserto y se comienza a tomar mediciones. Esta pasada de ajuste fue aprovechada para calibrar los parámetros del sistema de EA arriba mencionados.

También se observa que completadas las 15 pasadas, suponiendo una velocidad acotada en un rango estrecho a los fines de la experiencia, el inserto no llega a completar la curva de desgaste. Es por este motivo que se continuó haciendo series de pasadas sobre el lote hasta

completar dicha curva. Como el torno no posee una regulación de velocidades que permita ajustar el valor de las mismas ante cambios pequeños en el diámetro, es que la velocidad de corte tiene una variación. La cantidad de pasadas efectuadas sobre cada probeta fue tomada de tal forma que el error en la velocidad fuera menor a un 5%, tomando este error como el cociente entre la máxima desviación respecto del promedio y el promedio.

Al final de cada pasada sobre cada barra se midió el desgaste del inserto con un microscopio Leitz Wetzlar con tornillos micrométricos de acuerdo a la norma ISO 3685 [6]. En las figs. 17 a 20 tenemos fotos de las superficies desgastadas de los insertos usados en los ensayos 1, 2 y 3. Al final de cada lote se midió la rugosidad resultante con un rugosímetro (Taylor Hobson Surtronic 3+) con el objetivo de controlar la calidad del proceso. Se tomaron 3 valores de rugosidad de la barra, luego promediados, en zonas cercanas al inicio del torneado de la barra por sus mejores condiciones de accesibilidad y paralaje del instrumento medidor.



Fig. 17 Desgaste del flanco del filo 2.2 ensayo nº1

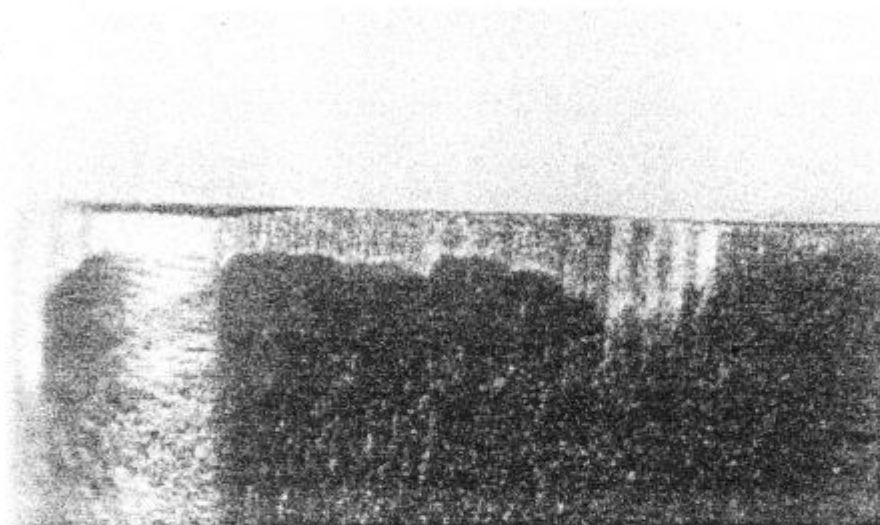


Fig. 18 Desgaste del flanco del filo 2.4 ensayo nº2

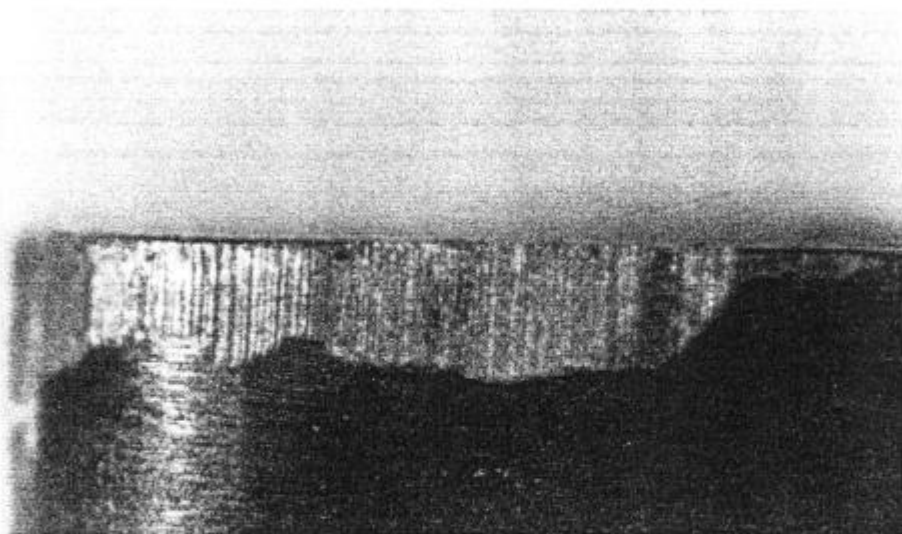


Fig. 19 Desgaste del flanco del filo 3.1 ensayo nº3



Fig. 20 Cráter en la cara anterior del filo 3.1 ensayo nº3 (foto 1)

En el torneado del acero SAE 1010, al ser de baja maquinabilidad, se eligió, en una primera instancia, una profundidad de pasada pequeña (0.25 mm) que correspondería a un trabajo de terminado. Esto produjo un desgaste del inserto en la punta del mismo, no estando contemplado un valor límite de desgaste en dichas condiciones por la norma. Por lo tanto como medida indicativa del desgaste se tomó la longitud máxima desgastada en la punta. La experiencia fue repetida con este acero con una profundidad de pasada mayor. En la tabla 4 podemos ver los parámetros característicos de los ensayos.

Tabla 4. Parámetros característicos de los ensayos

Ensayo	Inserto-Filo	Material	Velocidad de torno (rpm)	Velocidad de alimentación (mm/rev)	Profundidad de pasada (mm)	Número de pasadas	Velocidad de corte promedio (m/min)
1	2.2	SAE 1010	1000	0.53	0.25	6	127.6
2	2.4	SAE 1010	1000	0.25	1.1	2	120,6
3	3.1	SAE 12L14	1500	0.24	1.25	2	173.2

Se realizó una segunda serie de ensayos usando el filo 3.1 de la experiencia 3 en el acero SAE 1010 para obtener datos de EA sobre este acero en condiciones en que el inserto presentara un desgaste superior al valor de la norma. Una vez realizado este ensayo se usó el mismo inserto para el acero SAE 12L14 con un objetivo idéntico al anterior. El último ensayo consistió en usar un inserto nuevo sobre el acero SAE 12L14 con lo cual las condiciones serían semejantes al ensayo 3, con la salvedad de la velocidad decorte. En la tabla 5 se muestran los parámetros característicos de esta segunda serie de ensayos.

Tabla 5. Parámetros característicos de la segunda serie de ensayos

Ensayo	Inserto-Filo	Material	Velocidad de torno (rpm)	Velocidad de alimentación (mm/rev)	Profundidad de Pasada (mm)	Número de pasadas	Velocidad de corte Promedio (m/min)
4	3.1	SAE 1010	1000	0.53	1.1	2	108.5
5	3.1	SAE 12L14	1500	0.25	1.25	1	156.9
6	3.3	SAE 12L14	1500	0.25	1.25	1	145.8

Cada pasada fue guardada en un archivo del sistema de EA según la siguiente nomenclatura AnnPm donde A o B indica el material (A = SAE 1010 y B= SAE 12L14), nn= número de probeta y m= número de pasada.

En el acero 1010 el proceso de torneado se da por un arranque de la viruta por lo cual se debe cortar manualmente con ayuda de una pinza la viruta, de forma tal que no se forme una madeja hacia el final del torneado (figs. 21, 22 y 23). Por el contrario, en el acero 12L14 la viruta se produce por corte debido a la presencia de las inclusiones con PB y S. El tamaño de esta viruta se hace más pequeño a medida que aumenta el desgaste de la herramienta (figs. 24 y 25).

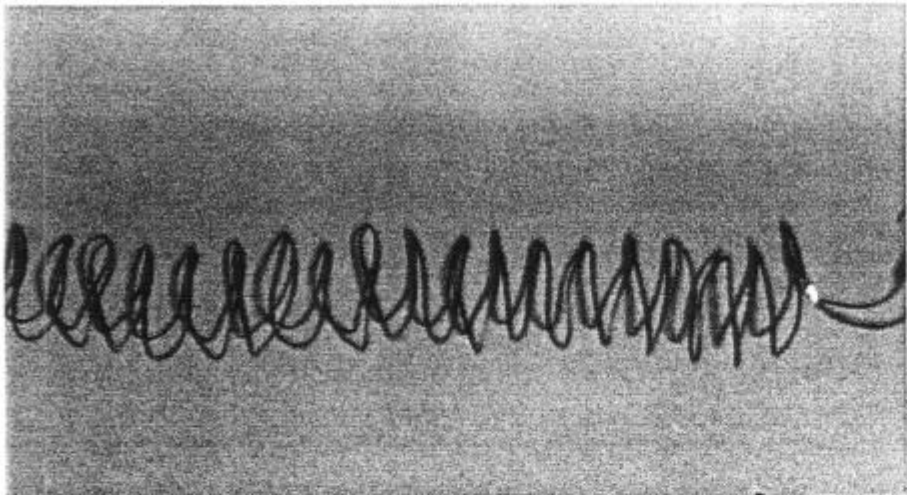


Fig. 21 Viruta al inicio del ensayo nº1

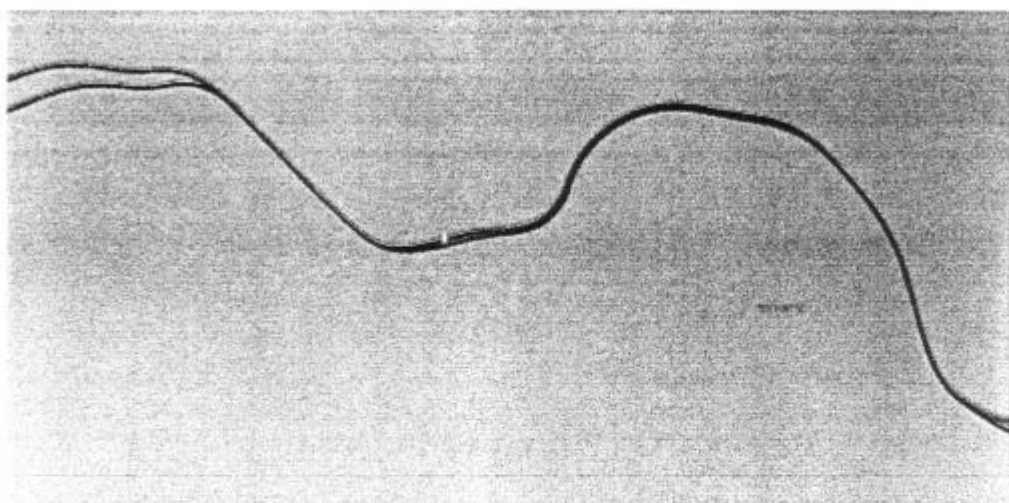


Fig. 22 Viruta al fin del ensayo nº1

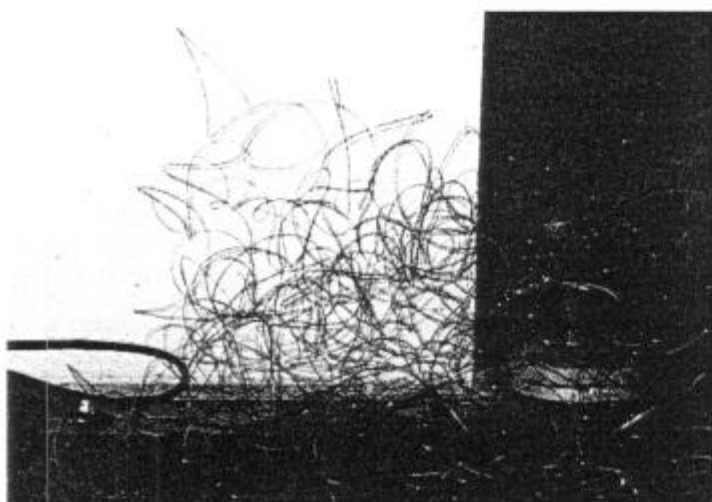


Fig. 23 Viruta del ensayo nº2

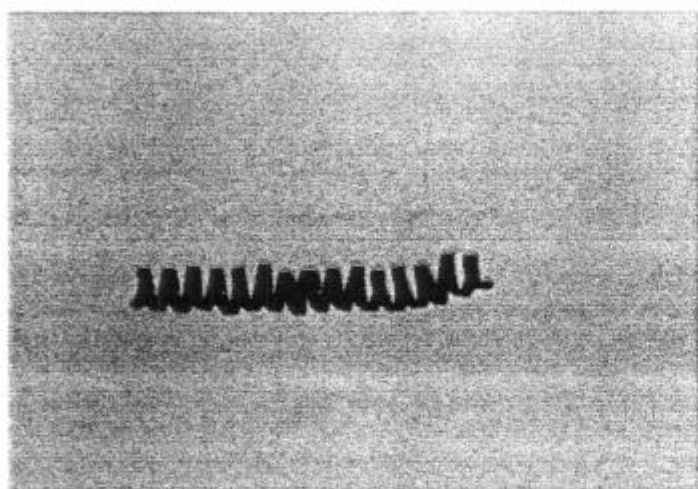


Fig. 24 Viruta al inicio del ensayo nº3



Fig. 25 Viruta al fin del ensayo nº3

En el anexo 2 se adjuntan las tablas donde se muestran los valores característicos de los ensayos, así como comentarios sobre anomalías ocurridas durante los mismos.

Referencias

1. Y. M. Niu, Y. S. Wong, G. S. Hong, T. I. Liu, "Multicategory classification of tool conditions using wavelet packets and ART2 network", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 120, 1998
2. ASTM, "Standard terminology for Nondestructive examinations", ASTM E-1316-93b, Section B, Vol. 03.03 "Nondestructive testing", 1993
3. Manual Mistras 2001
4. ASM, "Classification and Designations of Carbon and Alloys Steels", Metals Handbook, Ninth Edition, Vol.1, pp. 117-143, American Society of Metals, 1978
5. A. T. Santhanam, P. Tierney, "Cemented Carbides", Metals Handbook, Vol. 16, Ninth Edition, pp. 71-89, American Society of Metals, 1989
6. ISO, "Tool-life testing with single-point turning tools", ISO 3685, 1993

4. Resultados y discusión

4.1 Curvas de desgaste

A continuación se muestran las curvas de desgaste (desgaste vs. probeta o en este caso tiempo de mecanizado) obtenidas en los primeros tres ensayos mencionados en 3.4. El error relativo de cada punto se estima en un 5%.

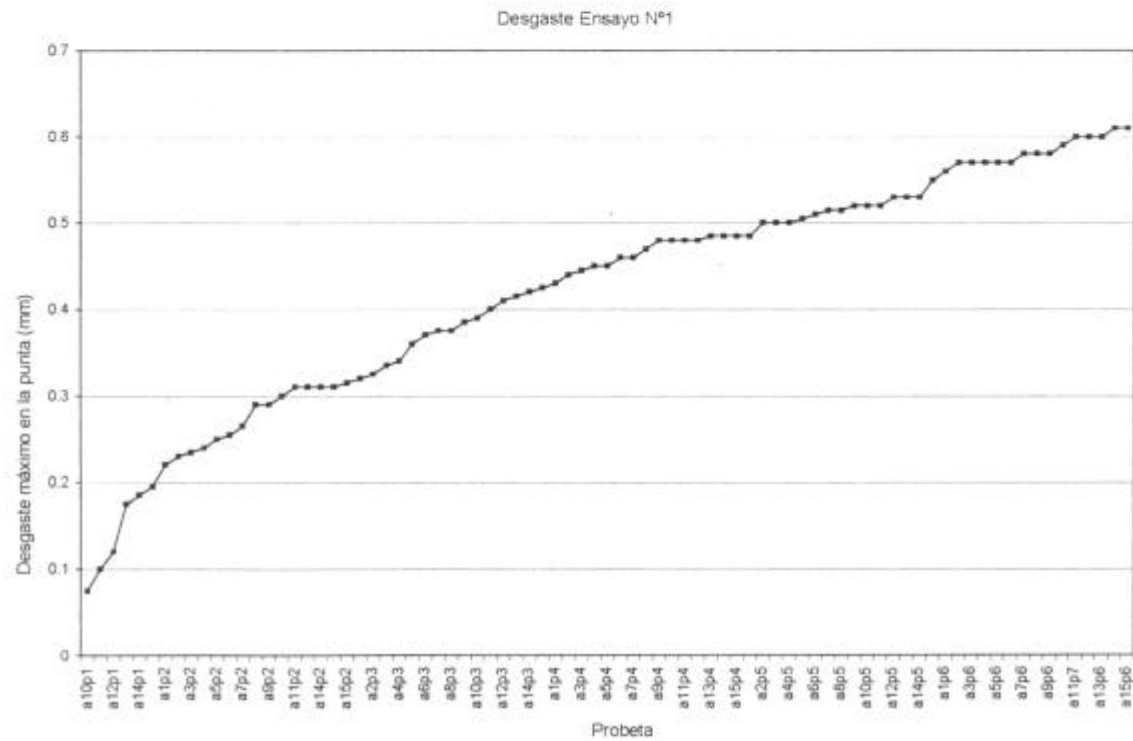


Fig.1 Curva de desgaste para el ensayo N°1

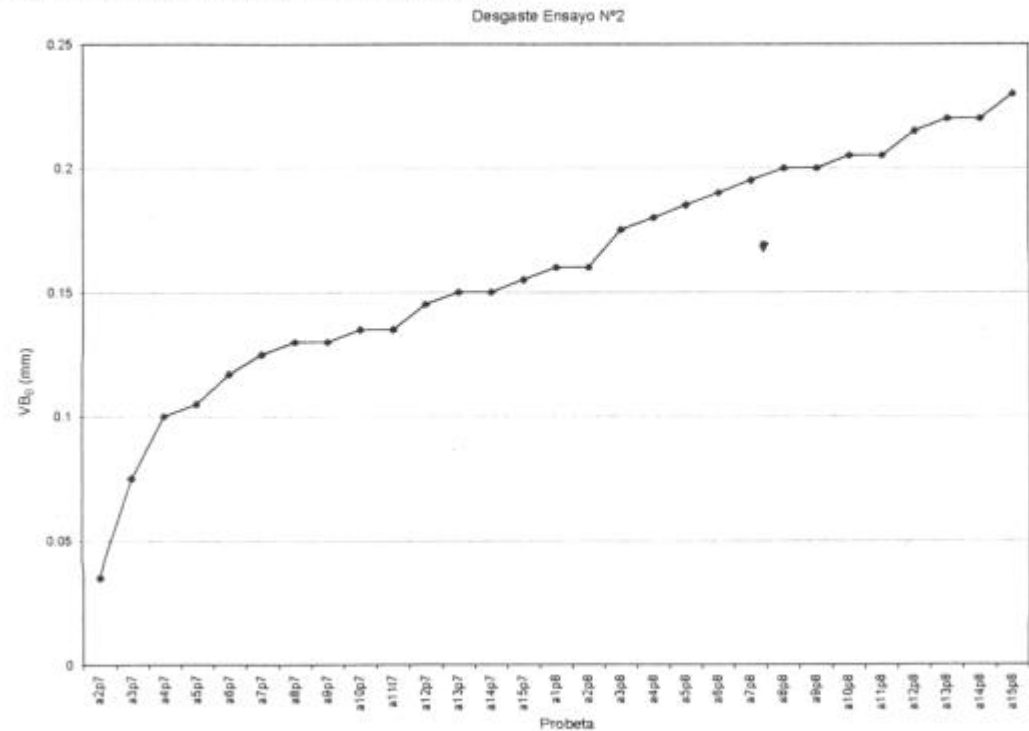


Fig. 2 Curva de desgaste para ensayo N°2

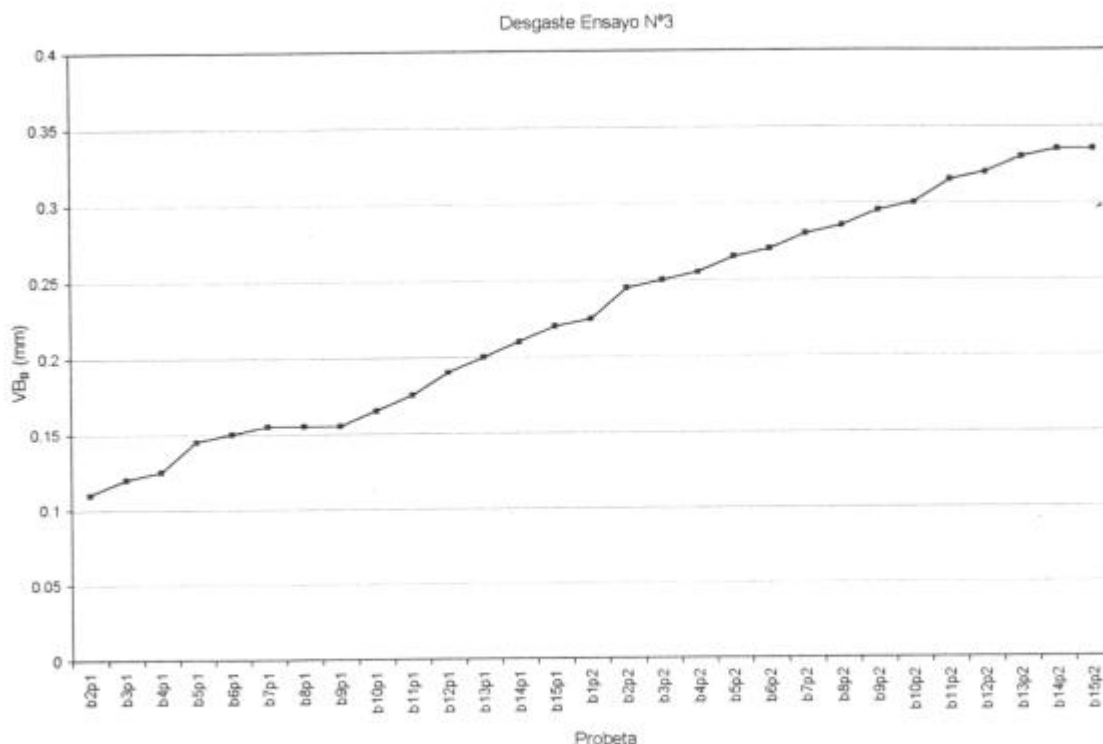


Fig. 3 Curva de desgaste para el ensayo N°3

Al finalizar el ensayo N°1 del acero 1010 el inserto quedó muy desgastado en la punta pero no en el flanco que es el lugar donde la norma da un valor límite para el desgaste. Esto no ocurrió así en el ensayo posterior. En el ensayo n° 2 con el acero 1010 el desgaste pudo ser medido de acuerdo a la norma pero no se llegó al valor límite ($VB_B = 0,3 \text{ mm}$) en ella propuesto ya que de haber continuado el ensayo se debía reducir aún más la velocidad de corte cambiando así significativamente las condiciones del ensayo. Por lo tanto no se tienen datos de este ensayo para analizar el estado de desgaste final. En el ensayo n° 3 con acero 12L14 se sobrepasa el valor límite exigido por la norma y es posible efectuar un análisis para detectar diferencias entre estados inicial, intermedio y final. Se hicieron dos ensayos adicionales con el inserto severamente desgastado para cada uno de los materiales y un sexto ensayo con el inserto nuevo para el SAE 12L14, como corroboración de los resultados de la primera serie de ensayos, cuyos resultados serán discutidos al final del capítulo.

