

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”

“Estudio de las señales de emisión acústica generadas en el corte de metales. Aplicación a procesos de taladrado”

por Magíster Lic. Martín P. Gómez

Directores

**Dr. José E. Ruzzante
Dr. Carlos E. D’Attellis**

(*) Tesis para optar al título de *Doctor en Ciencia y Tecnología: Mención Materiales*

Republica Argentina

2011

Agradecimientos

A mi querida familia, Moni, Vicky y Sofi, quienes me han comprendido, apoyado y acompañado en esta extensa etapa de trabajo.

A mis padres, hermanos y amigos, ídem.

A mis directores José Ruzzante y Carlos D'Attellis, por la cordialidad, las posibilidades, y la inestimable ayuda que me brindaron.

A Alfredo Hey, por sus sabios consejos.

A Julio Migliori, por su gran aporte al trabajo experimental.

A Rosa Piotrkowski, por su participación en partes del trabajo, su invalorable ayuda y su generosidad.

A Edgardo Cabanillas, por su ayuda con la electroerosión.

A Elena Forlerer, por sus sugerencias sobre el trabajo y por prestarme la celda de torque.

A Deyan Draganov, por su ayuda y sus consejos.

A Adriana, Pablo y Gonzalo, por las muchas sesiones con el MEB.

A Ramón Castillo, Ricardo Montero y Gonzalo Porta, por la ayuda y paciencia brindadas.

A la gente de la biblioteca del CAC-CNEA, por su colaboración en la búsqueda de la vasta bibliografía.

A Alicia Sarce, Ricardo Carranza, y a toda la gente del IT Sabato (UNSAM-CNEA), autoridades, profesores y personal administrativo, por la excelencia académica y humana.

A Isa, Mary, Dino, Nico, Darío, Carlos, Valeria, Miriam, Cynthia y Graciela, del Grupo ICES-Ondas Elásticas, por su compañerismo y colaboración.

A Fernando Laurinec, Romina Miranda, Hugo Sacchetti, José Caggiano y Carlos Ruiz por sus aportes.

A la gente de la GAIyANN y de la GDyPE, por el apoyo brindado.

A la gente de la UA ENDE-CNEA adonde transcurrió la mitad de este trabajo.

Al Agregado Científico de Italia, Gabriele Paparo, porque su gestión llevó a la realización de un interesante trabajo en el área de la biofísica.

A Jorge Fischbarg, quien confió en mis propuestas para la ejecución de parte de su trabajo, citado en el párrafo anterior, utilizando algoritmos escritos en esta tesis para el análisis espectral tiempo-frecuencia.

A Nacho, Gladys, Antolino Gallego, Ariel Moreno, Luis y Yoli, Ferenc Guillemot, Telmo Strohaecker y la gente del LAMEF.

A la UTN, por la valiosa beca para docentes que me permitió realizar esta etapa de mi carrera.

A Alicia Román, Lorena Pena, y al Comité de becas de la UTN, por su invalorable confianza y apoyo.

A la UNSAM, por el subsidio al proyecto "Análisis de Señales y Modelización en Ondas Elásticas", código: SA 06/008 que incluyó parte de este trabajo.

A la CNEA, por las posibilidades que me ha brindado para realizar este trabajo.

A gente querida que ya no está.

A nuestro querido país y a quienes hacen cosas para que todos estemos mejor.

A todos aquellos que me he olvidado de incluir en estos agradecimientos.

Resumen

Este trabajo de tesis consiste en la búsqueda de parámetros predictivos que puedan ser aplicados para determinar el estado de las herramientas de corte en el maquinado de piezas metálicas. En este caso, el método indirecto de medición elegido está basado en la emisión acústica (EA) generada durante ese proceso. El objetivo de esta investigación es acortar el camino hacia sistemas de control de posible aplicación en máquinas industriales.