4.2 Clasificación de señales según estacionariedad

En EA la forma de separar las señales de tipo continuo de las discontinuas es mediante el control de estacionariedad, siguiendo el criterio de Y. M. Niu, Y. S. Wong, G. S. Hong, T. I. Liu [1]. Las señales continuas son estacionarias en el sentido de que el valor medio ($E(X_t)$) y la autocorrelación ($R_x(t, t + \tau)$) de la misma son independientes del tiempo, mientras que las discontinuas son moduladas en la frecuencia y magnitud. Una señal es estacionaria si:

$$E(X_t) = \mu_k \quad R_x(t, t + \tau) = R_x(\tau) \quad (4.1)$$

o sea para señales reales

$$|E(X_t) - \mu_k| \leq \varepsilon \quad |R_x(t, t + \tau) - R_x(\tau)| \leq \varepsilon \quad (4.2)$$

siendo μ_k y $R_x(\tau)$ constantes. En la fórmula 3.2 se aplica una tolerancia en el control de la estacionariedad. En el presente trabajo se tomó una banda de tres veces el desvío de $|R_x(t, t + \tau) - R_x(\tau)|$ centrada en el promedio de $|R_x(t, t + \tau) - R_x(\tau)|$.

En el anexo 3 se pueden ver los programas (continuo.m y mostres.m) desarrollados en Matlab para la extracción de las señales discontinuas. Los promedios de las relaciones 4.1 y 4.2 se toman sobre todas las señales de cada pasada y éstos se comparan contra este promedio. La metodología se repite para cada pasada.

Los datos considerados en este trabajo de aquí en más son los correspondientes a las señales continuas por ser éstas las que contienen primordialmente la información del desgaste de la herramienta.

4.3 Evolución de los parámetros de Emisión Acústica

El primer procesamiento de datos consistió en tomar los parámetros que extrae el sistema de EA y realizar un promedio en cada una de las pasadas. La cantidad de eventos sobre los cuales se hace el promedio puede verse en las columnas "Cant. de eventos" de las tablas que figuran en el anexo 2. Luego de obtener el promedio por pasada se presentaron los gráficos realizando un promedio móvil con 5 valores para suavizar las curvas en el ensayo nº 1 y de 3 valores en el resto de los ensayos. De esta forma se pueden identificar tendencias en los valores de estos parámetros.

4.3.1 Ensayo nº 1

En el ensayo Nº1 del acero SAE 1010, donde se pueden notar claramente diferencias entre los parámetros para distintos estadios del desgaste, se ve una disminución del rise time (fig. 4), cuentas (fig. 5) y amplitud (fig. 6) entre el estado de desgaste final y los estados intermedio e inicial. En el valor de estos parámetros no hay una diferencia significativa entre los estados intermedio e inicial.

El valor RMS muestra un aumento en la magnitud en la etapa inicial del desgaste (fig.7). No obstante ello, este parámetro no fue considerado ya que el desvío de sus valores era mayor a los promedios obtenidos. Esto ocurre porque el instrumental toma valores de RMS cada 10 mV y estando los valores comprendidos entre 0 y 20 mV no es concluyente la diferencia observada. Se usó el parámetro energía que mide una magnitud similar al RMS pero los valores de energía están suficientemente por arriba de la resolución del instrumental. En este último parámetro podemos encontrar un importante aumento de su valor en el estadio intermedio respecto al inicial y final (fig. 8), que también se ve en el RMS pero con las limitaciones señaladas.

El rise time también presenta desvíos importantes que no hacen significativas las diferencias entre los estados inicial, intermedio y el final. También cabe mencionar que al ser la mayoría de las ondas captadas de tipo continuo es difícil la localización de un pico. La detección de este pico por parte del sistema se da a través de la fijación de un parámetro del equipo (peak definition time) que actúa como valor de referencia para localizar el rise time.

El parámetro duración depende del sistema usado ya que el mismo tiene una capacidad limitada en cuanto a tiempo (aproximadamente 0.25 segundos) para la extracción de parámetros. Al ser la emisión de tipo continua el hit ocupa la máxima duración y cuando ésta es completada se inicia un nuevo hit. De ahí que en muchas de las probetas la tasa de eventos resulte de un valor cercano a los 4 eventos por segundo. Asimismo este hecho sirvió para depurar los archivos (pasada) de probetas en los cuales la tasa de eventos promedio fuera 4 separando al principio y final de la experiencia aquellos hits que fueran órdenes de magnitud menor a 0.25 segundos. En otros archivos en los cuales la duración de los hits no llegó al máximo se dejaron todos los hits. En estos últimos archivos es donde tiene sentido hablar de duración y tasa de eventos. En las fig.9 y fig. 10 se ven las evoluciones de la tasa de eventos y la duración respectivamente. Se ve una diferencia en el final del ensayo donde la tasa de eventos aumenta correspondientemente con el descenso de la duración de los eventos.

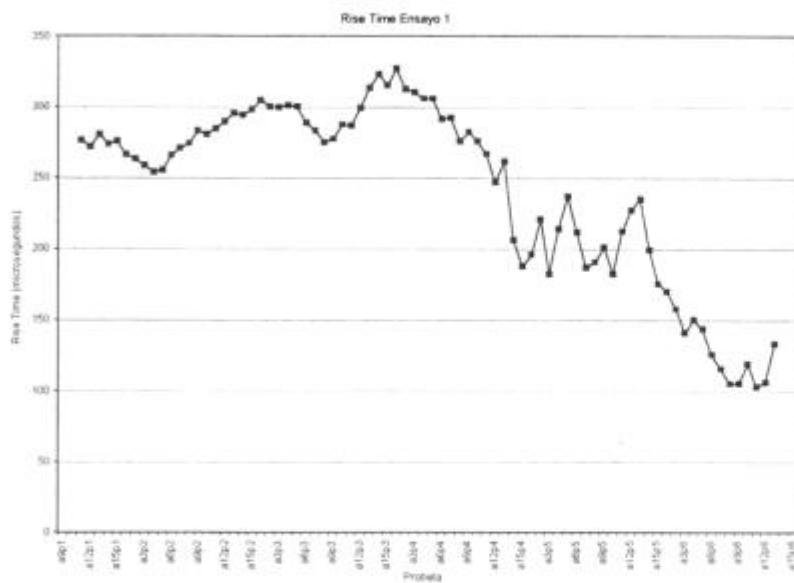


Fig. 4 Evolución del Rise Time en ensayo nº1

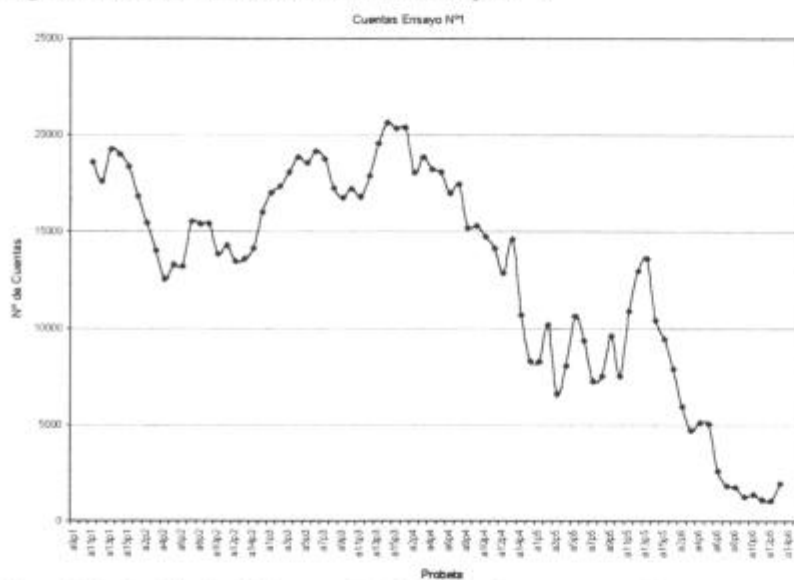


Fig. 5 Evolución del Número de Cuentas en ensayo nº1

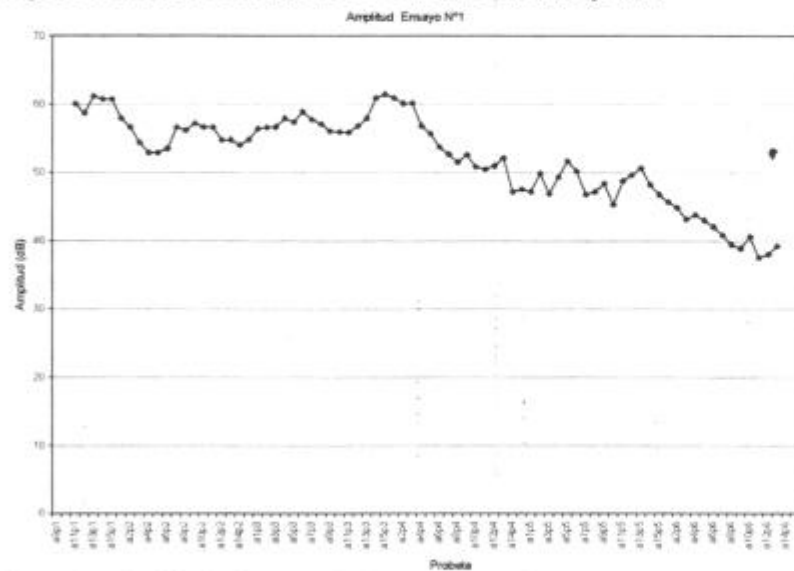


Fig. 6 Evolución de la Amplitud en ensayo nº1

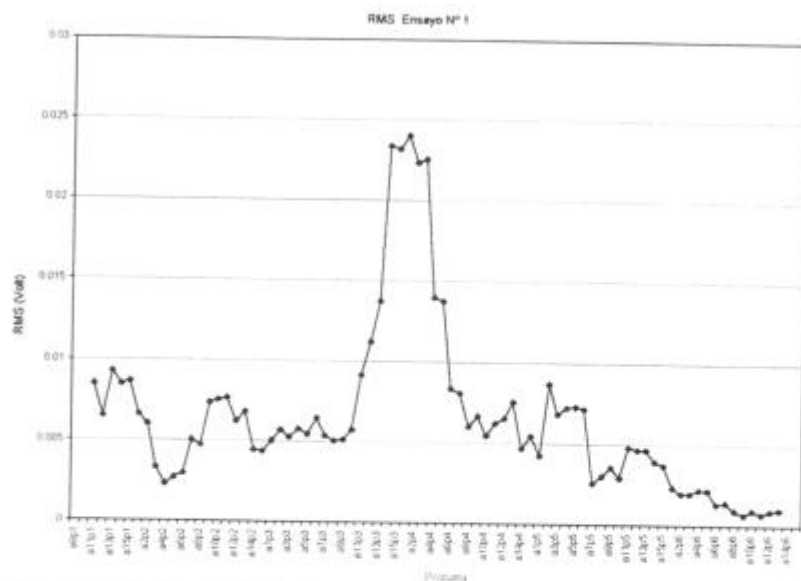


Fig. 7 Evolución del RMS en ensayo nº1

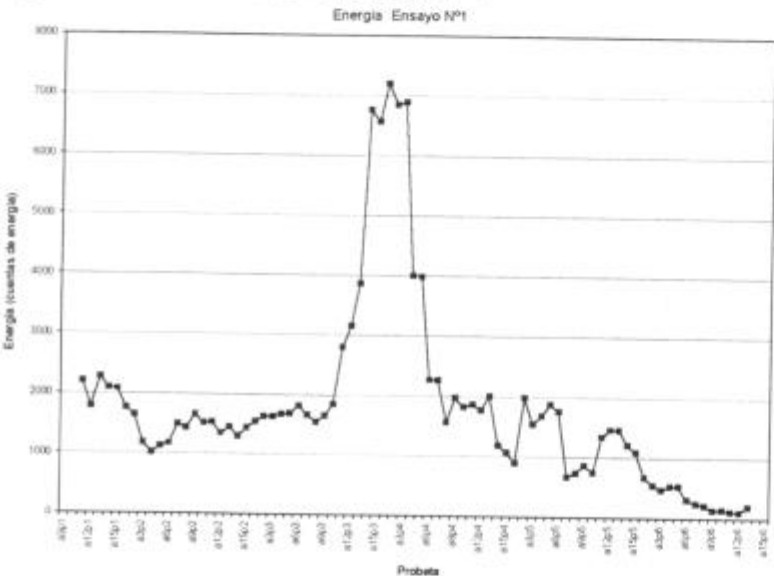


Fig. 8 Evolución de la Energía en ensayo nº1

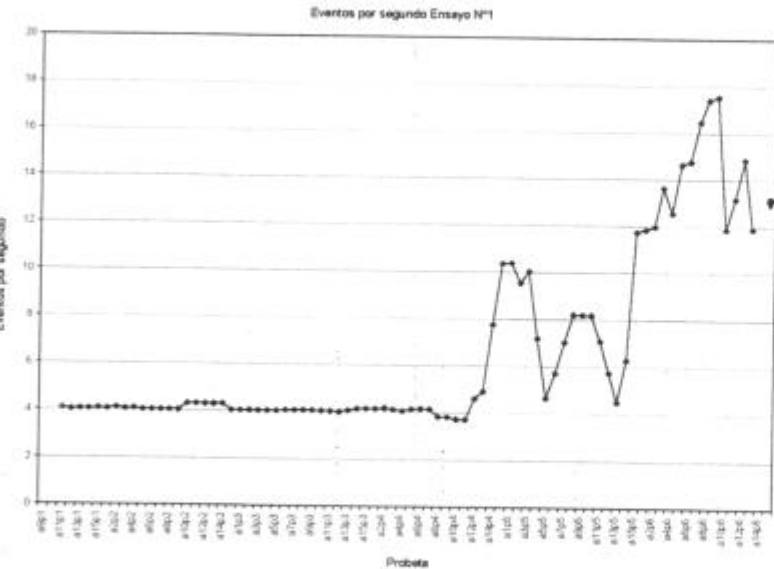
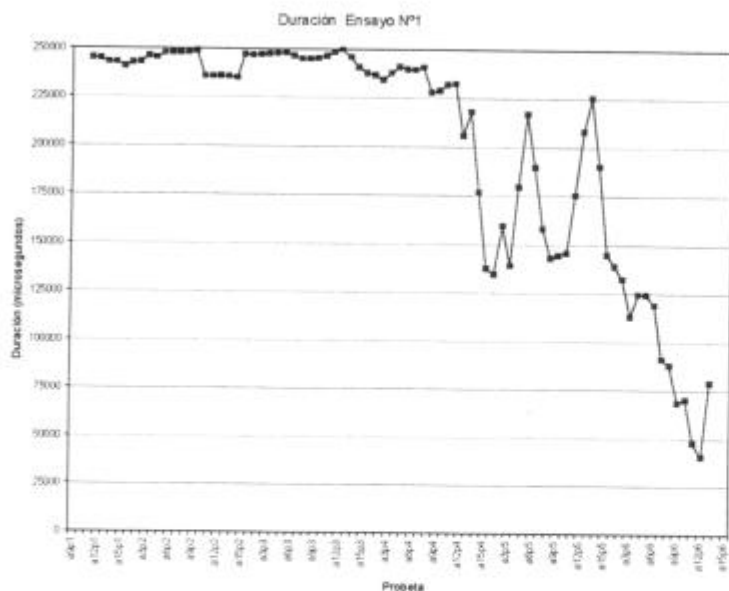


Fig. 9 Evolución de los Eventos por segundo ("Hit rate") en ensayo nº1



Como se ve en la evolución de la energía (fig. 8) se presenta un pico en sus valores a mediados del ensayo que se comporta como un predictor del cambio en otros parámetros como ser: rise time (fig. 4), cuentas (fig. 5), amplitud (fig. 6), eventos por segundo (fig. 9) y duración (fig. 10). En un tiempo posterior a dicho pico estos últimos 5 parámetros muestran un descenso en sus valores.

4.3.2 Ensayo nº 2

En el ensayo nº2 del acero SAE 1010, no se notan tan claramente las tendencias como en caso del ensayo nº1. Esto es así ya que el inserto acumula un desgaste de 0.22 mm, valor por debajo del límite establecido por la norma (0.3 mm). Consecuentemente los parámetros no acusan un cambio importante en sus valores. Así como comparación vemos que si bien la tendencia del rise time (fig. 11), cuentas (fig. 12) y amplitud (fig.13) es a descender, ésta no queda tan visiblemente marcada como en el ensayo anterior. También es de notar el hecho de que el rango de valores de los parámetros es distinto en ambas experiencias. esto significa que al cambiar los valores característicos del ensayo, en este caso la profundidad de pasada, cambian los valores umbrales para los cuales se consideraría a la herramienta desgastada. No obstante la tendencia, aún incipiente en el ensayo nº2 es la misma que en el nº1.

En cuanto al RMS y la energía (fig. 14 y fig. 15 respectivamente) también detectamos un pico relativo de sus valores en un estado de desgaste intermedio. Para el RMS caben las mismas consideraciones que en el ensayo nº1. En las fig. 16 y 17 se ven los eventos por segundo y la duración de los mismos y como muestran una variación hacia el final del ensayo. Sin embargo este resultado no se repite en un número grande de probetas como en el ensayo nº1. También se observa una diferencia en el rango de valores de los distintos parámetros para distintas condiciones de mecanizado. A los efectos de verificar dicha diferencia en el rango de valores de los parámetros de uno y otro ensayo se realizaron ANOVA con el software Statgraphics para cada uno de los parámetros del ensayo nº1 con respecto a los parámetros del ensayo nº2, dando diferencia significativa para todos ellos excepto en el caso de la duración (ver anexo 4 las tiradas del software). Este es un resultado importante ya que limita la aplicación de los parámetros como indicadores del desgaste en un amplio rango de operaciones de mecanizado. Una posible solución es amar funciones empíricas que relacionen las condiciones de mecanizado (profundidad de pasada, velocidad de corte y velocidad de alimentación) con el valor umbral para los parámetros indicadores del desgaste. Otra posible solución es normalizar los valores con la media de todo el ensayo para cada uno de los parámetros.

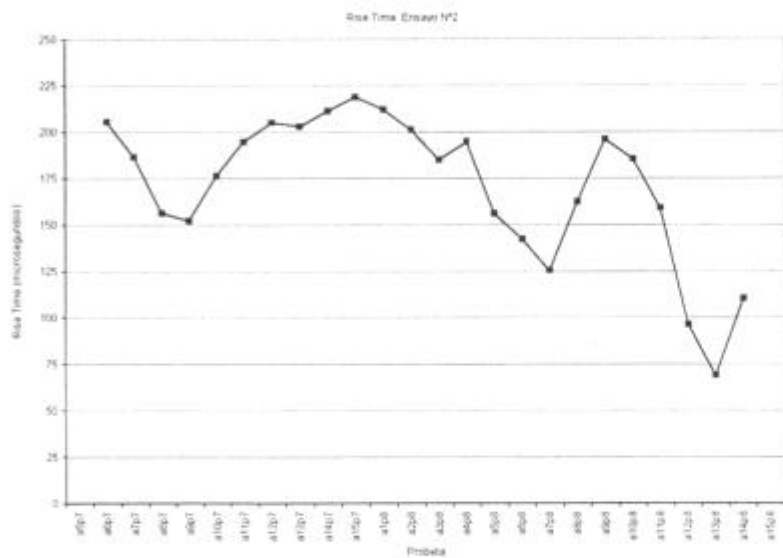


Fig. 11 Evolución Rise Time en ensayo n°2

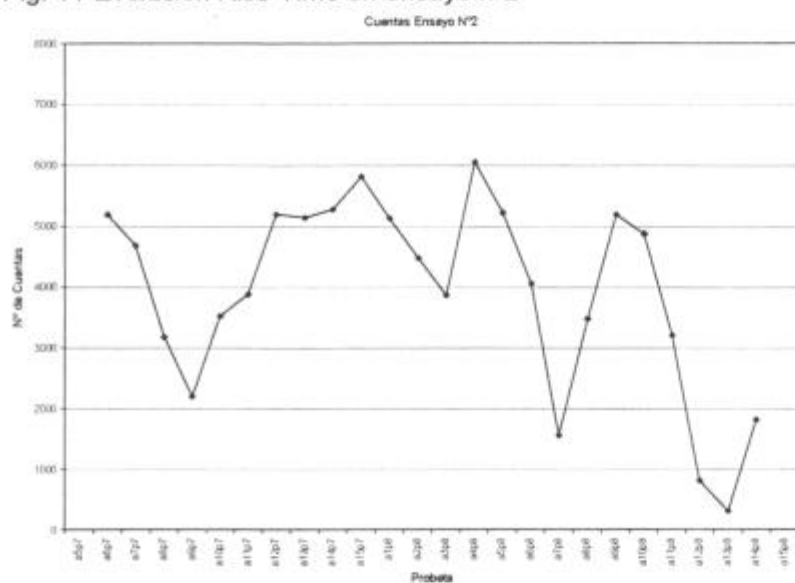


Fig. 12 Evolución Cuentas en ensayo n°2

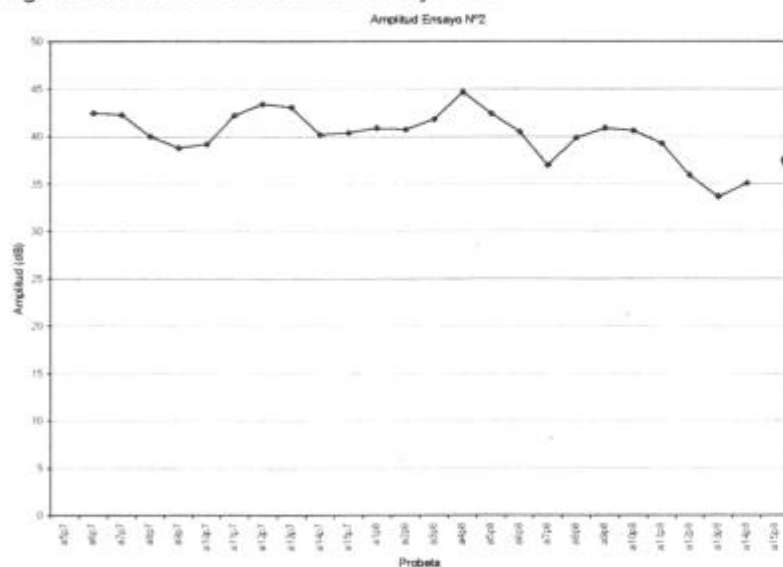


Fig. 13 Evolución de la Amplitud en ensayo n°2

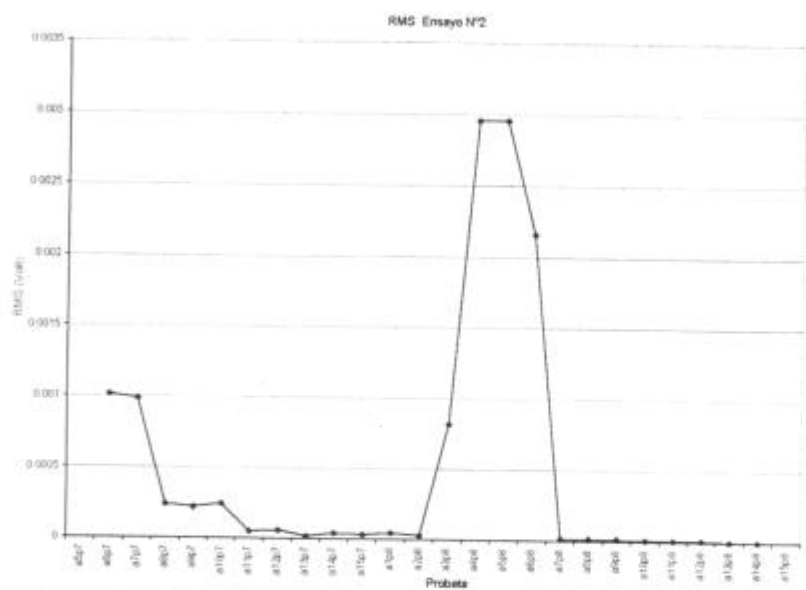


Fig. 14 Evolución del RMS en ensayo n°2

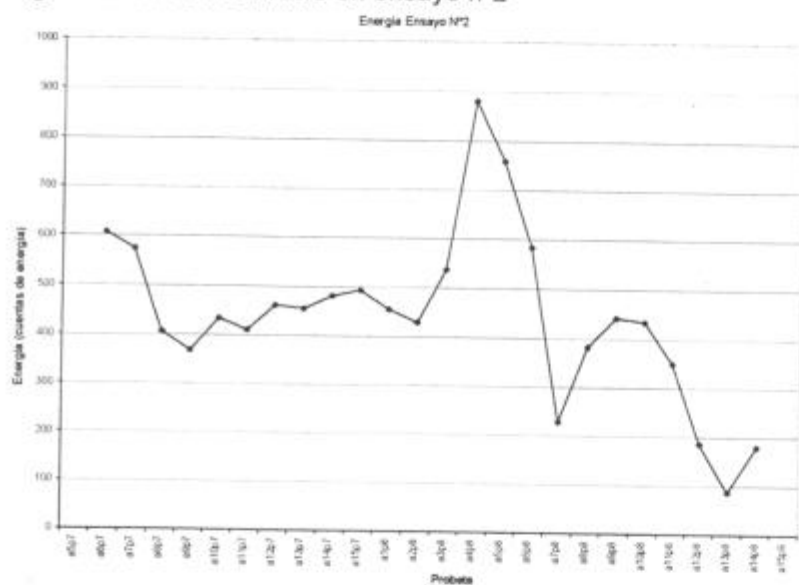


Fig. 15 Evolución de la Energía en ensayo n°2

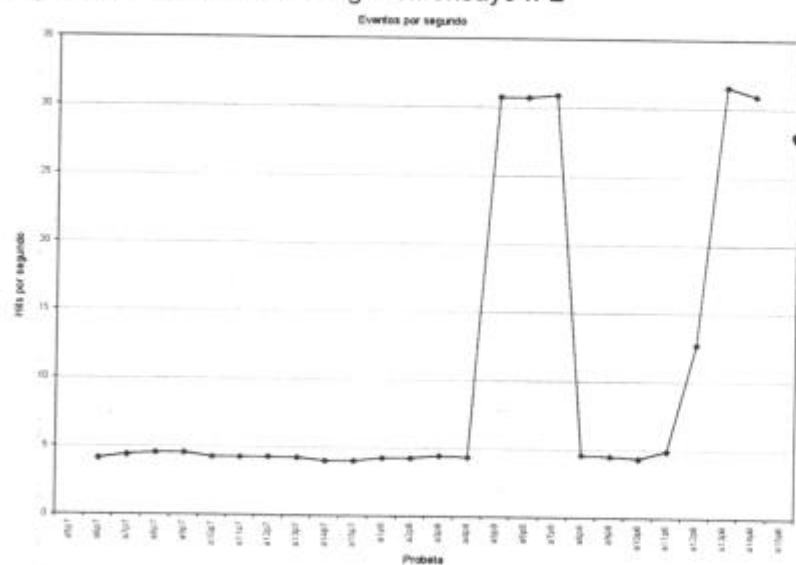


Fig. 16 Evolución de los Eventos por segundo en ensayo n°2

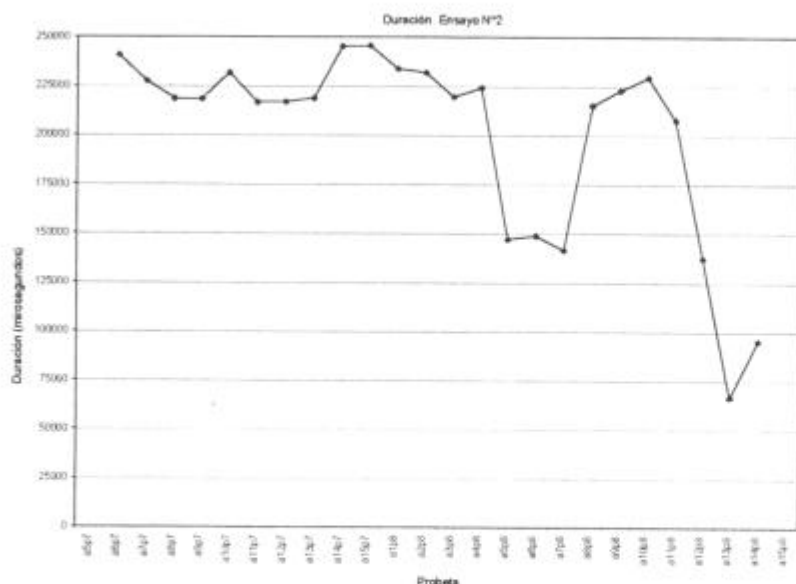


Fig. 17 Evolución de la Duración en ensayo n°2

En este ensayo se repite el pico de la energía en la segunda mitad del mismo ya que el inserto no llegó a estar fuera de norma. Así, posteriormente a dicho pico el rise time (fig. 11), cuentas (fig. 12), amplitud (fig. 13) muestran un incipiente descenso mientras que los gráficos de los eventos por segundo (fig. 16) y duración (fig. 17) sufren una inestabilidad en sus valores que anunciaría un descenso de los mismos.

4.3.3 Ensayo n° 3

En el ensayo n°3 del acero SAE 12L14, donde se llegó al límite de desgaste establecido por la norma, algunas de las tendencias registradas anteriormente se repiten. Así sucede con el rise time (fig. 18) y la amplitud (fig. 20) y en menor medida con las cuentas (fig. 19).

El hecho de que a mayor duración más veces se atraviesa el eje de las abscisas, hace que se incremente el número de cuentas presentando dos picos, en las mismas probetas que lo presenta el parámetro de duración. También se observa en el rise time y la amplitud una primera etapa donde ambos valores son crecientes.

La forma de las curvas de RMS (fig. 21) y energía (fig. 22) se repiten con respecto a los ensayos anteriores en el sentido de que aparece un pico de estos valores hacia un desgaste intermedio. Los picos posteriores que aparecen en el gráfico de la energía son debidos a que hay aumentos en la duración de los eventos. Al haber un incremento en las abscisas sobre donde se mide la energía (que es el área de una curva) entonces ésta también aumenta su valor. En los eventos por segundo (fig. 23) y la duración (fig. 24) no podemos detectar el cambio notable que se daba en el ensayo n°1.

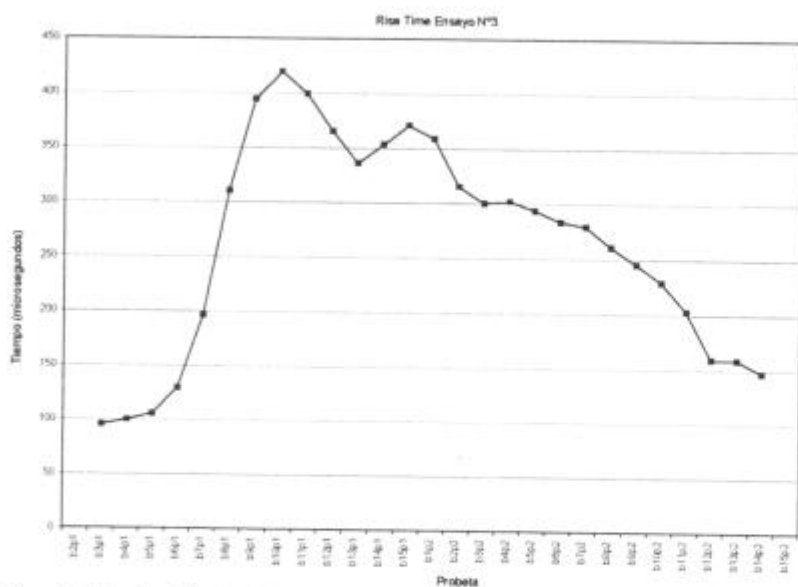


Fig. 18 Evolución del Rise Time en ensayo n°3

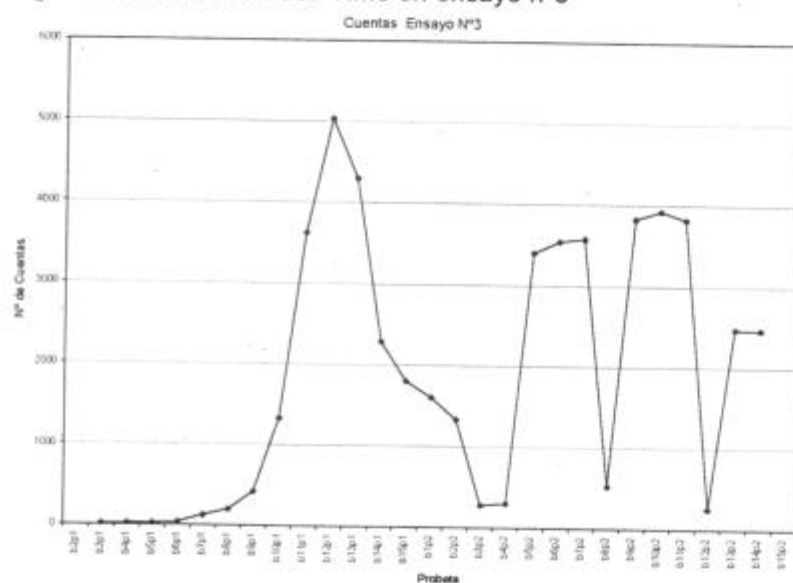


Fig. 19 Evolución Cuentas en ensayo n°3

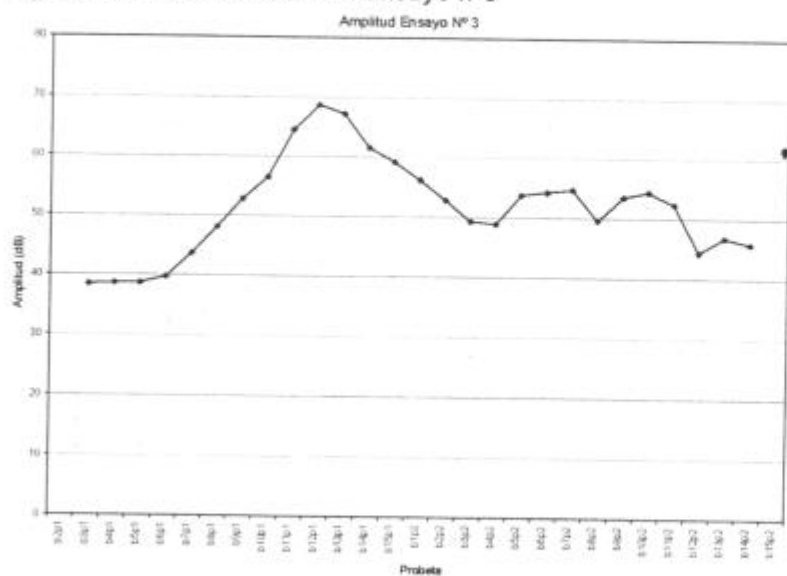
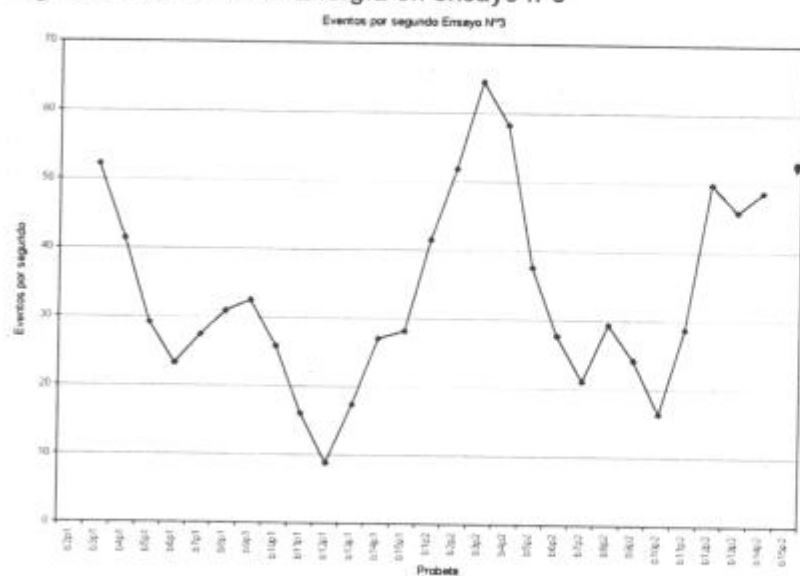
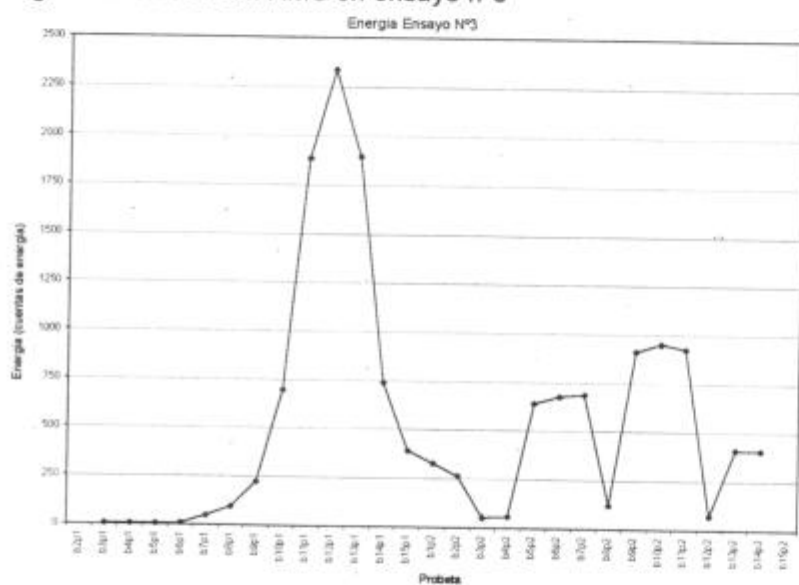
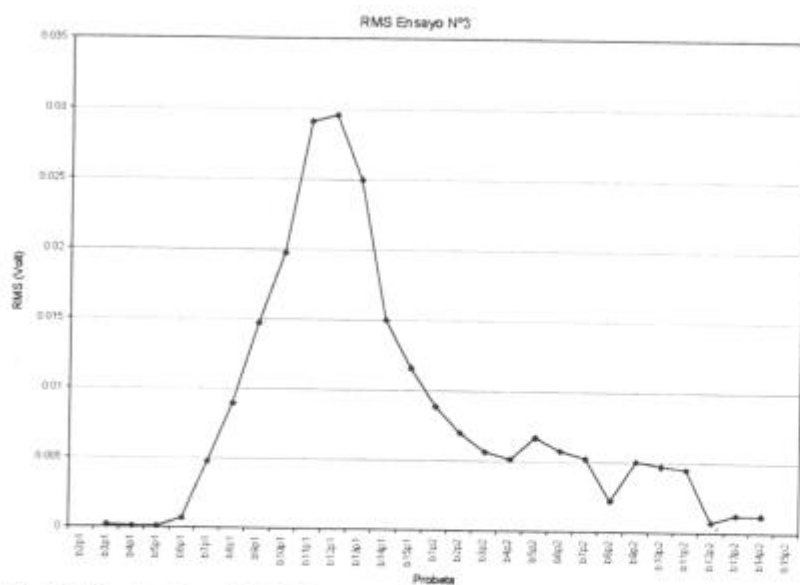


Fig. 20 Evolución de la Amplitud en ensayo n°3



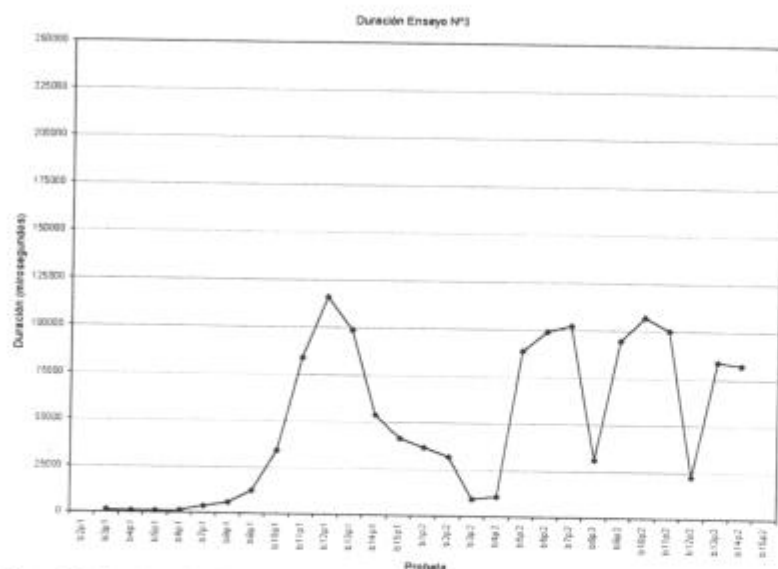


Fig. 24 Evolución de la Duración en ensayo nº3

Como fue dicho anteriormente en esta ocasión se repite el pico en la evolución de la energía con un descenso posterior en los valores del rise time (fig. 18) y amplitud (fig. 20) y una inestabilidad en los valores de cuentas (fig. 19), eventos por segundo (fig. 23) y duración (fig. 24).

4.3.4 Comparación entre ensayos con tests estadísticos

Se realizaron ANOVA entre los ensayos nº1 y nº3 y entre los ensayos nº2 y nº3 (ver anexo 4) a los efectos de verificar las diferencias en los rangos de los valores de los parámetros entre dichos pares de ensayos (para ensayos nº1 y nº2 ver 4.3.2) que se ven en los gráficos de evolución de los mismos. Entre el ensayo nº1 y el nº3 encontramos diferencias significativas en las cuentas, energía, duración y eventos por segundo. Entre el ensayo nº2 y el nº3 se detectan diferencias significativas en el rise time, cuentas, amplitud, RMS, duración y eventos por segundo.

A continuación se hizo un ensayo de rangos múltiples ("Multiple Range Test") con los datos de los 3 ensayos en cada uno de los parámetros para obtener grupos homogéneos (ver anexo 4). El resultado puede verse en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados del Multiple Range Test. Las cruces en columna indican la pertenencia del ensayo a un mismo grupo homogéneo, el ensayo sin cruz es de un segundo grupo.

Ensayo	Rise Time	Amplitud	Cuentas	RMS	Energía	Duración	Eventos por segundo
Nº1	X	X		X		X	X
Nº2			X		X	X	X
Nº3	X	X	X	X	X		

Lo que muestran estos ANOVA es que ante cambios en las condiciones de mecanizado ya sea los parámetros operativos del mismo o cambio de material, va a cambiar el rango de valores de los parámetros y por lo tanto el umbral para determinar el cambio de estado de la herramienta. En ambientes industriales mientras se mantengan las condiciones operativas constantes (velocidad de corte, profundidad de pasada, velocidad de alimentación y material), parámetros como la energía y la amplitud pueden ser utilizados para detectar tempranamente el desgaste del inserto. Ante cambios en las condiciones operativas sería necesario ajustar los umbrales de estos parámetros. Es por ello que es importante buscar nuevos parámetros que indiquen de una forma más efectiva el desgaste en un amplio rango de condiciones. Para ello se verán: histogramas de frecuencias, análisis de las señales mediante teoría de ruidos 1/f, análisis de las señales mediante la transformada Wavelet Packet.

4.4 Distribución de frecuencias

Un segundo nivel de análisis hecho a las señales fue obtener su espectro mediante la transformada de Fourier, que en los sistemas de análisis de señales se obtiene mediante la aplicación del algoritmo FFT. Con el espectro de cada hit se ubican en frecuencia los picos obtenidos y se realiza luego un histograma de frecuencias. En este caso sólo se analizaron probetas del inicio y del final de los ensayo n° 1 y n° 3.

En el ensayo nº 1 (acero 1010) vemos en el histograma de frecuencias (fig. 25) que crece la aparición de bajas frecuencias (90-150 KHz) en tanto que disminuye el contenido de frecuencias mayores (500-630 KHz) a medida que progresa el desgaste del inserto. En el ensayo nº 3 (acero 12L14) también vemos un descenso del contenido en frecuencias altas en la segunda probeta, aunque la distribución es más errática que en el caso del acero 1010, sin una tendencia tan marcada (fig.26). A medida que progresa el desgaste se ve un predominio en la aparición de picos en las bajas frecuencias con respecto a los estadios iniciales del desgaste. Este fenómeno del corrimiento del contenido de frecuencias de la señal hacia bajas frecuencias ha sido visto por otros autores [2]. Los valores de frecuencia baja están asociados a procesos estocásticos de memoria larga, lo cual sugiere un análisis con la teoría de ruido 1/f [3], [4].

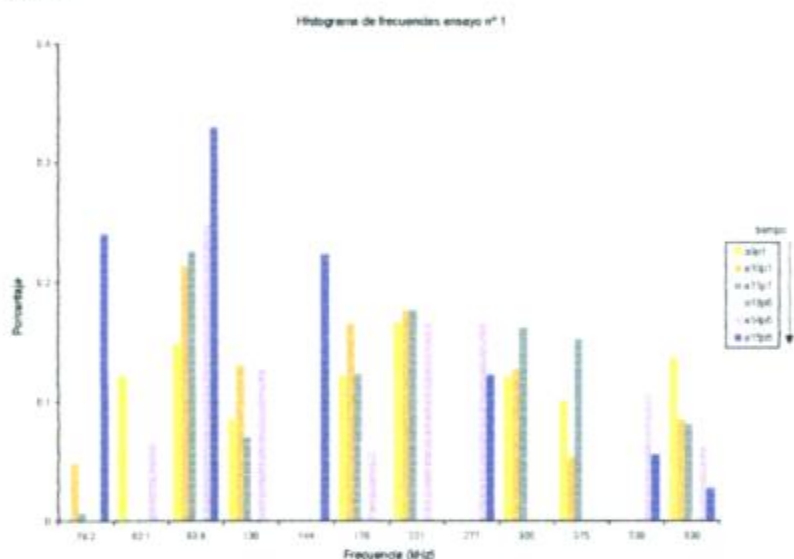


Fig. 25 Histograma de frecuencias para el ensayo nº 1

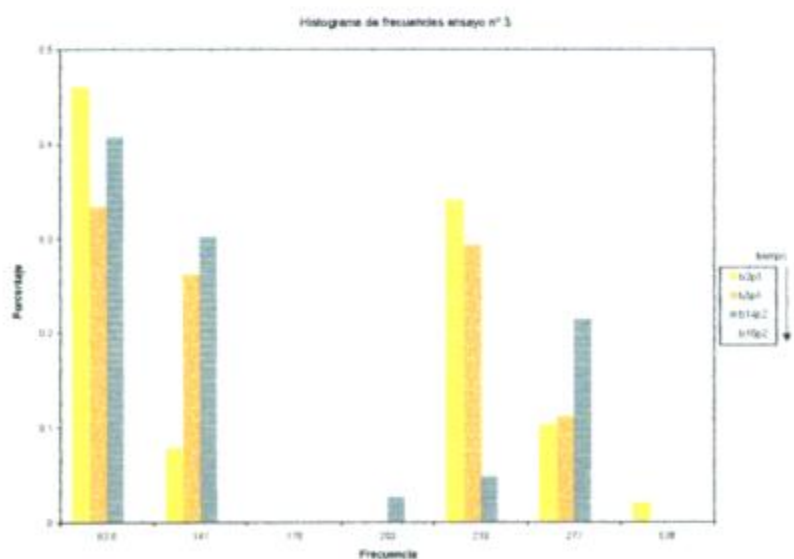


Fig. 26 Histograma de frecuencias para el ensayo nº 3

4.5 Evolución del coeficiente beta

Las señales estudiadas en este trabajo son de tipo ruido, o sea funciones no diferenciables en el tiempo y su estudio puede ser abordado mediante la teoría del ruido $1/f$. El espectro $1/f$ se origina en la energía liberada en los procesos de relajación cuando ciertas barreras, que mantienen al sistema en un estado metaestable, son sobrepasadas [3].