El trabajo consistió en tres etapas. En un principio, se estudió de manera preliminar la EA proveniente de ensayos de torneado, lo que permitió un acercamiento al tema. Luego, en las etapas segunda y tercera, se efectuaron sendos experimentos de taladrado, siendo el último el de mayor relevancia. En la segunda etapa, también considerada como preliminar, se taladraron probetas planas de acero con mechas que representaban dos casos extremos del desgaste de sus filos: sanos y craterizados. Entonces, se compararon para ambos casos los distintos parámetros de la EA obtenida en el corte. A partir de este experimento se obtuvieron resultados alentadores respecto al uso de un parámetro definido en este trabajo, que fue denominado “Potencia MARSE media” de la EA o “Potencia Media” (PM) (adonde MARSE es “Measured Area under the Rectified Signal Envelope”). Dadas las limitaciones de los estudios de las etapas preliminares, se procedió a la realización de una tercera etapa experimental más robusta. En esta parte del trabajo se construyó un número grande de probetas con forma de cilindro hexagonal de acero con buena homogeneidad, las cuales fueron consecutivamente taladradas en su centro con mechas con ocho condiciones distintas que contemplaban los casos de filos en buen estado y dañados así como deterioro en las esquinas externas. El desgaste artificial se efectuó mecánicamente y por electroerosión, y el avance del daño fue monitoreado por microscopía electrónica de barrido (MEB). Durante el corte se registraron los parámetros característicos y las formas de onda de la EA, así como el torque. Para las distintas condiciones de las mechas se estudió la relación entre la PM de la EA y el torque. De esta forma, se encontró que ambos parámetros están relacionados linealmente entre sí. Además, se analizó la evolución de la variancia móvil de la PM de la EA en función de su media móvil, dando interesantes resultados para la determinación del estado de la herramienta. Se observó que en un plano formado por las dos variables mencionadas, cada caso de desgaste se distribuye en una región (o clúster) definida, lo cual permitiría, en las condiciones de corte estudiadas, determinar en qué estado de desgaste se encuentra la herramienta de corte. Por otro lado, en el análisis de las formas de onda de EA, se instaló un criterio de selección de señales que permitió conservar solo las procedentes de fuentes de EA (en el corte) relacionadas con la fricción y la deformación plástica. A estas señales se les calculó la potencia espectral, y separando la potencia en bandas de frecuencia se comprobó que podrían discriminarse los casos de las mechas con distinto grado de desgaste, a partir de la evolución de la potencia de cada banda. También se observó la posibilidad de clasificar la condición de la mecha a partir del conteo del número de formas de onda de EA cuasi-estacionarias. Finalmente, comparando los resultados de la PM obtenidos por medio de los parámetros, con aquellos obtenidos con las formas de onda de las señales cuasi-estacionarias, se pudo estimar la PM de la EA generada por la rotura de la viruta durante el corte.

En el transcurso del trabajo también se investigan otras posibles aplicaciones de la EA a la caracterización del proceso de corte tales como el seguimiento de la evolución del mismo, el tipo de viruta generada y la velocidad de rotación de la mecha, entre otros.

Abstract

This thesis involves the search of predictive parameters to be applied to assess the condition of cutting tools in metal work-pieces machining. In this case, the indirect method chosen is based on sensing the acoustic emission (AE) generated during the cutting process. The objective of this research is to shorten the way for utilization of control systems for possible application in industrial machinery.

This work consisted of three parts. At the beginning of the work, AE data measured from turning machining was studied in a preliminary way as a test and as an approach to the subject. In the second and third parts, two separate drilling experiments were carried out, the second experiment being the most important. In the second part, also considered as preliminary, flat steel specimens were drilled using drill bits representing two extreme cases of wear on their edges; this wear is defined as healthy and cratered, respectively. Following this, different parameters of the AE, obtained in the cutting process for both cases, were compared. This experiment provided encouraging results about the use of a parameter defined in this work, and coined "Mean MARSE Power" of the EA or "Mean Power" (MP) (where MARSE is "Measured Area under the Rectified Signal Envelope"). Given the limitations of previous experiments, a more robust third experimental part was carried out. In this part, a large number of hexagonal cylindrical steel samples with good homogeneity were prepared and consecutively drilled at their centers with drill bits having different levels of damage at the edges and at the outer corners. The wear of these tools was obtained artificially by spark erosion, but also mechanically, and the progression of the damage was monitored by scanning electron microscopy (SEM). During the machining process, the features and the waveforms of AE and torque were recorded. For different conditions of the drill bits, the relationship between the AE "Mean Power" (MP) and torque was studied, and it was found that both parameters are linearly related. The study of the evolution of the AE MP moving variance as a function of its moving average was analyzed, obtaining interesting results for the determination of the condition of the tool wear. For each case of wear, dots representing each measured signal were clustered in defined regions in a plane formed by the two above mentioned variables. On the other hand, a selection criterion of the AE waveforms was developed, selecting only the sources related to friction and plastic deformation. After it, the spectral power of these "quasi-stationary" signals was calculated and separated in frequency bands. The evolution of the power of each band and the degree of wear of the drill bit were related. Also, a classification of wear by means of counting the number of quasi-stationary EA signals was recognized. Finally, the results of the PM, obtained through the studied parameters, and those obtained using the waveforms of the quasi-stationary signals were matched to estimate the AE MP generated by the chip breaking during cutting.