El coeficiente beta se obtiene a partir de la representación en un gráfico log-log de la densidad de potencia espectral, que es la transformada de Fourier de la autocorrelación de la señal. La zona de frecuencias a partir del cual el sensor empieza a operar linealmente puede ser aproximada por una recta en dicho gráfico (fig. 27). El valor absoluto de la pendiente de dicha recta es lo que se denomina coeficiente beta.

Los espectros suelen ser homogéneos sobre varias décadas para distintos fenómenos. Un valor de $\beta = 0$ representa un ruido blanco, $\beta \approx 1$ es un ruido rosa, $\beta = 2$ es un ruido browniano y $\beta > 2$ es un ruido negro que es el tipo de ruido que describe desde las catástrofes naturales (terremotos) hasta las fallas graves de equipos.

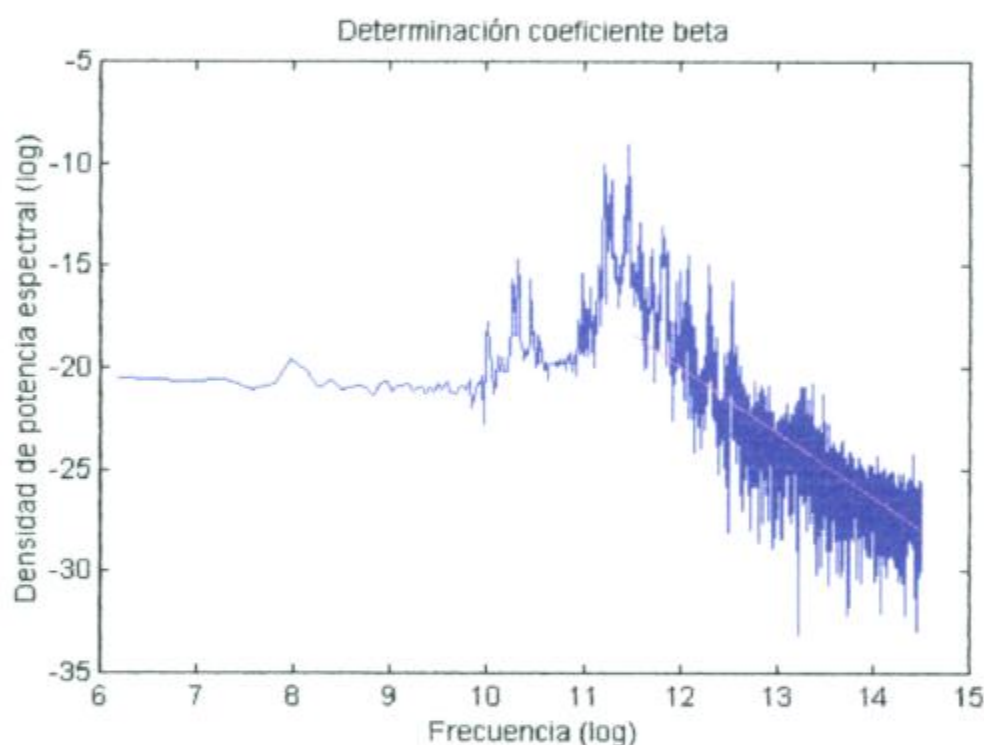


Fig. 27 Determinación del coeficiente beta. El valor absoluto de la pendiente de la recta en color magenta es el coeficiente beta (señal A5t655; $\beta=3.2026$)

A continuación se muestra la evolución del coeficiente beta en los 3 ensayos (figs. 28, 29 y 30). En el ensayo nº 1 (fig. 28) vemos una tendencia creciente en el coeficiente pero ésta no se repite en los dos ensayos siguientes. Si bien no hay una tendencia que pueda marcar un valor umbral a partir del cual podríamos decir que la herramienta está desgastada, el coeficiente beta muestra valores típicos de catástrofes naturales (terremotos) y fallas de equipo en los 3 ensayos. Incluso este coeficiente muestra la característica deseable como indicador de desgaste de no depender de las condiciones operativas del mecanizado, su valor oscila entre 2.5 y 3 en los 3 ensayos. Se han analizado los momentos centrados de segundo, tercer y cuarto orden de la distribución (desvío, asimetría y kurtosis respectivamente) de coeficientes beta para cada probeta. Junto con los valores promedio del coeficiente beta se ha mostrado la evolución de la kurtosis de dicho coeficiente. En ellas se nota un comportamiento similar al del parámetro Energía sólo que desplazado en el tiempo, siendo más notorio en el ensayo nº 3. El desvío muestra una tendencia similar a la kurtosis pero al ser un momento de segundo orden

las diferencias en la curva son menos notorias. El momento centrado de tercer orden no muestra una tendencia definida, ni caracteriza un fenómeno en particular como lo hace el promedio de los coeficientes beta. Este tema merece ser estudiado en trabajos posteriores.



Fig. 28 Evolución del coeficiente beta y kurtosis de su distribución para el ensayo n°1

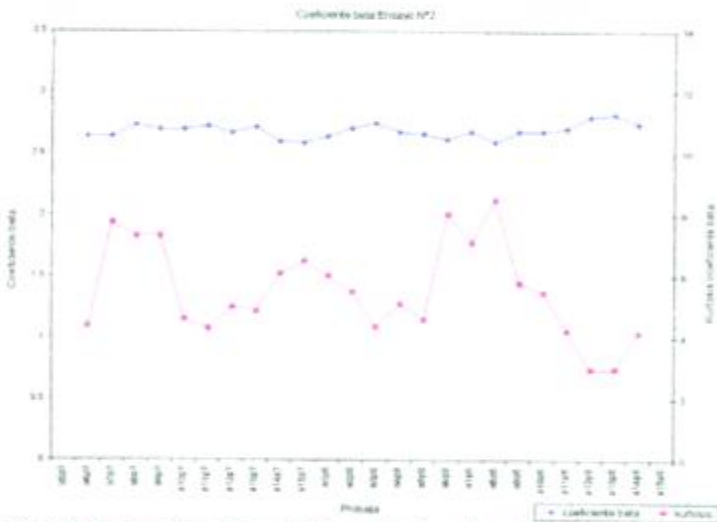


Fig. 29 Evolución del coeficiente beta y kurtosis de su distribución para el ensayo n°2



Fig. 30 Evolución del coeficiente beta y kurtosis de su distribución para el ensayo n°3

4.6 Análisis de señales con Wavelets

4.6.1 Introducción a Wavelets

La transformada de Fourier es extensamente usada en el análisis de señales. La transformada de Fourier y su inversa pueden ser definidas como en (4.3) y (4.4) respectivamente

$$S(\omega) = \int s(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (4.3)$$

$$s(t) = (1/2\pi) \int S(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (4.4)$$

donde $S(\omega)$ es la transformada de Fourier de la señal $s(t)$. $S(\omega)$ es una función independiente del tiempo que describe la señal en el dominio de la frecuencia. Aquí, $\exp(i\omega t)$ es la base y cualquier señal puede construirse como una combinación de las funciones base. En el caso de la transformada de Fourier, las funciones base son sinusoides complejas que existen para $-\infty < t < \infty$. Por lo tanto la transformada de Fourier es ideal para análisis de señales estacionarias. Cuando la señal es corta o se tiene una muestra de ella, se asume una periodicidad en la aplicación de la transformada de Fourier.

Para el análisis de transientes necesitamos otro método que transforme la señal al dominio del tiempo y la frecuencia. Un primer intento, presentado por Gabor, es aplicar una ventana $w(t-\tau)$ a la señal $s(t)$ y luego realizar la transformada de Fourier según (4.5)

$$[WFT](\omega, \tau) = \int s(t) w(t - \tau) \exp(i\omega t) dt \quad (4.5)$$

Cuando la ventana es gaussiana como (4.6),

$$w(t - \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha}} \exp\left[-\frac{(t - \tau)^2}{4\alpha}\right] \quad (4.6)$$

la transformación WFT se llama transformada de Gabor.

La ventana tiene un efecto detrimental sobre la frecuencia en comparación con la transformada de Fourier. Por otra parte una ventana corta tiene una mejor resolución en el tiempo. Esto resulta del principio de incerteza (4.7)

$$\Delta t \Delta \omega \geq 1/2 \quad (4.7)$$

donde Δt es la resolución en el dominio del tiempo y $\Delta \omega$ es la resolución en el dominio de la frecuencia, que en el caso de la transformada de Gabor dicho producto es igual a $1/2$ [5]. Ambos factores permanecen constantes en la transformada de Fourier con ventana, cubriendo el plano tiempo-frecuencia con un arreglo uniforme de resolución en tiempo y frecuencia.

La figura 31 muestra el efecto de una ventana de Gabor sobre 3 señales de distinta frecuencia cada una. En esta figura se ve que, siempre que se mantenga constante el ancho de la ventana en el tiempo (fig. 31b), la resolución en frecuencia se mantiene constante, o sea que el ancho de banda es igual en los tres casos. Esto implica que al aumentar la frecuencia se mejora la resolución relativa ya que el ancho de banda de frecuencia es el mismo.

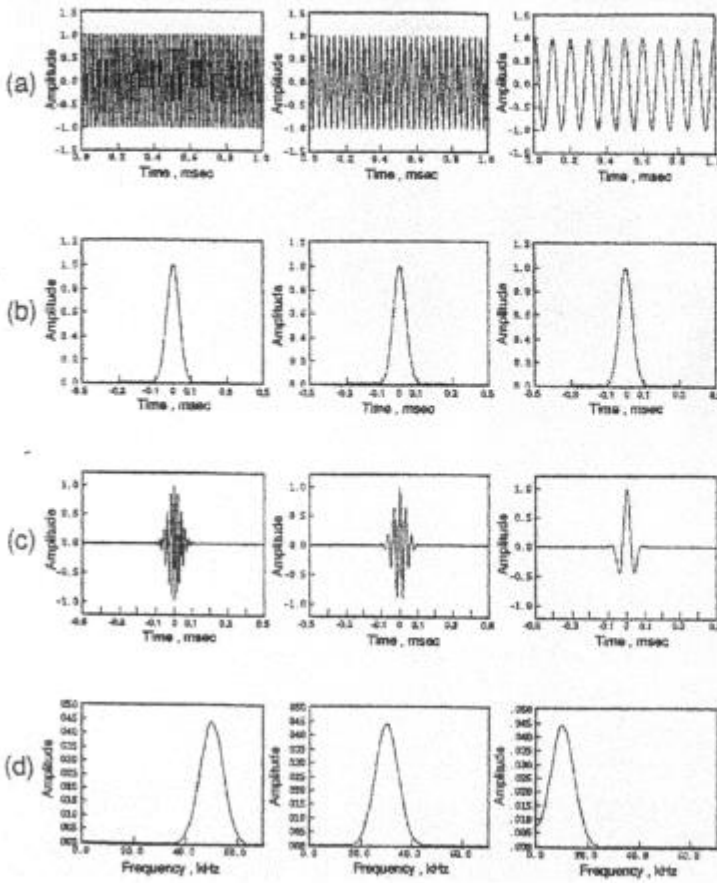


Fig. 31 La transformada de Fourier con ventana. a) Señal, b) Ventana, c) Producto de a y b, d) Transformada de Fourier de c.

La transformada wavelet (WT) es una extensión de la transformada de Fourier con ventana, con la diferencia de que las bases de WT están escaladas con respecto a la frecuencia. Las funciones base son ondas con corta duración en el tiempo y de ahí el nombre de onditas (wavelets). El escalado se realiza de manera que el aumento en el centro de la banda de frecuencias sea proporcional al aumento en el ancho de banda de las frecuencias y que juntamente disminuya el ancho de la ventana en el tiempo, resultando una mejor localización temporal (fig. 32). Al banco de filtros en que el ancho de banda es proporcional a la frecuencia central de la ventana se los llama de factor Q constante. La resolución en el tiempo puede mejorarse en las altas frecuencias, mientras que la resolución en frecuencias, es mejorable en las bajas frecuencias [6].

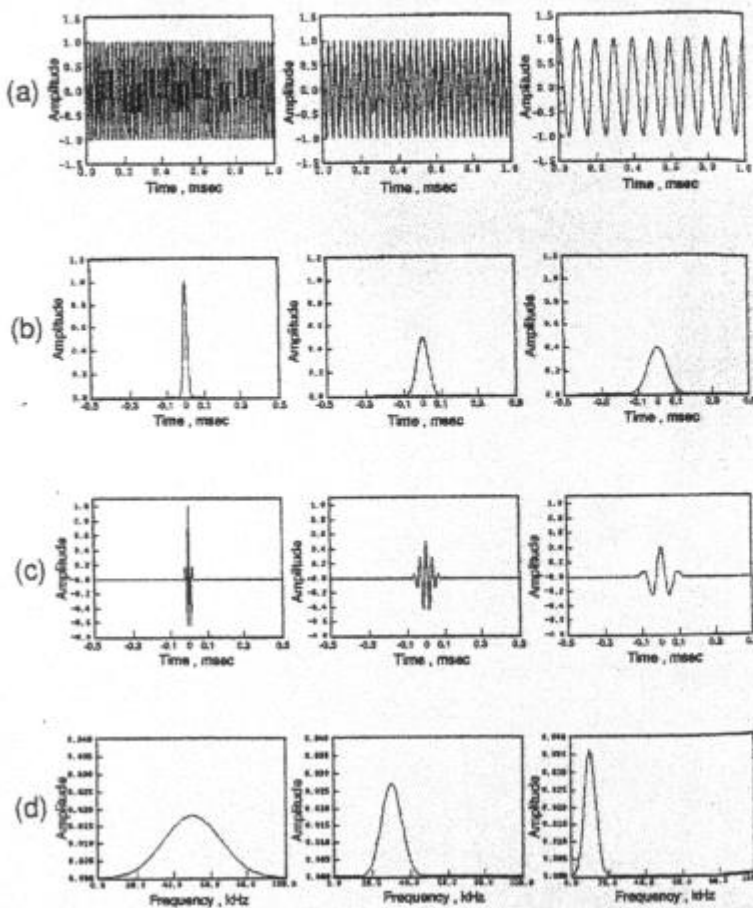


Fig. 32 La transformada wavelet. a) Señal, b) Ventana, c) Producto de a y b, d) Transformada de Fourier de c.

La transformada wavelet usa sus funciones base, llamadas wavelets, y realiza una descomposición de la señal $s(t)$ en un conjunto ponderado de funciones wavelets escaladas $\psi(t)$. En general los wavelets son funciones complejas y podemos definirlos según (4.8)

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi[(t-b)/a] \quad (4.8)$$

La función $\psi(t)$ es la wavelet madre con el parámetro de escala a y el parámetro de traslación b y provee un conjunto de funciones localizadas en el tiempo y la frecuencia. El parámetro a , da el ancho de la ventana y está relacionado con la frecuencia. Este parámetro tiene una interpretación similar a la escala de un mapa: grandes escalas dan una vista global y las pequeñas los detalles. Esto último puede ser visto también haciendo la transformada de Fourier de la wavelet madre (4.9)

$$[FT \psi_{a,b}](\omega) = \hat{\psi}_{a,b}(\omega) = |a|^{1/2} \hat{\psi}(a\omega) \exp(-i\omega b) \quad (4.9)$$

El parámetro b determina la posición de la ventana en el tiempo y por lo tanto define qué parte de la señal está siendo analizada. En la notación de wavelets reemplazamos ω por a y el tiempo τ por b . Por lo tanto la transformada wavelet de una señal $s(t)$ queda según (4.10)

$$[WT](a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}^*(t) s(t) dt \quad (4.10)$$

donde ψ^* es el conjugado de la función wavelet definida en (4.8).

El resultado de la transformada wavelet de una señal es una colección de coeficientes wavelets; cada coeficiente para un valor de la escala (frecuencia) y traslación (tiempo). Los resultados son representados en un mapa de contorno en un plano $\log(a)$ - b con niveles de gris o de colores representando los coeficientes wavelets [7].

Si $a=2^j$ y $b=k2^j$ tenemos (4.11)

$$\psi_{j,k} = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (4.11)$$

La transformada wavelet discreta (DWT) es entonces definida según (4.12)

$$d_{j,k} = \int s(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (4.12)$$

siendo $d_{j,k}$ los coeficientes wavelets y las funciones $\psi_{j,k}$ ortogonales. Se emplea un enfoque multiresolución en el cual se usa una función de escala discreta (4.13)

$$\phi_{j,k} = 2^{-j/2} \phi\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right) \quad (4.13)$$

con la cual obtenemos los coeficientes de escala, que son la versión muestreada de la señal original. Los coeficientes wavelets y los coeficientes de escala vienen dados por (4.14) y (4.15) respectivamente

$$c_{j,k} = \sum_n x[n] h_j[n - 2^j k] \quad (4.14)$$

$$d_{j,k} = \sum_n x[n] g_j[n - 2^j k] \quad (4.15)$$

con $j \geq 0$, donde $x[n]$ es la señal discretizada, $g_j[n - 2^j k]$ es el wavelet discreto de análisis, el equivalente discreto de $2^{j/2} \psi(2^{-j}t - k)$, $h_j[n - 2^j k]$ es la secuencia de escala. Los términos g y h son filtros pasaaltos y pasabajos respectivamente derivados del wavelet de análisis $\psi(t)$ y la función de escala $\phi(t)$.

Los coeficientes $c_{j,k}$ y $d_{j,k}$ pueden ser obtenidos recursivamente usando el algoritmo de Mallat según (4.16) y (4.17) respectivamente.

$$c_{j+1,k} = \sum_n h[n - 2k] c_{j,k} \quad (4.16)$$

$$d_{j+1,k} = \sum_n g[n - 2k] c_{j,k} \quad (4.17)$$

La DWT puede ser reescrita como (4.18)

$$\begin{aligned} c_j[f(t)] &= h(t) * c_{j-1}[f(t)] \\ d_j[f(t)] &= g(t) * c_{j-1}[f(t)] \\ c_0[f(t)] &= f(t) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Si establecemos (4.17)

$$H\{\} = \sum_k h(k - 2t)$$

$$G\{\} = \sum_k g(k - 2t) \quad (4.19)$$

Por lo que (4.16) puede ser reescrita como (4.20)

$$\begin{aligned} c_j[f(t)] &= H\{c_{j-1}[f(t)]\} \\ d_j[f(t)] &= G\{c_{j-1}[f(t)]\} \end{aligned} \quad (4.20)$$

La DWT es solamente la aproximación $c_{j-1}[f(t)]$ pero no la señal detalle $d_{j-1}[f(t)]$. La transformada wavelet packet no omite el detalle por lo que queda (4.21) [8]

$$\begin{aligned} c_j[f(t)] &= H\{c_{j-1}[f(t)]\} + G\{d_{j-1}[f(t)]\} \\ d_j[f(t)] &= G\{c_{j-1}[f(t)]\} + H\{d_{j-1}[f(t)]\} \end{aligned} \quad (4.21)$$

4.6.2 Evolución de la potencia medida sobre los coeficientes de WP

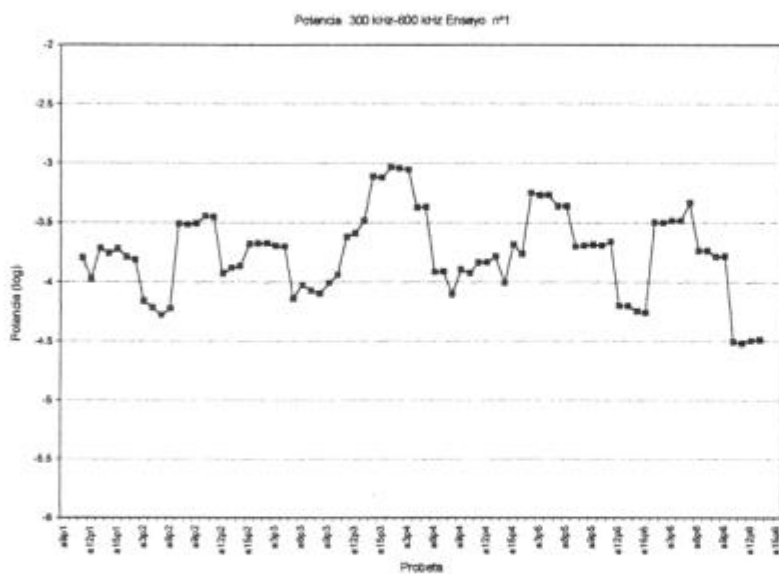
La potencia de los coeficientes de la transformada WP se calcula según (4.22)

$$P_j = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N c_j^2 \quad (4.22)$$

donde N es el número de coeficientes c_j considerados [3], [4].

En (4.22) se computaron únicamente los coeficientes correspondientes al rango de frecuencia entre 300 kHz y 600 kHz ya que según Niu, Wong, Hong y Liu [1] la potencia espectral en dicha banda de frecuencias es buen indicador del desgaste. Para realizar el trabajo se utilizó el wavelet madre de Haar y se llegó hasta un nivel 7 de resolución. Luego de la descomposición se busca cuál es la mejor base para representar la señal dada, esto es aquella base que pueda representar la señal en la forma más compacta. En el presente trabajo se halló mediante aquella base que minimizara la entropía de los coeficientes de la transformada WP (ver 4.6.3). La descomposición en WP es resuelta mediante un algoritmo provisto en el software Matlab, así como también la búsqueda de la mejor base. En el anexo 3 se encuentra el programa escrito para Matlab (enerx36.m) que usa los dos últimos algoritmos en el análisis de señales del presente trabajo.

La potencia obtenida para cada hit es promediada luego sobre toda la pasada. La cantidad de hits sobre las cuales se hace el promedio puede verse en las columnas "Formas de onda extraídas" de las tablas que figuran en el anexo 2. A continuación se muestra la evolución de la potencia calculada según (4.22), donde podemos ver que se repite la forma de la los gráficos del parámetro energía, sólo que los picos aparecen amplificados respecto del parámetro pues la escala de potencia es logarítmica (ver figs. 33, 34, 35). Otro aspecto importante es que el cálculo de la potencia se realiza sobre una ventana fija de tiempo y no depende de la duración total del evento como en el caso de la energía.



En la figura 36 comparamos la potencia de los coeficientes de WP en la banda de 300-600 KHz en función del desgaste del inserto entre el ensayo nº 2 y nº 3. En él vemos el mismo comportamiento en los dos ensayos, esto es que ambas curvas presentan la misma morfología con un pico en un valor medio del desgaste (0.15 mm) y luego un descenso en la potencia hacia el fin de la vida útil del inserto. También se ve que los valores de cada pico dependen de las condiciones del ensayo: material, profundidad de pasada, velocidad de pasada, velocidad de corte.

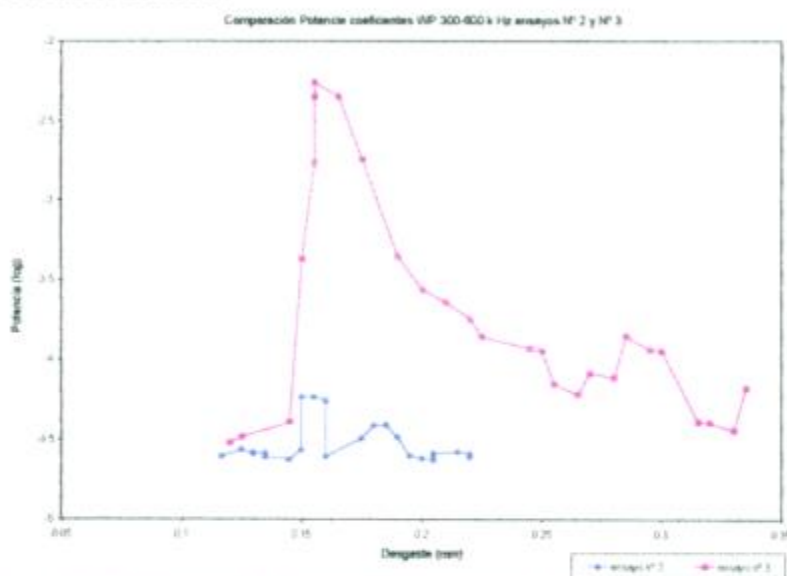


Fig. 36 Comparación Potencia coeficientes WP banda 300-600 kHz vs. desgaste entre los ensayos nº 2 y nº 3.

A continuación se normalizaron los ejes de la figura 36 a los efectos de resaltar la similitud en la morfología de ambas curvas (fig. 37). Para las abscisas se tomó como "1" el valor del desgaste donde se produce el pico de potencia y de "2" donde se produce el segundo pico y con estos valores se escalan linealmente el resto. En cuanto a las ordenadas se dividen los valores por la amplitud de los datos considerados en la experiencia, tomándose como cero al menor valor de la potencia. De él se puede considerar la hipótesis de que en ambos casos el fenómeno del desgaste desde el punto de vista de EA ha llegado a un mismo estadio, aún cuando el desgaste medido convencionalmente en el ensayo nº 2 sea menor que el fijado por norma. Estas observaciones merecen un estudio más exhaustivo en el futuro.

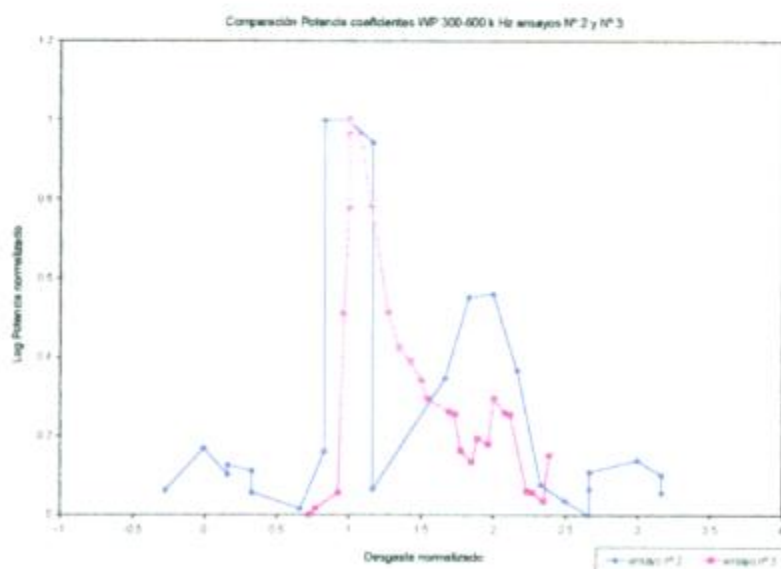


Fig. 37 Comparación Potencia coeficientes WP banda 300-600 kHz vs. desgaste entre los ensayos nº 2 y nº 3 en gráfico normalizado.

4.6.3 Evolución de la entropía de los coeficientes de WP

Se ha decidido calcular otros indicadores que refuercen o complementen la tendencia mostrada en el indicador de potencia. Entre ellos se optó por la entropía de los coeficientes de la transformada wavelet packet para el intervalo de frecuencias entre 300 kHz y 600 kHz, banda de frecuencias con información sobre el estado de la herramienta, para investigar como estaban distribuidas en una señal continua las frecuencias. A valores más cercanos a 1, la distribución de frecuencias es más uniforme en el espectro y el fenómeno en este aspecto es más desordenado; por el contrario valores más cercanos a 0 indican cierto agrupamiento u orden en la distribución de frecuencias. Para el cálculo de la entropía se usó la función (4.23) de Shannon-Weaver [1].

$$S = -\sum_i p_i \log p_i \quad (4.23)$$

donde p_i es (4.22)

$$p_i = c_i^2 / P \quad (4.24)$$

donde P es la potencia según (4.22).

En esta ocasión también se emplearon rutinas provistas por Matlab para el cálculo de la entropía. En el anexo 3 se muestra el programa escrito para Matlab (entropia36.m) para el cálculo de la entropía de las señales del presente trabajo.

Como se ve en las figs. 38, 39 y 40 la entropía de los coeficientes WP en la banda de 300 kHz a 600 kHz refuerza la tendencia de la potencia sobre todo en las etapas media y final. Esto es que se presenta un pico en la etapa media del desgaste y luego una declinación en ambos valores.



Fig. 38 Comparación de la evolución Entropía y Potencia de coeficientes WP para ensayo n° 1

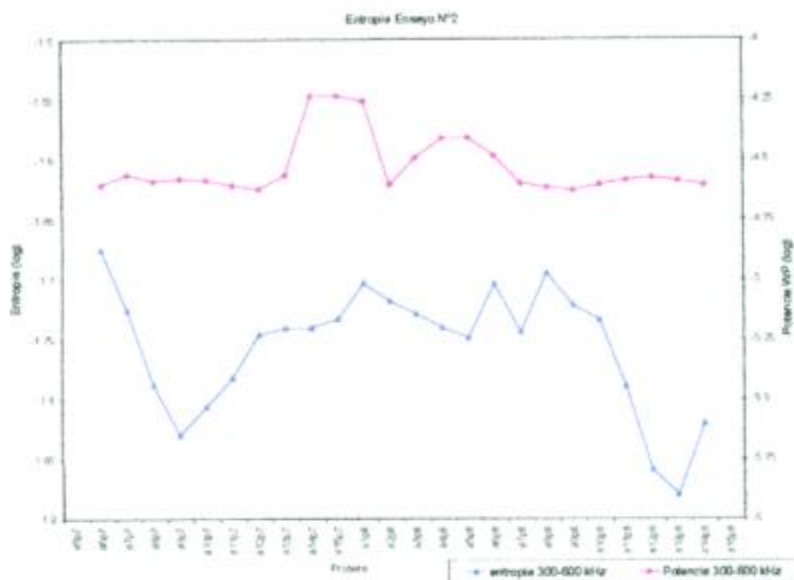


Fig. 39 Comparación de la evolución Entropía y Potencia de coeficientes WP para ensayo n° 2

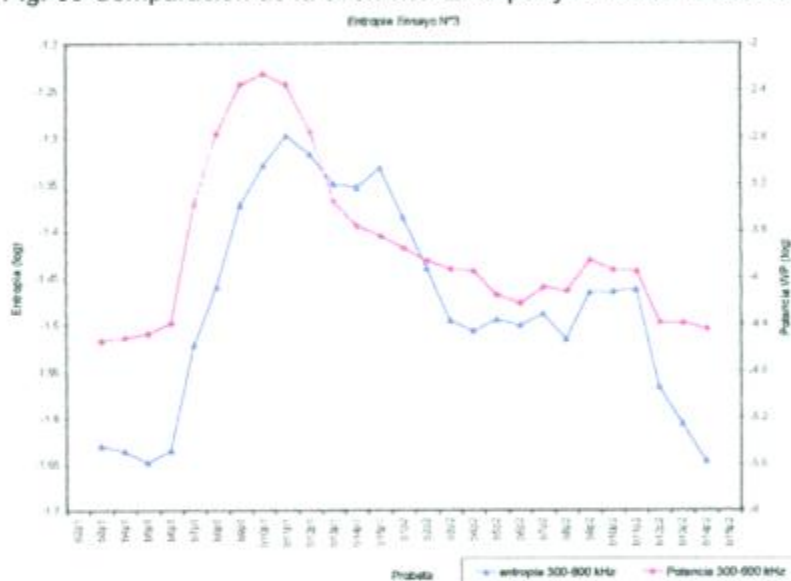


Fig. 40 Comparación de la evolución Entropía y Potencia de coeficientes WP para ensayo n° 3

En la figura 41 comparamos la entropía de los coeficientes de WP en la banda de 300-600 KHz en función del desgaste del inserto entre el ensayo n° 2 y n° 3. En él vemos un comportamiento similar entre ensayos con respecto a la entropía y este resultado refuerza la capacidad de la potencia como predictor del desgaste. En esta oportunidad se ve que los valores del parámetro dependen de las condiciones del ensayo: material, profundidad de pasada, velocidad de alimentación y velocidad de corte.

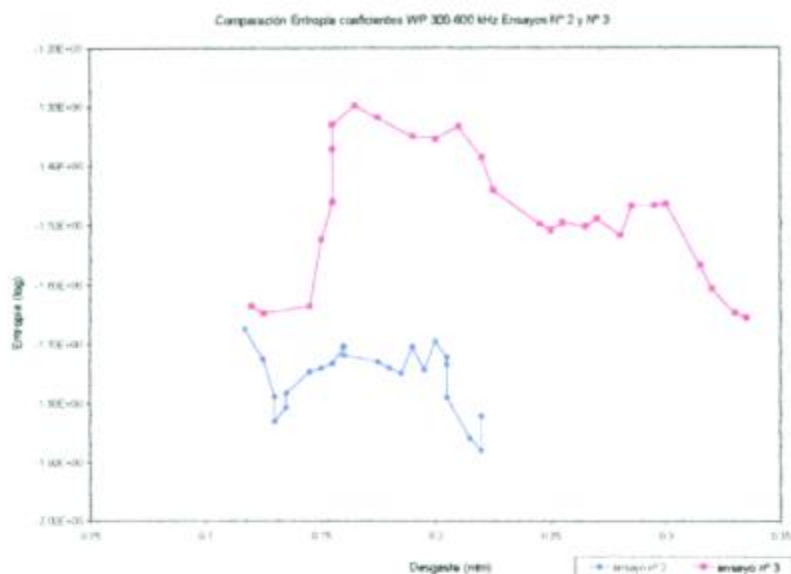


Fig. 41 Comparación Entropía coeficientes WP banda 300-600 kHz vs. desgaste entre los ensayos nº 2 y nº 3.

4.7 Análisis de los ensayos nº 4 y nº 5

El ensayo nº 4 fue realizado a los efectos de observar los parámetros antes medidos cuando se mecaniza el acero SAE 1010 con un inserto cuyo desgaste es mayor que el límite establecido por la norma, por lo que se lo considera fuera de uso. Este ensayo puede ser tomado como una continuación del ensayo nº 2 ya que la profundidad de pasada, velocidad de alimentación y material son iguales, sólo que se mecaniza con un inserto previamente desgastado. En el caso de la velocidad de corte estas son un 10% menores ya que el diámetro ha sido reducido con respecto al ensayo nº 2. Con el mismo criterio se realizó el ensayo nº 5, que puede ser considerado, dentro de las salvedades mencionadas arriba, como una continuación del ensayo nº 3. En el ensayo nº 5 el material usado es el acero SAE 12L14 y la profundidad de pasada y velocidad de alimentación son iguales al del ensayo nº 3. En cuanto a la velocidad de corte vale el comentario hecho anteriormente para el caso del acero SAE 1010.

En el ensayo nº 4 se evidencia un aumento en el valor de los parámetros: Rise time, Cuentas, Energía, Amplitud y RMS con respecto al ensayo nº 2. En la figura 42 vemos la evolución de la amplitud en el ensayo nº 2 (a la izquierda) y la del nº 4 (a la derecha). En la figura 43 vemos la evolución de la energía y su desvío. Se ve que el desvío también puede ser un indicador con similares limitaciones que la energía, sólo que dentro de su rango de valores la presencia del pico que se produce antes de que el inserto quede fuera de servicio, toma más relieve. Como se ve en ambos gráficos es necesario tener la etapa de la curva que incluye el valor límite por norma del desgaste del inserto.

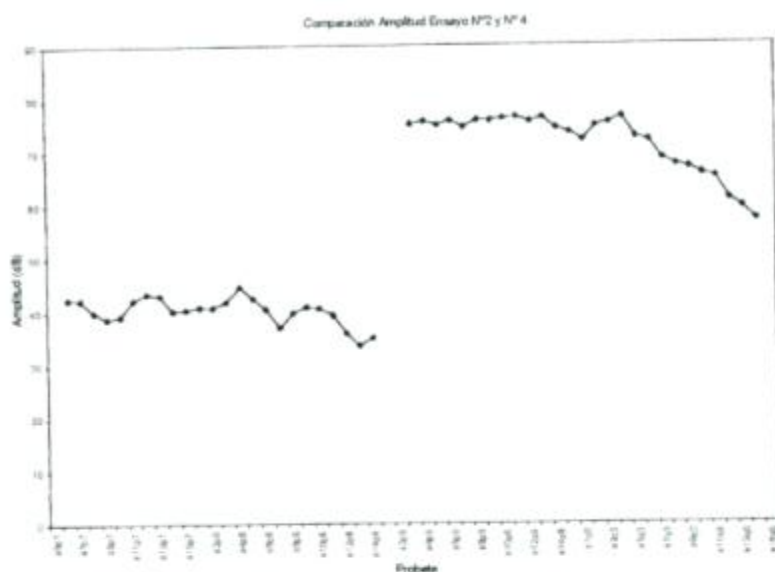


Fig. 42 Evolución Amplitud ensayos nº 2 y nº 4

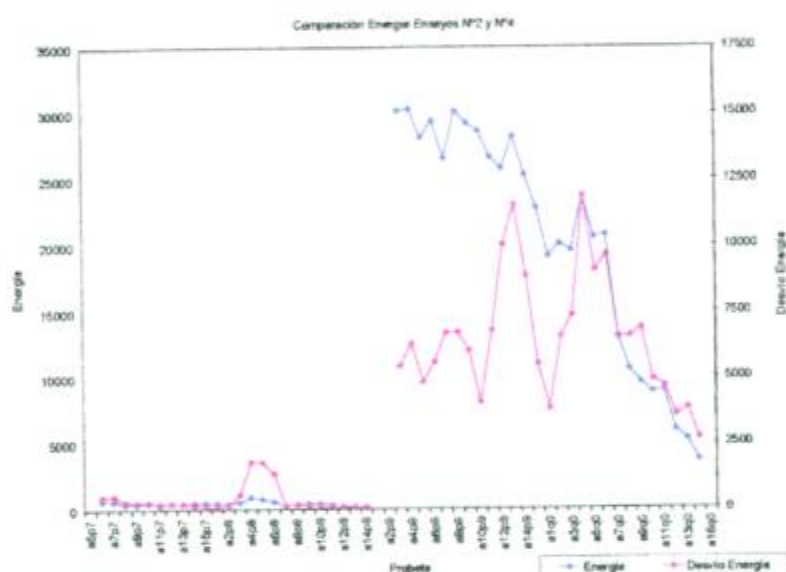


Fig. 43 Evolución Energía (promedio y desvío) ensayos nº 2 y nº 4

En el ensayo nº 5 se ve un aumento en el valor de los parámetros: Cuentas, Energía, Amplitud y RMS con respecto al ensayo nº 3. En la figura 44 vemos la evolución de la amplitud en el ensayo nº 3 y la del nº 5. En la figura 45 se ve la evolución de la energía y su desvío. También aquí se ve que el desvío, dentro de su rango de valores, marca más pronunciadamente la presencia del pico que se produce antes de que el inserto quede fuera de servicio. En este caso el valor límite por norma del desgaste del inserto, se encuentra en la parte izquierda del gráfico, es decir la que corresponde al ensayo nº 3. Podemos decir que tanto el promedio como el desvío de los valores de la energía predicen el estado de desgaste para el cual el inserto no trabaja de manera apropiada. En este par de ensayos se repite el fenómeno del par de ensayos anteriores; esto es un aumento en el valor de los parámetros al estar el inserto fuera de norma.

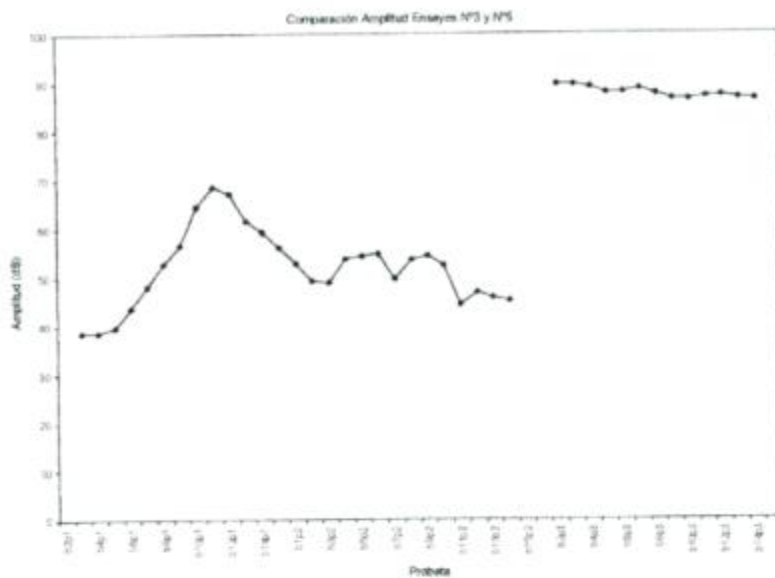


Fig. 44 Evolución Amplitud ensayos nº 3 y nº 5

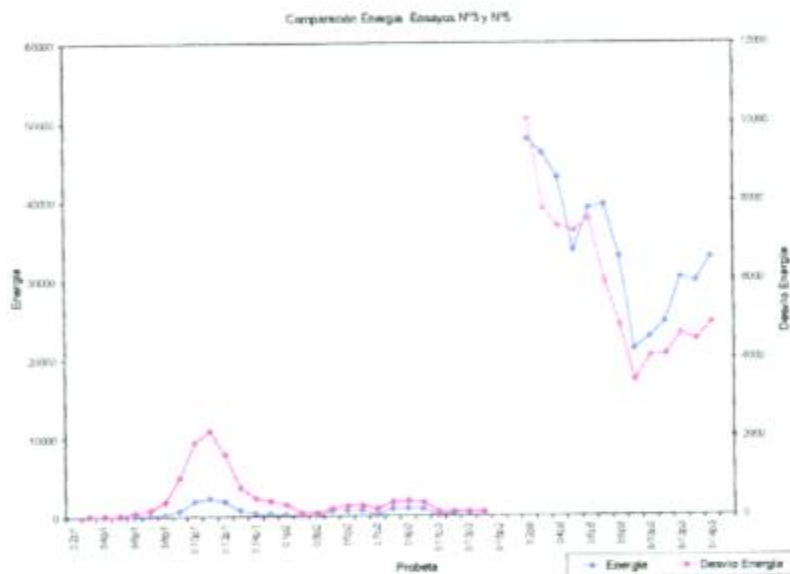


Fig. 45 Evolución Energía (promedio y desvío) ensayos nº 3 y nº 5

A continuación se calculó el coeficiente beta para el ensayo nº 4 y se lo comparó con los valores del ensayo nº 2. Como se ve en la figura 46 no hay variación en el promedio de dicho coeficiente pero sí en la kurtosis donde se notan valores en promedio más altos. El hecho de que los valores promedios del coeficiente sean los mismos en ambos ensayos ratifica que estamos ante un mismo tipo de fenómeno bajo el marco de la teoría de ruido $1/f$, que en este caso corresponde a catástrofes naturales o terremotos ($\beta > 2$). De la misma manera se comparó el coeficiente beta para el ensayo nº 5 con el ensayo nº 3. En la figura 47 se ve que el coeficiente beta tiene un comportamiento igual al de la comparación de los ensayos nº 2 y nº 4 pero no así la kurtosis que, con el inserto desgastado más allá de la norma, no evidencia un incremento sustancial respecto de la primera etapa.

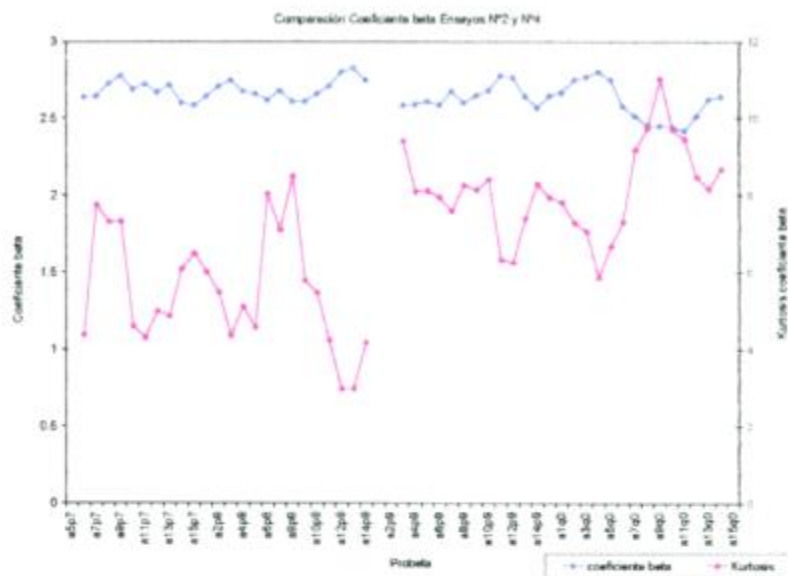


Fig. 46 Evolución coeficiente beta y kurtosis de su distribución para ensayos nº 2 y nº 4

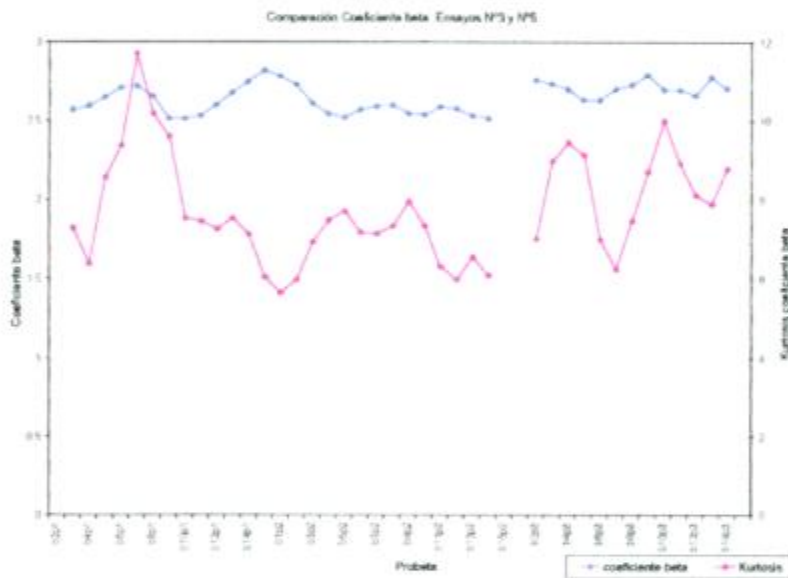


Fig. 47 Evolución coeficiente beta y kurtosis de su distribución para ensayos nº 3 y nº 5

A continuación se calcularon los valores de potencia y entropía de los coeficientes de la transformada WP para el ensayo nº 4 y se los comparó con los del ensayo nº 2. Lo mismo fue realizado para el ensayo nº 5. Como se muestra los dos parámetros aumentan con el inserto fuera de norma y como fue dicho anteriormente ambos parámetros están correlacionados, o sea que marcan la misma tendencia al progresar el desgaste. En la figura 48 y 49 se ve la evolución de los mismos.