Other possible applications of AE to the characterization of the cutting process, such as the evolution of the process, the kind of chip generated and the speed of rotation of the drill bit, among others, were also investigated in the development of this work.

Publicaciones internacionales con referato

a) De trabajos que forman parte de los experimentos y resultados de la tesis

1. M.P. Gómez, A.M. Hey, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission", *Physics Procedia*, 3, 819–825 (ISSN 1875-3892) DOI: 10.1016/j.phpro.2010.01.105 (2010)
2. M.P. Gómez, J. Migliori, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Acoustic emission measurements for tool wear evaluation in Drilling", *Rev. of Prog. in QNDE*, 1096, 1474-1480 (ISSN 0094-243X) DOI: 10.1063/1.3114131 (2009)
3. M.P. Gómez, R. Piotrkowski, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Estimation of the Tool Condition by Applying the Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals", *Rev. of Prog. in QNDE*, 894, 635-641 (ISSN 0094-243X) DOI: 10.1063/1.2718030 (2007)

b) De un trabajo en el que se utilizó la metodología de análisis de señales con transformada ondita continua (Programa escrito en MATLAB), desarrollada en la presente tesis, para resolver un problema de otra disciplina (idea aportada por el autor de la tesis)

4. V. I. Cacace, N. Montalbetti, C. Kusnier, M. P. Gomez, and J. Fischbarg, "Wavelet analysis of corneal endothelial electrical potential difference reveals cyclic operation of the secretory mechanism", *Physical Review E*, 84, 032902 (ISSN 1539-3755) (2011)

Publicaciones en actas de congresos

a) De trabajos que forman parte de los experimentos y resultados de la tesis

5. M.P. Gómez, A.M. Hey, J.E. Ruzzante y C.E. D'Attellis, "Determinación del estado de herramientas de corte por emisión acústica", Actas SAM/CONAMET 2011, 11 Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales, en publicación (2012)
6. M.P. Gómez, J.E. Ruzzante y C.E. D'Attellis, "Análisis de señales de emisión acústica para el estudio del desgaste de mechas en taladrado", Memorias del Congreso VII CORENDE, (ISBN 978-987-23957) (2009).
7. M.P. Gómez, C.E. D'Attellis y J.E. Ruzzante, "Estimación del Estado de la herramienta en taladrado mediante el análisis de la emisión acústica", Actas del 5to. Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, E-GLEA 5, 7-16 (ISBN 978-950-766-051-1) (2007)

b) De un trabajo que utilizó la metodologías de análisis de señales de EA desarrolladas durante el trabajo de tesis.

8. M.P. Gómez, J.I. Mieza, J. Ruzzante y C. D'Attellis, "Caracterización de señales de Emisión Acústica mediante su análisis temporal como procesos estocásticos", Actas de la XI RPIC, 697-701 (ISBN 950-665-340-2) (2005).

Citas por otros autores de las publicaciones realizadas durante la tesis

Publicación 1 (Gómez y otros (2010)) citada en:

Libros

R. Venkata Rao, "Advanced Modeling and optimization of manufacturing processes International Research and Development", Springer, London (2011)

Revistas o proceedings

Rajesh, S. and Marimuthu, K., "On-line drill wear monitoring system through cutting current signals by using virtual instrumentation", *European Journal of Scientific Research*, 56, 51-60 (2011) (ISSN 1450216X)

K. Patra, "Acoustic Emission based Tool Condition Monitoring System in Drilling", Proceedings of the World Congress on Engineering 2011, Vol. III , WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K

R.T. Sadasiva, K. Satyanarayana, Y. Praneeth, A. Venu Gopal, " Studies on the Effect of Approach Angle and Process Parameters in Face Milling", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 110-116, 3147-3155 (2012)

Publicación 3 (Gómez y otros (2007)) citada en:

Revistas

Eftekharijad, B. and D. Mba, "Acoustic emission signals associated with damaged helical gears", *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 50, 450-453 (ISSN 13542575) (2008)