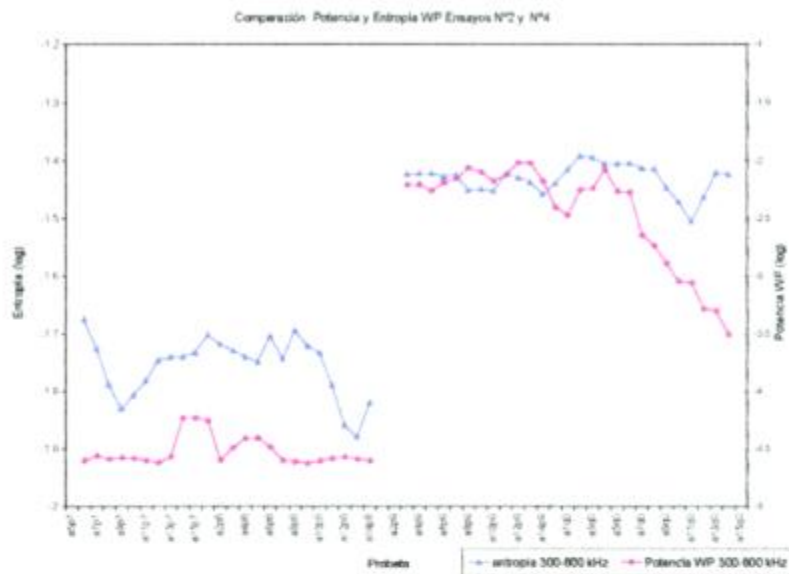


Fig. 48 Evolución Potencia y Entropía coeficientes WP para los ensayos nº 2 y nº 4

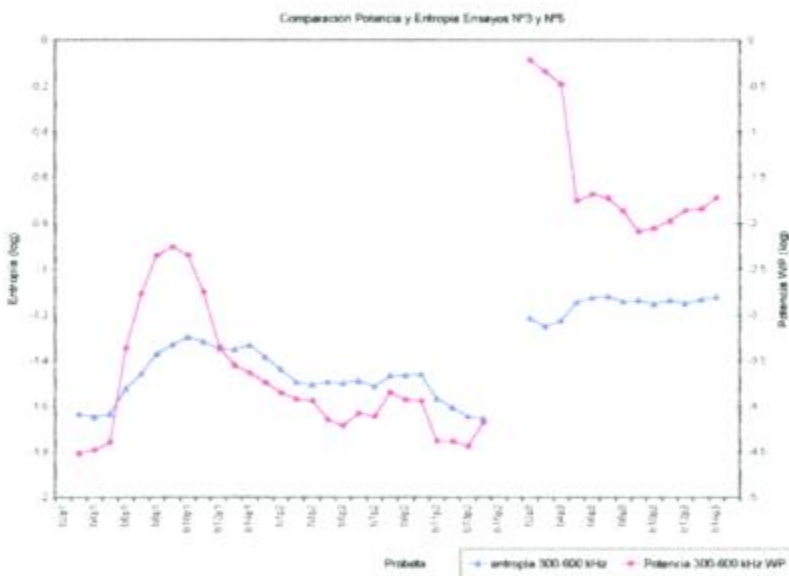


Fig. 49 Evolución Potencia y Entropía coeficientes WP para los ensayos nº 3 y nº 5

Como el desvío de la energía muestra información sobre el desgaste se usó una medida de dispersión que estuviera normalizada. Para ello se empleó el logaritmo del rango reescalado, o sea el rango de los datos sobre el desvío de los mismos. En este caso se empleó el rango y desvío de la potencia de los coeficientes WP en la banda de frecuencia de 300-600 KHz. Este parámetro no nos provee información acerca del estado del inserto pero indica la constancia de un fenómeno como en el caso del parámetro β analizado en 4.5. En las figuras 50 y 51 se muestra la evolución del parámetro junto con la potencia para el par de ensayos nº 2 y nº 4 y el par nº 3 y nº 5 respectivamente.

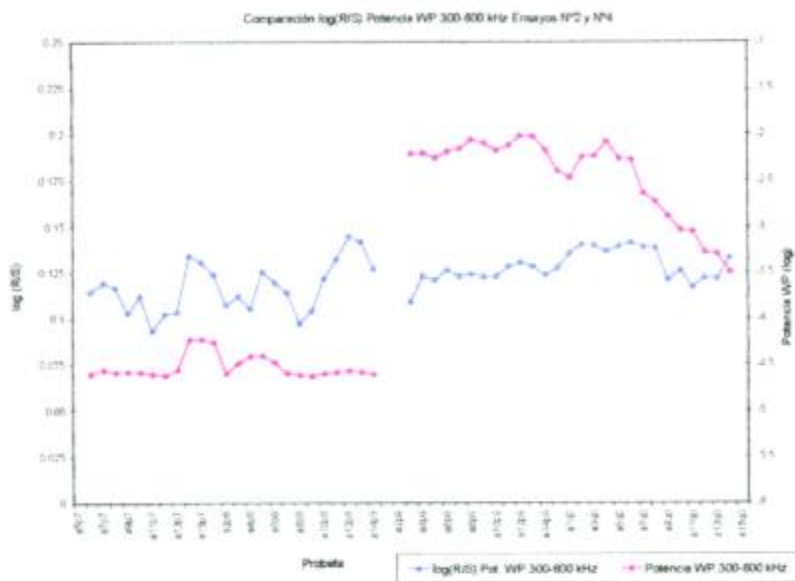


Fig. 50 Evolución $\log(R/S)$ de la Potencia de los coeficientes WP para los ensayos nº 2 y nº 4

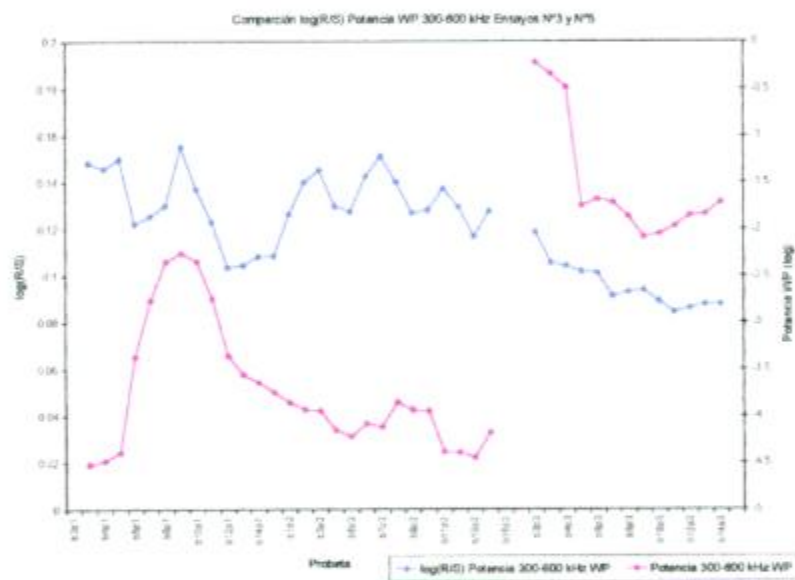


Fig. 51 Evolución $\log(R/S)$ de la Potencia de los coeficientes WP para los ensayos nº 3 y nº 5

De lo expuesto anteriormente se ve la necesidad de llegar al valor del desgaste en el ensayo nº 2. Este ensayo no fue continuado más allá ya que al tener que dar una nueva pasada al lote de probetas la diferencia en la velocidad de corte con respecto a las pasadas anteriores hubiera sido significativa. Es de esperarse que el umbral en los parámetros analizados esté en la zona de los bajos valores ya que puede interpretarse los ensayos como que han traspasado una barrera de energía y luego se produce un cambio en sus valores.

4.8 Análisis del ensayo nº 6

Este ensayo fue realizado para comprobar la repetitividad de lo obtenido en el ensayo nº 3 y es comparable con el mismo. Se empezó con un inserto nuevo sobre el acero SAE 12L14 y se repitieron los valores de la velocidad de alimentación y profundidad de pasada.

En cuanto a la evolución de los parámetros se ve un crecimiento en las Cuentas y Rise time, que se puede corresponder la primer etapa del ensayo nº 3. La amplitud, energía y RMS

muestran un comportamiento similar al ensayo nº 3: un crecimiento inicial y luego la primer etapa en el descenso de las curvas. Sin embargo los valores del ensayo nº 6 son mayores a los del nº 3. El único cambio en las condiciones experimentales fue el de la velocidad de corte que es menor en el ensayo nº 6, esperándose valores inferiores de los parámetros relacionados a la potencia (energía, RMS, amplitud). En las figuras 51 y 52 vemos la evolución de la amplitud y energía.

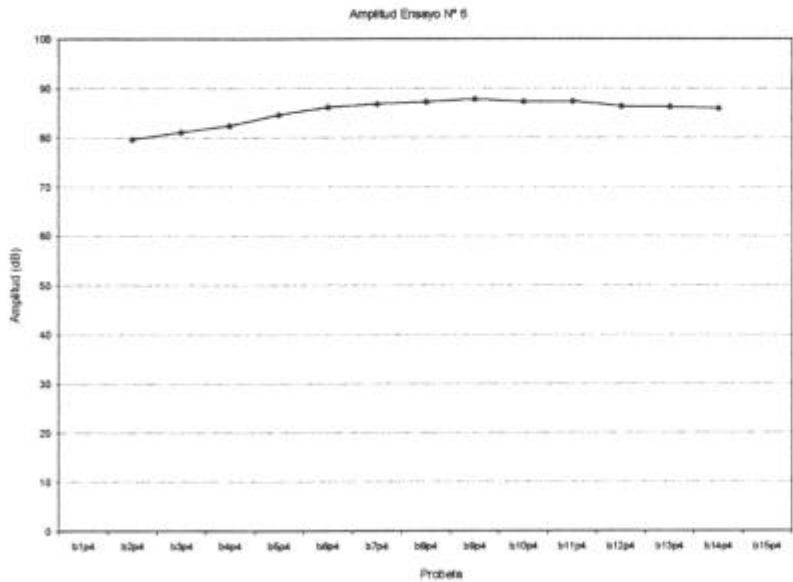


Fig. 51 Evolución Amplitud para ensayo nº 6

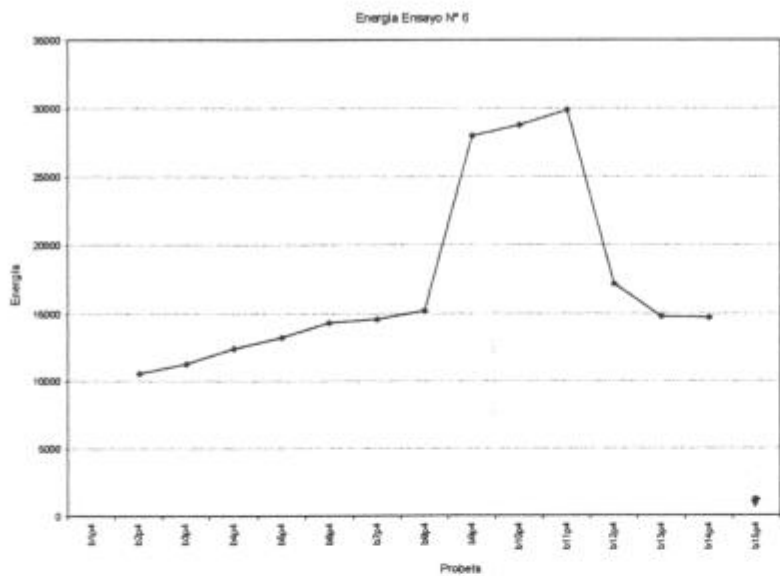


Fig. 52 Evolución Energía para ensayo nº 6

Si siguiendo el orden de los análisis anteriores se comparó la evolución del coeficiente beta y la kurtosis de su distribución entre los ensayos nº 3 y nº 6. En la figura 53 se muestra la evolución del coeficiente beta que toma valores similares en ambos ensayos, mostrando un comportamiento más estable en el ensayo nº 6. Como se ha dicho anteriormente este hecho es indicativo de que bajo la teoría de ruido $1/f$ estamos en los dos casos frente a un fenómeno de catástrofes naturales. En cuanto a la kurtosis el comportamiento visto en el ensayo nº3 no se hace evidente en el ensayo nº 6 (fig. 53).

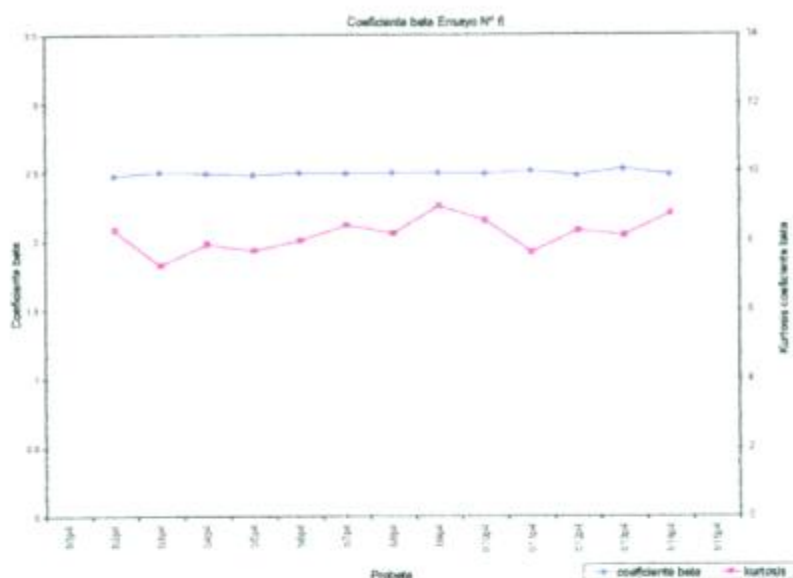


Fig. 53 Evolución del coeficiente beta y kurtosis de su distribución para el ensayo nº 6

Se compararon las curvas de potencia de los coeficientes WP en la banda de 300-600 kHz para los ensayos nº 3 y nº 6. El pico de potencia aparece en un desgaste menor en el ensayo nº 6 y con un valor mayor que el del ensayo nº 3 pero la formas de la curva se asemejan (fig. 54). También la entropía presenta un pico en correspondencia con el pico de la potencia en el ensayo nº 6 y repite el comportamiento de la potencia (fig. 54).

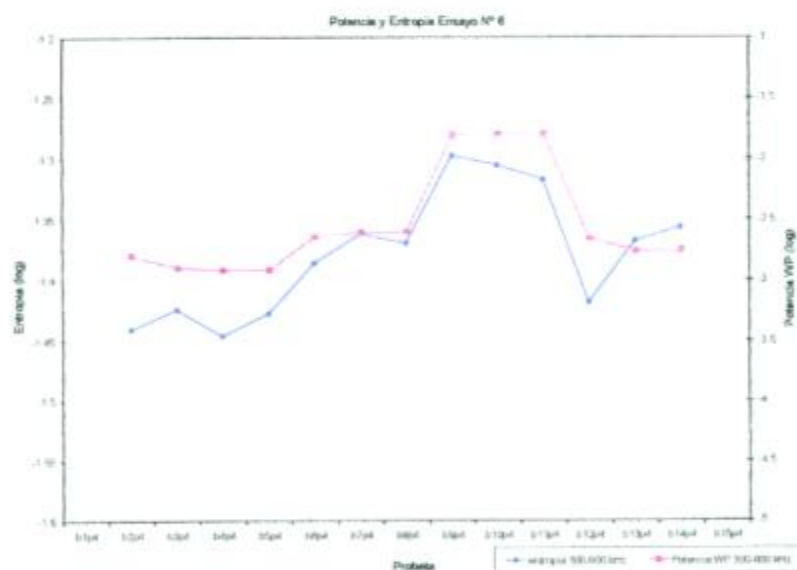


Fig. 54 Evolución Potencia y Entropía coeficientes WP banda 300-600 kHz para el ensayo nº6

Referencias

1. Y. M. Niu, Y. S. Wong, G. S. Hong, T. I. Liu, "Multicategory classification of tool conditions using wavelet packets and ART2 network", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 120, 1998
2. C. R. Heiple, S. H. Carpenter, D. L. Armentrout, A. M^c Manigle, "Origin of Acoustic Emission produced during single point machining", Materials Evaluation, Vol. 52, 590-596, 1994

3. R. Piotrkowski, G. A. Hirchoren, M. P. Gómez, C. E. D'Attellis, J. E. Ruzzante, "Acoustic emission signals from a coating breakdown, $1/f$ processes and wavelet analysis", Primer Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, Buenos Aires, Argentina, 6-10 de Septiembre de 1999
4. T. Pérez Gallego, J. Masetro, E. Serrano, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante, "Characteristic parameters from acoustic emission signals in wear of cutting tools", "15th World Conference on Non-Destructive Testing", Roma, Italia, 15-21 de Octubre de 2000
5. Shie Qian, Dapang Chen, "Joint time-frequency analysis", IEEE Signal Processing Magazine, pp. 52-67, Marzo 1999
6. Carlos D'Attellis, Marta T. Anaya, María I. Cavallaro, Francisco F. Villaverde, "Introducción a las onditas", Nueva Librería, p. 21, 1995
7. Hiroaki Suzuki, Tetsuo Kinjo, Yasuhisa Hayashi, Mikio Takemoto y Kanji Ono, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals", Journal of Acoustic Emission Vol. 14, N°2, 1996
8. Li Xiaoli, Yuan Zhejun, "Tool wear monitoring with wavelet packet transform-fuzzy clustering method", Wear, Vol. 219, 1998

5. Conclusiones

- Como se ha mostrado en la sección 4.3 los parámetros de EA son indicativos del desgaste del inserto. Dentro de ellos se considera al parámetro Energía y al desvío de su distribución como indicadores efectivos. Al producirse un pico a un valor intermedio de desgaste se presenta un cambio en otros parámetros como rise time, cuentas, duración y amplitud, por lo que éstos pueden ser usados en combinación con la energía. La desventaja de estos parámetros es que son sensibles a las condiciones operativas del mecanizado. Esta razón hace necesario el desarrollo o implementación de técnicas de análisis de señales que permitan extraer parámetros independientes de dichas condiciones. Una manera de incrementar su potencialidad como indicadores es intentar una normalización de sus valores teniendo asimismo en cuenta las condiciones operativas del mecanizado.
- El coeficiente β calculado en el marco de la teoría de ruido $1/f$ y a partir del espectro de potencia muestra que se está en presencia de un mismo tipo de fenómeno en todos los ensayos; siguiendo esta teoría este proceso de desgaste corresponde a la categoría de los fenómenos de catástrofes naturales como terremotos o bien fallas graves en equipos. Los valores de β oscilan en todos los ensayos entre 2.5 y 3 sin una tendencia marcada, por lo cual no puede establecerse un valor umbral para discernir entre los estados del inserto. La curva de la evolución de la kurtosis de la distribución del coeficiente β muestra una morfología similar al parámetro energía pero desplazada en el tiempo. Este parámetro puede reforzar la indicación de la energía. Este comportamiento deberá ser explicado en investigaciones futuras. Estos análisis y resultados no fueron encontrados en la bibliografía consultada.
- El logaritmo del rango reescalado ($\log(R/S)$) indica, como el coeficiente β , la constancia de un fenómeno pero no sirve como parámetro indicador del desgaste.
- La potencia calculada con los coeficientes de la transformada Wavelet Packet en el rango de frecuencias de 300 kHz a 600 kHz puede ser considerada un buen indicador del estado de la herramienta. Su evolución con respecto al desgaste muestra una morfología similar entre ensayos pero los valores de pico y mínimos difieren entre ensayos. Se ha mostrado un posible camino de normalización de estas curvas para hacer valedero este parámetro a un conjunto más amplio de condiciones de mecanizado. Otro camino posible es que este indicador alimente las entradas de herramientas matemáticas como son las redes neuronales y los algoritmos de lógica difusa. En este trabajo se analizó con mayor detalle la inestabilidad que ocurre en este parámetro así como en la energía, amplitud, cuentas, rise time y duración en las etapas medias del desgaste, fenómeno que no ha sido estudiado en profundidad previamente en la bibliografía consultada. Se recomienda un estudio más exhaustivo de esta etapa del desgaste.
- La entropía de los coeficientes de la transformada Wavelet Packet en el rango de frecuencias de 300 kHz a 600 kHz refuerza como indicador el resultado obtenido de la potencia calculada con los coeficientes WP en el rango de frecuencias de 300 kHz a 600 kHz. Sin embargo su variación en los valores no es tan pronunciada ni marcada como en el caso de la potencia. No fueron encontrados en la literatura análisis con la entropía de los coeficientes de la transformada de WP, sólo ha sido utilizada para obtener árboles óptimos.

Agradecimientos

Dr. José Ruzzante
Dra. Rosa Piotrkowski
Por la dirección de la tesis.

Dra. M. I. López Pumarega
Lic. Martín Gutiérrez
Lic. M. Elisa Olivetto
Sra. María Armeite
Por el acompañamiento académico, profesional y también emocional brindado.

Sr. Ernesto Alonso
Sr. Alejandro Bozzano
Por la solicitud demostrada en los trabajos de taller.

Sr. Ricardo Montero
Sr. Ramón Castillo Guerra
Por la ayuda y guía dada en los trabajos de metalografía.

Sra. Adriana Domínguez
Sra. Sara Novas
Por la disposición en la operación del MEB.

Sr. Oscar Carpinetta
Por la realización de los ensayos de dureza.

Grupo de Optica y Láser – IAMEND – ENDE – CAC
Por uso de instalaciones y préstamo rugosímetro.

Dra. Alicia Sarce
Dr. Manuel Iribarren
Por el constante entusiasmo transmitido.

Ing. Daniel Martínez (INTI)
Por el préstamo de la Norma ISO 3685.

ANEXO 1

Curva de sensibilidad del sensor utilizado en los ensayos

ANEXO 2

Parámetros característicos de los ensayos

Día	Hora	Probeta	Pasada	Archivo	n (rpm)	Diam. externo (mm)	Velocidad corte (m/min)	Desgaste			Comentario	Rugosidad		Cant. de Eventos	Cant. formas de onda extraídas
								VB (mm)	Cráter (mm)	Otra		Ra (μ m)	Rq (μ m)		
30-May	15:00	A9	1	a9p1	1000	41,7	131,0044			0,27 ataque		4,9	5,7	170	170
30-May	15:15	A10	1	a10p1	1000	41,7	131,0044	0,08				5	5,9	169	169
30-May	15:45	A11	1	a11p1	1000	41,7	131,0044	0,1				4,8	5,6	150	150
30-May	16:00	A12	1	a12p1	1000	41,7	131,0044	0,12				6	7,3	153	119
30-May	16:30	A13	1	a13p1	1000	41,7	131,0044	0,18				5,4	6,8	175	175
30-May	16:50	A14	1	a14p1	1000	41,7	131,0044	0,19				5,8	6,7	163	163
31-May	09:40	A15	1	a15p1	1000	41,7	131,0044	0,2				5,5	6,6	166	166
31-May	09:53	A1	2	a1p2	1000	41,2	129,4336	0,22				5	6,2	150	150
31-May	10:05	A2	2	a2p2	1000	41,2	129,4336	0,23				5,7	7,2	161	161
31-May	10:18	A3	2	a3p2	1000	41,2	129,4336	0,24			(1)	6	7,6	157	157
31-May	10:33	A4	2	a4p2	1000	41,2	129,4336	0,24			(2)	6,5	7,9	136	136
31-May	10:50	A5	2	a5p2	1000	41,2	129,4336	0,25			(3)	5,8	7,3	170	170
31-May	11:05	A6	2	a6p2	1000	41,2	129,4336	0,26				6,5	7,5	160	160
31-May	11:20	A7	2	a7p2	1000	41,2	129,4336	0,27				6,2	7,6	160	160
31-May	11:33	A8	2	a8p2	1000	41,2	129,4336	0,29			(4)	6,4	7,8	158	158
01-Jun	14:00	A9	2	a9p2	1000	41,2	129,4336	0,29				5,9	7,4	160	160
01-Jun	14:15	A10	2	a10p2	1000	41,2	129,4336	0,3				6,5	7,9	163	163
01-Jun	14:25	A11	2	a11p2	1000	41,2	129,4336	0,31				6,3	8,3	153	153
01-Jun	14:38	A12	2	a12p2	1000	41,2	129,4336	0,31				6,9	8,9	213	188
01-Jun	14:51	A14	2	a14p2	1000	41,2	129,4336	0,31				6,8	8,8	150	150
01-Jun	15:06	A13	2	a13p2	1000	41,2	129,4336	0,31				7	9,3	162	162
01-Jun	15:22	A15	2	a15p2	1000	41,2	129,4336	0,32				7	9,3	159	159
01-Jun	15:35	A1	3	a1p3	1000	40,7	127,8628	0,32				7	9,3	156	156
01-Jun	15:45	A2	3	a2p3	1000	40,9	128,4911	0,33				6,7	8,8	156	156
01-Jun	16:00	A3	3	a3p3	1000	40,8	128,177	0,34				8,2	10,5	150	150
01-Jun	16:10	A4	3	a4p3	1000	40,9	128,4911	0,34				6,8	8,9	153	152
01-Jun	16:15	A5	3	a5p3	1000	40,8	128,177	0,36				6,9	9	159	159
01-Jun	16:25	A6	3	a6p3	1000	40,8	128,177	0,37				7,5	9,7	160	160
01-Jun	16:35	A7	3	a7p3	1000	40,8	128,177	0,38				7,7	10,1	160	160
01-Jun	16:50	A8	3	a8p3	1000	40,7	127,8628	0,38				6,6	8,3	169	169
02-Jun	14:00	A9	3	a9p3	1000	40,8	128,177	0,39				7,3	9,6	165	165
02-Jun	14:10	A10	3	a10p3	1000	40,9	128,4911	0,39			(5)	6,7	8,8	155	155
02-Jun	14:45	A11	3	a11p3	1000	40,7	127,8628	0,4				5,8	8,1	162	162
02-Jun	14:55	A12	3	a12p3	1000	40,8	128,177	0,41				6,9	9,3	148	148

Día	Hora	Probeta	Pasada	Archivo	n (rpm)	Diam. externo (mm)	Velocidad corte (m/min)	Desgaste			Comentario	Rugosidad		Cant. de Eventos	Cant. formas de onda extraídas
								VB (mm)	Cráter (mm)	Otra		Ra (µm)	Rq (µm)		
02-Jun	15:05	A13		3 a13p3	1000	40,9	128,4911	0,42				7,9	10,4	148	148
02-Jun	15:35	A14		3 a14p3	1000	40,9	128,4911	0,42				7,7	10,5	148	148
02-Jun	15:44	A15		3 a15p3	1000	40,9	128,4911	0,43				6,9	9,3	165	165
02-Jun	15:55	A1		4 a1p4	1000	40,4	126,9203	0,43				6,7	9	175	175
02-Jun	16:05	A2		4 a2p4	1000	40,5	127,2345	0,44				6,2	8,7	168	168
07-Jun	11:00	A3		4 a3p4	1000	40,5	127,2345	0,45				8,2	11,2	159	159
07-Jun	14:40	A4		4 a4p4	1000	40,5	127,2345	0,45				9,4	12,1	165	165
07-Jun	15:00	A5		4 a5p4	1000	40,5	127,2345	0,45				9	11,9	149	149
08-Jun	08:30	A6		4 a6p4	1000	40,5	127,2345	0,46				9,4	12,1	171	139
08-Jun	08:40	A7		4 a7p4	1000	40,5	127,2345	0,46				8,8	11,7	166	166
08-Jun	08:50	A8		4 a8p4	1000	40,5	127,2345	0,47				7,9	10,5	168	168
08-Jun	08:55	A9		4 a9p4	1000	40,4	126,9203	0,48				8,1	11	165	165
08-Jun	09:05	A10		4 a10p4	1000	40,5	127,2345	0,48			(6)	8,6	11,5	103	101
08-Jun	09:10	A11		4 a11p4	1000	40,3	126,6062	0,48				7,9	10,4	159	159
08-Jun	09:20	A12		4 a12p4	1000	40,4	126,9203	0,48				9,2	11,8	157	157
08-Jun	09:30	A13		4 a13p4	1000	40,5	127,2345	0,49				9,7	12,3	162	162
08-Jun	09:40	A14		4 a14p4	1000	40,5	127,2345	0,49			(7)	8,5	10,1	273	234
08-Jun	13:20	A15		4 a15p4	1000	40,5	127,2345	0,49				8,8	11,3	157	157
08-Jun	13:30	A1		5 a1p5	1000	40,2	126,292	0,49			(8)	8,7	11,7	907	489
08-Jun	13:45	A2		5 a2p5	1000	40,3	126,6062	0,5				9,2	12,1	669	347
12-Jun	09:00	A3		5 a3p5	1000	40,2	126,292	0,5				9,3	12,3	170	131
12-Jun	09:10	A4		5 a4p5	1000	40,3	126,6062	0,5				9,6	12,6	167	167
12-Jun	09:20	A5		5 a5p5	1000	40,1	125,9779	0,51				8,5	11	255	247
12-Jun	09:30	A6		5 a6p5	1000	40,2	126,292	0,51			(9)	8,9	12	172	172
12-Jun	09:37	A7		5 a7p5	1000	40,1	125,9779	0,52				8,9	11,5	167	167
12-Jun	09:45	A8		5 a8p5	1000	40,2	126,292	0,52				8,7	11,7	397	271
12-Jun	09:55	A9		5 a9p5	1000	40,1	125,9779	0,52				8,9	11,6	451	290
12-Jun	10:03	A10		5 a10p5	1000	40,3	126,6062	0,52				9,1	12	449	288
12-Jun	10:10	A11		5 a11p5	1000	40	125,6637	0,52				9	11,7	164	164
12-Jun	10:18	A12		5 a12p5	1000	40,2	126,292	0,53				10	13,1	160	128
12-Jun	10:35	A13		5 a13p5	1000	40,3	126,6062	0,53				10,5	13,5	172	172
12-Jun	11:10	A14		5 a14p5	1000	40,2	126,292	0,53				9,3	12,3	168	126
12-Jun	11:28	A15		5 a15p5	1000	40,2	126,292	0,55				9,7	12,7	237	159
12-Jun	14:00	A1		6 a1p6	1000	39,8	125,0354	0,56				8,5	11,4	506	363

Dia	Hora	Probeta	Pasada	Archivo	n (rpm)	Diam. externo (mm)	Velocidad corte (m/min)	Desgaste			Comentario	Rugosidad		Cant. de Eventos	Cant. formas de onda extraídas
								VB (mm)	Cráter (mm)	Otra		Ra (µm)	Rq (µm)		
12-Jun	14:30	A2		6 a2p6	1000	39,9	125,3495	0,57				8,7	11,9	1298	483
13-Jun	09:55	A3		6 a3p6	1000	39,7	124,7212	0,57				10,3	13,3	179	177
13-Jun	10:15	A4		6 a4p6	1000	40	125,6637	0,57				9	12,3	190	190
13-Jun	10:30	A5		6 a5p6	1000	39,9	125,3495	0,57				10,2	13,4	581	338
13-Jun	10:35	A6		6 a6p6	1000	39,9	125,3495	0,57				9,7	12,7	301	245
13-Jun	10:40	A7		6 a7p6	1000	39,8	125,0354	0,58				9,1	12,3	1666	443
13-Jun	11:05	A8		6 a8p6	1000	39,9	125,3495	0,58				9,5	12,5	209	192
13-Jun	11:15	A9		6 a9p6	1000	39,8	125,0354	0,58				9,9	13,2	534	346
13-Jun	11:25	A10		6 a10p6	1000	40	125,6637	0,59				9,9	13	752	353
13-Jun	13:30	A11		6 a11p7	1000	39,7	124,7212	0,6			(10)	10,9	14	288	192
13-Jun	13:40	A12		6 a12p6	1000	39,8	125,0354	0,6				10,6	13,7	557	273
13-Jun	13:50	A13		6 a13p6	1000	39,7	124,7212	0,6				9,5	12,6	483	259
13-Jun	14:00	A14		6 a14p6	1000	39,8	125,0354	0,61				9,6	13,2	852	283
13-Jun	14:10	A15		6 a15p6	1000	39,9	125,3495	0,61				10	12,8	156	156

- (1) Se empezó a torneear a los 22"
(2), (3), (4) , (7), (8) Se empezó tarde a torneear
(10) Se atrasó en dar start
(5) Se empezó a los 17 segundos
(6) Se apretó pause y el sistema se detuvo en la adquisición de datos. Se desajustó el calibre de la profundidad de pasada del torno
(9) empezó a los 7 segundos a torneear

Dia	Hora	Probeta	Pasada	Archivo	n (rpm)	Diam. externo (mm)	Velocidad corte (m/min)	Desgaste			Comentario	Rugosidad		Cant. de Eventos	Cant. formas de onda extraídas
								VB (mm)	Crátel (mm)	Otra		Ra (µm)	Rq (µm)		
15-Jun	14:45	A2		7 a2p7	1000	39,5	124,0929	0,04			torno4	2,3	2,7	---	---
15-Jun	14:55	A3		7 a3p7	1000	39,4	123,7788	0,08			torno2	2,3	2,9	---	---
15-Jun	15:05	A4		7 a4p7	1000	39,6	124,4071	0,1			(1) torno5	2,8	3,3	---	---
16-Jun	15:35	A5		7 a5p7	1000	39,4	123,7788	0,11			torno2	3,5	4,2	322	322
16-Jun	15:40	A6		7 a6p7	1000	39,4	123,7788	0,12			(2)	3,4	4,3	311	311
16-Jun	15:45	A7		7 a7p7	1000	39,2	123,1504	0,13				3,6	4,6	315	315
16-Jun	15:50	A8		7 a8p7	1000	39,5	124,0929	0,13				3,8	4,8	401	386
16-Jun	16:05	A9		7 a9p7	1000	39,4	123,7788	0,13			(3)	3,8	4,7	360	360
16-Jun	16:15	A10		7 a10p7	1000	39,6	124,4071	0,14				4	5	306	306
16-Jun	16:25	A11		7 a11p7	1000	39,4	123,7788	0,14				3,7	4,8	328	328
20-Jun	09:15	A12		7 a12p7	1000	39,5	124,0929	0,15				4,5	5,7	14	14
20-Jun	09:25	A13		7 a13p7	1000	39,7	124,7212	0,15				5	6,1	310	310
20-Jun	09:35	A14		7 a14p7	1000	39,5	124,0929	0,15				4,7	6,2	309	309
20-Jun	09:45	A15		7 a15p7	1000	39,6	124,4071	0,16				4,9	6,1	312	304
20-Jun	10:00	A1		8 a1p8	1000	37,7	118,438	0,16				5	6,7	307	274
20-Jun	14:30	A2		8 a2p8	1000	37,5	117,8097	0,16				4,9	6,4	366	300
20-Jun	14:46	A3		8 a3p8	1000	37,3	117,1814	0,18			(4)	5,1	6,8	316	276
20-Jun	15:00	A4		8 a4p8	1000	37,3	117,1814	0,18			(5)	4,5	6,1	378	316
20-Jun	15:43	A5		8 a5p8	1000	37,4	117,4956	0,19				4,3	5,5	372	365
20-Jun	16:00	A6		8 a6p8	1000	37,3	117,1814	0,19				4,4	5,8	6474	832
20-Jun	16:07	A7		8 a7p8	1000	37,1	116,5531	0,2				5,1	6,7	352	299
21-Jun	10:00	A8		8 a8p8	1000	37,4	117,4956	0,2				4,5	6	394	364
21-Jun	10:15	A9		8 a9p8	1000	37,4	117,4956	0,2			(6)	4,4	6,1	334	291
21-Jun	10:30	A10		8 a10p8	1000	37,5	117,8097	0,21				4,9	6,5	320	319
21-Jun	10:40	A11		8 a11p8	1000	37,3	117,1814	0,21				4,9	6,6	347	299
21-Jun	10:50	A12		8 a12p8	1000	37,3	117,1814	0,22				5	6,6	472	450
21-Jun	11:00	A13		8 a13p8	1000	37,4	117,4956	0,22			(7)	5,1	6,7	2195	750
21-Jun	11:10	A14		8 a14p8	1000	37,4	117,4956	0,22				4,1	6,9	4849	992
21-Jun	11:20	A15		8 a15p8	1000	37,5	117,8097	0,23				5,5	7,1	317	317

torno4, torno2, torno5 son los nombres de los archivos *.INI usados en cada caso. En los 3 primeros ensayos se desconectó el sensor portaherramienta por eso se creyó en principio, como era un material nuevo, cambiar el umbral y de ahí los 3 archivos con distinto valor de umbral

(1) De los 35" a 1'22" se metió viruta en la probeta que paró al carro.

(2) Quedaron 2 cm. de probeta sin hacer al final

(3) Se desajustó el calibre de la profundidad de pasada cuando se juntó viruta y dio menor profundidad en los últimos 7 cm. de corte

(4) Faltó tornear 1 cm. parte final

(5) Se empezó a registrar a los 20"

(6) Se dio tarde el start. A la mitad de la probeta se desajustó la profundidad de pasada, reduciéndose su valor

(7) Se dio tarde el start.

Día	Hora	Probeta	Pasada	Archivo	n (rpm)	Diam. externo (mm)	Velocidad corte (m/min)	Desgaste			Comentario	Rugosidad		Cant. de Eventos	Cant. formas de onda extraídas
								VB (mm)	Cráter (mm)	Otra		Ra (µm)	Rq (µm)		
13-Jun	15:00	B2	1	b2p1	1500	38	179,07	0,11		0,175 máx		2,3	2,7	3186	657
13-Jun	15:30	B3	1	b3p1	1500	38	179,07	0,12		0,175		2,4	2,8	2311	544
13-Jun	15:55	B4	1	b4p1	1500	38	179,07	0,125		0,175	(1)	2,9	3,4	1049	674
13-Jun	16:10	B5	1	b5p1	1500	38	179,07	0,145		0,225		2,7	3,2	1268	665
13-Jun	16:15	B6	1	b6p1	1500	38	179,07	0,15		—		2,7	3,2	1328	646
13-Jun	16:20	B7	1	b7p1	1500	38	179,07	0,155		—		2,6	3,1	1577	402
13-Jun	16:40	B8	1	b8p1	1500	38	179,07	0,155		—		2,8	3,3	1801	660
14-Jun	11:10	B9	1	b9p1	1500	38	179,07	0,155				2,8	3,3	1513	578
14-Jun	11:20	B10	1	b10p1	1500	38	179,07	0,165		0,24		2,7	3,2	630	515
14-Jun	11:32	B11	1	b11p1	1500	38,1	179,54	0,175		0,26		2,6	3,2	289	289
14-Jun	11:40	B12	1	b12p1	1500	38	179,07	0,19		0,27		3,2	3,8	393	392
14-Jun	14:45	B13	1	b13p1	1500	38	179,07	0,2		0,27		3,3	4	1939	557
14-Jun	15:00	B14	1	b14p1	1500	38	179,07	0,21		0,275		3,3	4	1934	729
14-Jun	15:10	B15	1	b15p1	1500	38	179,07	0,22		0,28		3,2	3,9	594	437
14-Jun	15:20	B1	2	b1p2	1500	35,6	167,76	0,225		0,29		3,1	4,3	4033	547
14-Jun	15:40	B2	2	b2p2	1500	35,6	167,76	0,245		0,3		4	4,8	3435	692
14-Jun	15:50	B3	2	b3p2	1500	35,6	167,76	0,25		0,3		4,1	5	2557	546
14-Jun	16:05	B4	2	b4p2	1500	35,6	167,76	0,255		0,305		3,4	4,5	3073	687
15-Jun	10:10	B5	2	b5p2	1500	35,7	168,23	0,265		0,31		4,1	5,3	212	212
15-Jun	10:18	B6	2	b6p2	1500	35,6	167,76	0,27		0,31		3,9	5,1	1023	623
15-Jun	10:35	B7	2	b7p2	1500	35,6	167,76	0,28		0,33		4,5	5,5	1998	536
15-Jun	10:50	B8	2	b8p2	1500	35,6	167,76	0,285		0,33		4,8	5,9	1482	613
15-Jun	11:00	B9	2	b9p2	1500	35,7	168,23	0,295		0,33		4,8	6,2	220	220
15-Jun	11:15	B10	2	b10p2	1500	35,6	167,76	0,3		0,34		4,6	5,7	817	619
15-Jun	11:20	B11	2	b11p2	1500	35,5	167,29	0,315		0,34		4,3	5,5	3373	670
15-Jun	11:33	B12	2	b12p2	1500	35,6	167,76	0,32		0,34		4,4	5,8	3429	656
15-Jun	13:45	B13	2	b13p2	1500	35,7	168,23	0,33		0,34		4,6	6	202	202
15-Jun	13:55	B14	2	b14p2	1500	35	164,93	0,335		0,34		4,3	5,7	3792	502
15-Jun	14:10	B15	2	b15p2	1500	35,5	167,29	0,335		0,34		4,8	5,7	3202	663

(1) Se empezó a los 2"

Día	Hora	Probeta	Pasada	Archivo	n (rpm)	Diam. externo (mm)	Velocidad corte (m/min)	Desgaste			Comentario	Rugosidad		Cant. de Eventos	Cant. formas de onda extraídas
								VB (mm)	Cráter (mm)	Otra		Ra (µm)	Rq (µm)		
04-Sep	18:00	A1		9 a1p9	1000	35,3	110,8982	0,34			(1)	5,3	6,2	---	---
06-Sep	15:11	A2		9 a2p9	1000	37,2	116,8672	0,34				5,6	6,5	297	297
06-Sep	15:20	A3		9 a3p9	1000	37	116,2389	0,34				6,3	7,5	304	304
06-Sep	15:33	A4		9 a4p9	1000	35,2	110,5841	0,34				7,5	8,7	313	308
06-Sep	15:44	A5		9 a5p9	1000	35,1	110,2699	0,35				6,9	8,7	319	319
06-Sep	15:53	A6		9 a6p9	1000	35,2	110,5841	0,35				6,7	8	325	291
06-Sep	16:07	A7		9 a7p9	1000	35,2	110,5841	0,36				7,6	9,1	325	290
06-Sep	16:18	A8		9 a8p9	1000	35,1	110,2699	0,36				7,7	9,3	313	313
07-Sep	09:51	A9		9 a9p9	1000	35,1	110,2699	0,36			(2)	7,5	9,2	301	301
07-Sep	10:05	A10		9 a10p9	1000	35,1	110,2699	0,36				8,7	10,2	323	323
07-Sep	10:14	A11		9 a11p9	1000	35,2	110,5841	0,36				9,2	10,6	315	315
07-Sep	10:23	A12		9 a12p9	1000	35,3	110,8982	0,36			(3)	7,2	8,64	297	268
07-Sep	10:34	A13		9 a13p9	1000	35,3	110,8982	0,37				6,8	8,2	319	319
07-Sep	10:47	A14		9 a14p9	1000	35,3	110,8982	0,37				7,1	8,7	324	324
07-Sep	10:57	A15		9 a15p9	1000	34,9	109,6416	0,37				8,8	9,3	313	313
11-Sep	08:42	A1		10 a1q0	1000	33,4	104,9292	0,37				6,9	8,6	301	301
11-Sep	08:52	A2		10 a2q0	1000	35,3	110,8982	0,37				6,7	8,3	305	305
11-Sep	09:04	A3		10 a3q0	1000	35	109,9557	0,37			(4)	7,6	9,2	308	308
11-Sep	09:13	A4		10 a4q0	1000	33,7	105,8717	0,38				8,8	10	299	299
11-Sep	13:18	A5		10 a5q0	1000	33,4	104,9292	0,38			(5)	8,5	10,4	274	274
11-Sep	13:29	A6		10 a6q0	1000	33,2	104,3009	0,38				7,9	9,9	311	279
11-Sep	13:40	A7		10 a7q0	1000	33,2	104,3009	0,38			(6)	8,5	10,3	319	319
11-Sep	13:52	A8		10 a8q0	1000	33,1	103,9867	0,39				10,1	12,5	317	288
11-Sep	14:09	A9		10 a9q0	1000	33,2	104,3009	0,39				9,7	11,5	307	307
11-Sep	14:18	A10		10 a10q0	1000	33,3	104,615	0,39			(7)	10,5	12,4	319	318
11-Sep	14:29	A11		10 a11q0	1000	33,7	105,8717	0,39				11	13	311	311
11-Sep	14:38	A12		10 a12q0	1000	33,6	105,5575	0,4				10,5	12,7	302	271
11-Sep	14:50	A13		10 a13q0	1000	33,3	104,615	0,4				10,3	12,3	307	297
12-Sep	13:44	A14		10 a14q0	1000	33,6	105,5575	0,4				10,3	12,7	284	284
12-Sep	13:53	A15		10 a15q0	1000	33,4	104,9292	0,41				10,2	12,6	323	323

- (1) No lo grabó porque se conectó el sensor al canal 2 y estaba seteado para el 1
- (2) Se atrasó 3" el start. Al final se enredó mucho la viruta e hizo ruido fuerte más bien grave
- (3) Se enrolló mucho la viruta al final (en general en todas las probetas en dicho momento) a 65" los aproximadamente
- (4) Se trabó la viruta, enredándose toda a lo largo del tubo. No salía en forma pareja
- (5), (7) Se enredó la viruta de la mitad hacia el final del torneado
- (8) Se enredó la viruta al principio del torneado en forma zigzagueante

Día	Hora	Probeta	Pasada	Archivo	n (rpm)	Diam. externo (mm)	Velocidad corte (m/min)	Desgaste			Comentario	Rugosidad		Cant. de Eventos	Cant. formas de onda extraídas
								VB (mm)	Cráter (mm)	Otra		Ra (μ m)	Rq (μ m)		
13-Sep	08:45	B1		3 b1p3	1500	33,2	156,45	0,41			(1)	4,2	4,7	133	133
13-Sep	08:59	B2		3 b2p3	1500	33	155,51	0,41			(2)	4,1	4,9	172	172
13-Sep	09:08	B3		3 b3p3	1500	33,3	156,92	0,41				4,9	5,8	195	195
13-Sep	09:16	B4		3 b4p3	1500	33,2	156,45	0,415			(3)	4,5	5,1	160	128
13-Sep	09:25	B5		3 b5p3	1500	33,3	156,92	0,42				4,5	5,2	178	178
13-Sep	09:34	B6		3 b6p3	1500	33,5	157,87	0,42				4,9	5,7	154	154
13-Sep	09:43	B7		3 b7p3	1500	33,2	156,45	0,43				4,5	5,7	139	139
14-Sep	10:42	B8		3 b8p3	1500	33,3	156,92	0,44				4,7	5,3	183	183
14-Sep	10:51	B9		3 b9p3	1500	32,5	153,15	0,45			(4)	4,8	5,5	210	210
14-Sep	11:00	B10		3 b10p3	1500	33,4	157,39	0,455				5,1	6,1	199	199
14-Sep	11:02	B11		3 b11p3	1500	33,7	158,81	0,46				5	5,6	166	131
14-Sep	11:13	B12		3 b12p3	1500	33,4	157,39	0,46				4,7	5,4	199	167
14-Sep	11:23	B13		3 b13p3	1500	33,4	157,39	0,47				4,9	5,6	178	147
14-Sep	13:57	B14		3 b14p3	1500	33,2	156,45	0,475				4,9	5,7	186	150
14-Sep	14:00	B15		3 b15p3	1500	33,8	159,28	0,49			(5)	4,9	5,6	186	186

- (1) Se inicia ensayo con un desgaste de 0.405 mm
(2) Se descompuso la PC. Se registró pasada desde la quinta parte de la probeta en adelante
(3) Terminar el archivo a los 52"
(4) Se dio antes el start
(5) El registro empieza a los 10"

Día	Hora	Probeta	Pasada	Archivo	n (rpm)	Diam. externo (mm)	Velocidad corte (m/min)	Desgaste			Comentario	Rugosidad		Cant. de Eventos	Cant. formas de onda extraídas
								VB (mm)	Cráter (mm)	Otra		Ra (μ m)	Rq (μ m)		
18-Sep	10:28	B1		4 b1p4	1500	30,9	145,61	0,075				2,6	3,2	201	201
18-Sep	10:29	B2		4 b2p4	1500	30,9	145,61	0,085				2,3	2,9	202	168
18-Sep	10:43	B3		4 b3p4	1500	30,9	145,61	0,09				2,5	3,1	203	170
18-Sep	10:56	B4		4 b4p4	1500	31	146,08	0,095				2,2	3	192	159
18-Sep	11:07	B5		4 b5p4	1500	30,9	145,61	0,105				2,7	3,4	184	184
18-Sep	11:13	B6		4 b6p4	1500	30,8	145,14	0,11				2,5	3,1	192	159
18-Sep	11:22	B7		4 b7p4	1500	30,8	145,14	0,11				3	3,6	197	197
18-Sep	11:29	B8		4 b8p4	1500	31,1	146,56	0,11				3,1	3,7	187	187
18-Sep	11:35	B9		4 b9p4	1500	30,5	143,73	0,115				3,5	4,2	211	180
18-Sep	14:28	B10		4 b10p4	1500	31	146,08	0,115				4,1	4,7	157	123
18-Sep	14:52	B11		4 b11p4	1500	31	146,08	0,115				3,2	3,9	208	178
18-Sep	15:01	B12		4 b12p4	1500	31	146,08	0,12				3,4	4,1	191	191
18-Sep	15:07	B13		4 b13p4	1500	31	146,08	0,125				3	3,6	199	199
18-Sep	15:16	B14		4 b14p4	1500	31	146,08	0,125				3,3	3,9	196	196
18-Sep	15:23	B15		4 b15p4	1500	31,3	147,50	0,125				3,2	3,9	181	181

ANEXO 3

Programas de Matlab


```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%continuo.m%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Programa para clasificar eventos de EA en continuos o
% discontinuos
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cd d:\maradei\ensayo4\al4q0
ensa='Al4q0';
nume=0;
vventana=1000;
vaux=floor(vventana/2);
xautprom=zeros([vventana 1]);
xautmat=zeros([vventana 1]);
xumbral=10;
%calculo autocorrelacion promedio
while nume<296
    nume=nume+1;
    ensayo=strcat(ensa,num2str(nume));
    load (ensayo);
    x=eval(ensayo);
    tamano=size(x);
    vampsign=max(x);
    xcont1=0;
    vtam=size(x);
    vtam1=vtam(1);
    x2=zeros([vtam1 1]);
    for j=1:vventana:vtam(1)-vventana
        xautc=xcorr(x(j:j+vventana-1));
        x2(j:j+vventana-1)=xautc(1+vaux:vventana+vaux);
        %if max(xautc)<vventana/50
            xcont1=xcont1+1;
            xautprom=xautprom + xautc(1+vaux:vventana+vaux);
        %end
    end
    clear (ensayo);
end
xautprom=xautprom/xcont1;
xautmat(:)=xautprom;
save 'xautmat' xautmat
%calculo error autocorrelacion
vventana=1000;
vaux=floor(vventana/2);
xautprom=zeros([vventana 1]);
xautmat=zeros([vventana 1]);
xumbral=10;
load('xautmat');
nume=0;
xpromedio=[];
xerraut=[];
xskew=[];
xtiempo=[];
xkurt=[];
xvarerr=[];
while nume<296
    nume=nume+1;
    ensayo=strcat(ensa,num2str(nume));
    load (ensayo); %Introducir aquí la matriz de la barra a estudiartamano
    =size(ensayo) %Confirma el tamaño
    x=eval(ensayo);
    tamano=size(x);
    vtam1=tamano(1);
    xresta=zeros([vventana 1]);
    x2=zeros([vtam1 1]);

```

```

for j=1:vventana:vtaml-vventana
    xmed=mean(x(j:j+vventana-1));
    xautc=xcorr(x(j:j+vventana-1));
    x2(j:j+vventana-1)=xautc(1+vaux:vventana+vaux);
    xresta=x2(j:j+vventana-1)-xautmat(:);
    xsuma=sum(abs(xresta));
    xpromedio=[xpromedio xmed];
    xvarerr=[xvarerr xsuma/vventana];
    %if xsuma/vventana<xumbral
    xskew=[xskew skewness(x(j:j+vventana-1))];
    xkurt=[xkurt kurtosis(x(j:j+vventana-1))];
    xtiempo=[xtiempo nume+(j+floor(vventana/2))/vtaml];
    %end
end
clear(ensayo);
end
save 'resultar' xpromedio xvarerr xskew xkurt xtiempo;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%mostres.m%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Programa para mostrar resultados del programa
% continuo.m. La clasificación se realiza en forma
% manual.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load 'resultar'
xprom=mean(xvarerr)+3*std(xvarerr);
xprommenos=mean(xvarerr)-3*std(xvarerr);
xproml=[xprom xprom];
xprom2=[xprommenos xprommenos];
vtam=size(xvarerr);
vventana=vtam(2);
plot(xtiempo,xvarerr)
hold on
plot([1 xtiempo(vventana)],xproml,'g')
plot([1 xtiempo(vventana)],xprom2,'g')
hold off
inicio=input('Punto de inicio: ')
vfin= input('Punto final: ')
while inicio>0
    for i=1:vventana
        if xtiempo(i)>inicio
            if i==1
                inicio=1;
            else
                inicio = i-1;
            end
            break
        end
    end
    vfinl=0;
    for i= 1:vventana
        if xtiempo(i)>vfin
            vfinl=1;
            vfin = i-1
            break
        end
    end
    if vfinl==0
        vfin=vventana
    end
    plot(xtiempo(vinicio:vfin),xvarerr(vinicio:vfin))
    hold on
    plot([xtiempo(vinicio) xtiempo(vfin)],xproml,'g')
    plot([xtiempo(vinicio) xtiempo(vfin)],xprom2,'g')
    hold off
    inicio=input('Punto de inicio: ')
    vfin= input('Punto final: ')
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%enerx36.m%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Programa para calcular la potencia mediante coeficientes
% de wavelets packets en el rango de frecuencia de 300 kHz
% a 600 kHz. Los nodos del árbol que están en dicho rango
% figuran en el archivo xnodo.mat.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear
load('d:\maradei\globales\xnodo')
vtamnodo=26;
cd d:\maradei\ensayo4\al3q0
ensa= 'A13q0';
vinicio=4;
vtamano=15360;
vener36=[];
nume=0;
while nume<304
    nume=nume+1;
    ensayo=strcat(ensa,num2str(nume),'wd');
    load (ensayo);
    vtamtree=size(tree_struct);
    vposic=vinicio;
    vcantptos=0;
    venergia=0;
    for i= 1:vtamtree(2)
        vbusca=0;
        for j= 1:vtamnodo
            if tree_struct(1,i)==xnodo(j)
                vbusca=1;
            end
        end
        if vbusca==1
            venergia=venergia+sum(data_struct(vposic:vposic+tree_struct(2,i)-1).^2);
            vcantptos=vcantptos+tree_struct(2,i);
        end
    end
    if vcantptos>0
        venergia=venergia/vcantptos;
    end
    vener36=[vener36 venergia];
    vposic=vposic+tree_struct(2,i);
end
save('vener36','vener36')

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%entropia36.m%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Programa para calcular la entropía de los coeficientes
% de wavelets packets en el rango de frecuencia de 300 kHz
% a 600 kHz. Los nodos del árbol que están en dicho rango
% figuran en el archivo xnodo.mat.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear
load('d:\maradei\globales\xnodo')
vtamnodo=26;
cd d:\maradei\ensayo4\al3q0
ensa= 'A13q0';
vinicio=4;
vtamano=15360;
ventropia36=[];
nume=0;
while nume<304
    nume=nume+1;
    ensayo=strcat(ensa,num2str(nume),'wd');
    load (ensayo);
    vtamtree=size(tree_struct);
    vposic=vinicio;
    vcantptos=0;
    venergia=0;
    vck=[];
    for i= 1:vtamtree(2)
        vbusca=0;
        for j= 1:vtamnodo
            if tree_struct(1,i)==xnodo(j)
                vbusca=1;
            end
        end
        if vbusca==1
            venergia=venergia+sum(data_struct(vposic:vposic+tree_struct(2,i)-1).^2);
            vck=[vck data_struct(vposic:vposic+tree_struct(2,i)-1).^2];
        end
    end
    vck = vck/venergia;
    ventrw=wentropy(vck,'shannon');
    ventropia36=[ventropia36 ventrw];
end
save('ventropia36','ventropia36')

```

ANEXO 4

Salidas de Statgraphics

Comparación ensayos 1 y 2

ensayo 1 = filo 2.2

ensayo 2 = filo 2.4

ANOVA Table for AMP - 2.2 vs. 2.4 by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	2686,68	1	2686,68	43,48	0,0000
Within groups	6425,6	104	61,7846		
Total (Corr.)	9112,27	105			

Since the P-value of the F-test is less than 0,05, there is a statistically significant difference between the mean AMP from one level of filo to another at the 95,0% confidence level.

Table of Means for AMP by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	52,0785	0,868027	50,8614	53,2957
24	24	40,049	1,60448	37,7992	42,2989
Total	106	49,3549			

ANOVA Table for CTA by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	1,53493E9	1	1,53493E9	37,74	0,0000
Within groups	4,22966E9	104	4,06698E7		
Total (Corr.)	5,76459E9	105			

Table of Means for CTA by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	12800,9	704,254	11813,4	13788,4
24	24	3708,39	1301,76	1883,04	5533,74
Total	106	10742,2			

ANOVA Table for DUR by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	3,11804E8	1	3,11804E8	0,05	0,8176
Within groups	6,0647E11	104	5,83144E9		
Total (Corr.)	6,06782E11	105			

Table of Means for DUR by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	200060,0	8432,98	188235,0	211885,0
24	24	195962,0	15587,7	174105,0	217819,0
Total	106	199132,0			

ANOVA Table for ENE by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	3,48351E7	1	3,48351E7	8,16	0,0052
Within groups	4,43803E8	104	4,26733E6		
Total (Corr.)	4,78638E8	105			

Table of Means for ENE by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	1825,0	228,124	1505,12	2144,88
24	24	455,23	421,67	-136,045	1046,5
Total	106	1514,87			

ANOVA Table for HR by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	533,201	1	533,201	4,16	0,0439
Within groups	13331,0	104	128,183		
Total (Corr.)	13864,3	105			

Table of Means for HR by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	6,62887	1,25028	4,87569	8,38204
24	24	11,9879	2,31105	8,74728	15,2285
Total	106	7,84223			

ANOVA Table for RMS by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,000665787	1	0,000665787	12,61	0,0006
Within groups	0,00549251	104	0,0000528126		
Total (Corr.)	0,0061583	105			

Table of Means for RMS by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	0,00660435	0,000802531	0,00547902	0,00772968
24	24	0,000615987	0,00148342	-0,00146409	0,00269607
Total	106	0,0052485			

ANOVA Table for RT by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	102713,0	1	102713,0	19,25	0,0000
Within groups	555005,0	104	5336,58		
Total (Corr.)	,657718,0	105			

Table of Means for RT by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	241,032	8,06723	229,72	252,344
24	24	166,652	14,9117	145,743	187,562
Total	106	224,191			

Comparación ensayos 1 y 3

ensayo 1 = filo 2.2
ensayo 3 = filo 3.1

ANOVA Table for AMP - 2.2 vs. 3.1 by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	21,5909	1	21,5909	0,26	0,6086
Within groups	8923,03	109	81,8626		
Total (Corr.)	8944,62	110			

Table of Means for AMP by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	52,0785	0,999162	50,6782	53,4788
31	29	51,0746	1,68013	48,72	53,4293
Total	111	51,8163			

ANOVA Table for CTA by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	2,57407E9	1	2,57407E9	64,52	0,0000
Within groups	4,34858E9	109	3,98952E7		
Total (Corr.)	6,92264E9	110			

Table of Means for CTA by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	12800,9	697,515	11823,4	13778,5
31	29	1839,54	1172,9	195,758	3483,32
Total	111	9937,14			

ANOVA Table for DUR by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	4,82843E11	1	4,82843E11	82,92	0,0000
Within groups	6,34732E11	109	5,82323E9		

Total (Corr.) 1,11758E12 110

Table of Means for DUR by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	200060,0	8427,04	188250,0	211870,0
31	29	49933,2	14170,4	30073,8	69792,5
Total	111	160838,0			

ANOVA Table for ENE by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	3,57901E7	1	3,57901E7	8,38	0,0046
Within groups	4,65368E8	109	4,26943E6		
Total (Corr.)	5,01158E8	110			

Table of Means for ENE by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	1825,0	228,18	1505,22	2144,79
31	29	532,483	383,695	-5,25149	1070,22
Total	111	1487,32			

ANOVA Table for HR by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	17389,5	1	17389,5	103,49	0,0000
Within groups	18316,1	109	168,038		
Total (Corr.)	35705,6	110			

Table of Means for HR by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	6,62887	1,43152	4,62265	8,63509
31	29	35,1193	2,40716	31,7457	38,4928
Total	111	14,0723			

ANOVA Table for RMS by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,0000317028	1	0,0000317028	0,43	0,5130
Within groups	0,00802204	109	0,0000735967		
Total (Corr.)	0,00805374	110			

Table of Means for RMS by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	0,00660435	0,000947376	0,00527664	0,00793207
31	29	0,00782083	0,00159305	0,00558822	0,0100534
Total	111	0,00692217			

ANOVA Table for RT by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	5032,52	1	5032,52	0,64	0,4240
Within groups	851698,0	109	7813,74		
Total (Corr.)	856730,0	110			

Table of Means for RT by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	241,032	9,76163	227,351	254,712
31	29	256,358	16,4146	233,354	279,363
Total	111	245,036			

Comparación entre ensayos 2 y 3

ensayo 2 = filo 2.4

ensayo 3 = filo 3.1

ANOVA Table for AMP - 2.4 vs 3.1 by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	1596,39	1	1596,39	23,91	0,0000
Within groups	3405,14	51	66,7675		
Total (Corr.)	5001,53	52			

Since the P-value of the F-test is less than 0,05, there is a statistically significant difference between the mean AMP from one level of filo to another at the 95,0% confidence level.

Table of Means for AMP by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Stnd. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
24	24	40,049	1,66793	37,6813	42,4168
31	29	51,0746	1,51734	48,9207	53,2286
Total	53	46,0819			

ANOVA Table for CTA - 2.4 vs. 3.1 by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	4,58652E7	1	4,58652E7	5,64	0,0213
Within groups	4,14505E8	51	8,12756E6		
Total (Corr.)	4,6037E8	52			

Table of Means for CTA by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Stnd. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
24	24	3708,39	581,935	2882,29	4534,49
31	29	1839,54	529,396	1088,02	2591,06
Total	53	2685,81			

ANOVA Table for DUR - 2.4 vs. 3.1 by filo

Analysis of Variance					
----------------------	--	--	--	--	--

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	2,80034E11	1	2,80034E11	48,83	0,0000
Within groups	2,92484E11	51	5,73498E9		
Total (Corr.)	5,72518E11	52			

Table of Means for DUR by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
24	24	195962,0	15458,2	174018,0	217906,0
31	29	49933,2	14062,6	29970,1	69896,2
Total	53	116059,0			

ANOVA Table for ENE - 2.4 vs. 3.1 by filo

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	78373,6	1	78373,6	0,15	0,6999
Within groups	2,66029E7	51	521625,0		
Total (Corr.)	2,66813E7	52			

Table of Means for ENE by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
24	24	455,23	147,426	245,947	664,512
31	29	532,483	134,116	342,095	722,871
Total	53	497,501			

ANOVA Table for HR - 2.4 vs. 3.1 by filo

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	7026,47	1	7026,47	14,15	0,0004
Within groups	25324,2	51	496,552		
Total (Corr.)	32350,6	52			

Table of Means for HR by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
------	-------	------	--------------------------	-------------	-------------

24	24	11,9879	4,54859	5,53081	18,445
31	29	35,1193	4,13793	29,2452	40,9934
Total	53	24,6447			

ANOVA Table for RMS - 2.4 vs. 3.1 by filo

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,000681683	1	0,000681683	13,16	0,0007
Within groups	0,00264189	51	0,0000518017		
Total (Corr.)	0,00332357	52			

Table of Means for RMS by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Stnd. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
24	24	0,000615987	0,00146915	-0,00146959	0,00270156
31	29	0,00782083	0,00133651	0,00592355	0,00971811
Total	53	0,00455826			

ANOVA Table for RT - 2.4 vs. 3.1 by filo

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	105677,0	1	105677,0	12,57	0,0009
Within groups	428774,0	51	8407,33		
Total (Corr.)	534451,0	52			

Table of Means for RT by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Stnd. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
24	24	166,652	18,7164	140,083	193,222
31	29	256,358	17,0267	232,188	280,529
Total	53	215,737			

Multiple Range Test para los ensayos 1, 2 y 3

ensayo 1 = filo 2.2
ensayo 2 = filo 2.4
ensayo 3 = filo 3.1

ANOVA Table for AMP - 2.2, 2.4, 3.1 by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	2754,02	2	1377,01	19,38	0,0000
Within groups	9376,88	132	71,037		
Total (Corr.)	12130,9	134			

Since the P-value of the F-test is less than 0,05, there is a statistically significant difference between the mean AMP from one level of filo to another at the 95,0% confidence level.

Table of Means for AMP by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Stnd. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	52,0785	0,930755	50,7767	53,3804
24	24	40,049	1,72043	37,6426	42,4554
31	29	51,0746	1,5651	48,8855	53,2638
Total	135	49,7243			

Multiple Range Tests for AMP by filo

Method: 95,0 percent LSD			
filo	Count	Mean	Homogeneous Groups
24	24	40,049	X
31	29	51,0746	X
22	82	52,0785	X

ANOVA Table for CTA - 2.2, 2.4, 3.1 by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	3,33967E9	2	1,66983E9	49,02	0,0000
Within groups	4,49637E9	132	3,40634E7		
Total (Corr.)	7,83604E9	134			

Since the P-value of the F-test is less than 0,05, there is a statistically significant difference between the mean CTA from one level of filo to another at the 95,0% confidence level.

Table of Means for CTA by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Stnd. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	12800,9	644,521	11899,4	13702,4
24	24	3708,39	1191,35	2042,02	5374,76
31	29	1839,54	1083,79	323,609	3355,47
Total	135	8829,8			

Multiple Range Tests for CTA by filo

Method: 95,0 percent LSD			
filo	Count	Mean	Homogeneous Groups
31	29	1839,54	X
24	24	3708,39	X
22	82	12800,9	X

ANOVA Table for DUR - 2.2, 2.4, 3.1 by filo

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	5,07189E11	2	2,53594E11	43,65	0,0000
Within groups	7,66843E11	132	5,80941E9		
Total (Corr.)	1,27403E12	134			

Since the P-value of the F-test is less than 0,05, there is a statistically significant difference between the mean DUR from one level of filo to another at the 95,0% confidence level.

Table of Means for DUR by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Stnd. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	200060,0	8417,04	188287,0	211833,0
24	24	195962,0	15558,2	174200,0	217724,0
31	29	49933,2	14153,6	30136,1	69730,2
Total	135	167082,0			

Multiple Range Tests for DUR by filo

Method: 95,0 percent LSD			
filo	Count	Mean	Homogeneous Groups
31	29	49933,2	X
24	24	195962,0	X
22	82	200060,0	X

ANOVA Table for ENE - 2.2, 2.4, 3.1 by filo

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	5,68102E7	2	2,84051E7	8,01	0,0005
Within groups	4,67887E8	132	3,5446E6		
Total (Corr.)	5,24697E8	134			

Multiple Range Tests for ENE by filo

Method: 95,0 percent LSD			
filo	Count	Mean	Homogeneous Groups
24	24	455,23	X
31	29	532,483	X
22	82	1825,0	X

ANOVA Table for HR - 2.2, 2.4, 3.1 by filo

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	17475,2	2	8737,61	40,49	0,0000
Within groups	28485,7	132	215,801		
Total (Corr.)	45960,9	134			

Since the P-value of the F-test is less than 0,05, there is a statistically significant difference between the mean HR from one level of filo to another at the 95,0% confidence level.

Table of Means for HR by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Stand. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	6,62887	1,62226	4,35977	8,89797
24	24	11,9879	2,99861	7,79364	16,1821

31	29	35,1193	2,72789	31,3037	38,9349
Total	135	13,7017			

Multiple Range Tests for HR by filo

Method: 95,0 percent LSD

filo	Count	Mean	Homogeneous Groups
22	82	6,62887	X
24	24	11,9879	X
31	29	35,1193	X

ANOVA Table for RMS - 2.2, 2.4, 3.1 by filo

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,000816457	2	0,000408228	6,67	0,0017
Within groups	0,00807822	132	0,0000611986		
Total (Corr.)	0,00889467	134			

Since the P-value of the F-test is less than 0,05, there is a statistically significant difference between the mean RMS from one level of filo to another at the 95,0% confidence level.

Table of Means for RMS by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	0,00660435	0,000863901	0,00539599	0,00781272
24	24	0,000615987	0,00159685	-0,00161758	0,00284955
31	29	0,00782083	0,00145269	0,00578891	0,00985275
Total	135	0,00580107			

Multiple Range Tests for RMS by filo

Method: 95,0 percent LSD

filo	Count	Mean	Homogeneous Groups
24	24	0,000615987	X
22	82	0,00660435	X
31	29	0,00782083	X

ANOVA Table for RT - 2.2, 2.4, 3.1 by filo

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	126275,0	2	63137,4	9,08	0,0002
Within groups	917738,0	132	6952,56		
Total (Corr.)	1,04401E6	134			

Since the P-value of the F-test is less than 0,05, there is a statistically significant difference between the mean RT from one level of filo to another at the 95,0% confidence level.

Table of Means for RT by filo
with 95,0 percent LSD intervals

filo	Count	Mean	Std. error (pooled s)	Lower limit	Upper limit
22	82	241,032	9,208	228,152	253,911
24	24	166,652	17,0203	142,845	190,459
31	29	256,358	15,4837	234,701	278,016
Total	135	231,101			

Multiple Range Tests for RT by filo

Method: 95,0 percent LSD

filo	Count	Mean	Homogeneous Groups
24	24	166,652	X
22	82	241,032	X
31	29	256,358	X

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA CENTRO DE INFORMACION C A C