Índice

Introducción	I-1
Capítulo 1 Fundamentos de la Emisión Acústica	1-1
1.1 Introducción	1-2
1.1.1 El proceso físico de la emisión acústica	1-2
1.1.2 Señales de emisión acústica	1-3
1.1.3 EA como método de END	1-4
1.2 Propagación de las ondas elásticas	1-5
1.2.1 Medio infinito isótropo	1-5
1.2.2 Impedancia	1-7
1.2.3 Presencia de discontinuidades en el medio	1-7
1.2.4 Atenuación de las ondas	1-13
1.3 Fuentes de EA	1-14
1.3.1 Modelos estático y dinámico de fuentes de EA	1-14
1.3.2 Modelo de emisor microscópico en medio semi-infinito	1-15
1.3.3 Direccionalidad de las fuentes	1-16
1.3.4 Descripción de los distintos tipos de fuentes de EA	1-17
1.4 Instrumentación de la EA. Sistema de EA.	1-23
1.4.1 Sensores de emisión acústica	1-23
1.4.2 Acoplante	1-28
1.4.3 Preamplificadores	1-28
1.4.4 Equipo de EA. Amplificador. Parametrizador. Digitalizador.	1-29
1.5 Señales de EA	1-31
1.5.1 Estudio de los parámetros	1-31
1.5.2 Localización zonal y puntual	1-34
1.5.3 EA como series temporales	1-34
1.5.4 Estudio de las formas de onda	1-35
1.5.5 Patrones de radiación de las fuentes	1-37
1.5.6 Inversión de la función de Green o deconvolución de la señal.	1-37
1.6 Bibliografía del Capítulo 1	1-39
Capítulo 2 Conceptos básicos del proceso de corte de metales	2-1
2.1 Maquinado de piezas por arranque de viruta	2-2
2.1.1 Introducción	2-2
2.1.2 Corte de metales con una herramienta simple en forma de cuña	2-2
2.2 Corte ortogonal. Modelo bidimensional	2-3
2.2.1 Análisis de la zona de deformación primaria. Modelos	2-4
2.2.2 Zona de deformación secundaria. Fricción en el corte.	2-11
2.2.3 Tipos de viruta	2-12
2.2.4 Energía del corte	2-13
2.2.5 Fuerza de penetración y efecto de tamaño	2-13
2.3 Duración y desgaste de las herramientas de corte	2-14
2.3.1 Duración de la herramienta	2-14
2.3.2 Efecto del ángulo de corte de la herramienta	2-14

2.3.3	Materiales de las herramientas	2-15
2.3.4	Materiales a maquinar- Maquinabilidad	2-15
2.3.5	Fluidos de corte	2-16
2.4	Proceso de Taladrado	2-16
2.4.1	Descripción de una mecha helicoidal convencional. Nomenclatura	2-16
2.4.2	Mecánica del proceso de taladrado	2-17
2.4.3	Vibración de la mecha	2-24
2.4.4	Generación de rebaba	2-25
2.4.5	Acción del cincel. Agujero guía.	2-25
2.4.6	Formación de Viruta en el taladrado	2-25
2.4.7	Forma de la viruta	2-27
2.4.8	Dinámica de la penetración de la mecha	2-28
2.4.9	Factores que afectan a la duración de la mecha	2-28
2.5	Bibliografía del Capítulo 2	2-30
Capítulo 3	Métodos para la determinación del estado de herramientas de corte	3-1
3.1	Introducción	3-2
3.2	Métodos directos e indirectos	3-3
3.2.1	Métodos directos	3-4
3.2.2	Métodos indirectos	3-5
3.3	Medición de la EA generada durante el corte	3-8
3.3.1	Introducción	3-8
3.3.2	Fuentes de EA en el proceso de corte de metales	3-10
3.3.3	Ventajas y desventajas del uso de la EA en el monitoreo del desgaste	3-15
3.3.4	Instrumentación de la EA en el maquinado	3-16
3.3.5	Otras aplicaciones del estudio de la EA durante el maquinado	3-16
3.4	Métodos de análisis de señales para el monitoreo con EA	3-19
3.4.1	Caracterización de las señales en el dominio temporal	3-19
3.4.2	Caracterización en el dominio de las frecuencias	3-19
3.4.3	Caracterización en el espectro tiempo-frecuencia	3-20
3.4.4	Caracterización el dominio estadístico	3-22
3.4.5	Métodos de soporte de toma de decisión	3-23
3.5	Bibliografía del Capítulo 3	3-25
Capítulo 4	Etapas preliminar del análisis de señales de maquinado. Parte 1	4-1
4.1	Introducción	4-2
4.2	Transformada ondita	4-2
4.3	Método experimental	4-3
4.3.1	Respecto del ensayo de torneado	4-3
4.3.2	Procedimiento para el análisis de las señales de EA	4-3
4.4	Resultados y discusión	4-6
4.4.1	Visualización del espectro tiempo-frecuencia	4-6
4.4.2	Valor máximo de los coeficientes de cada matriz	4-9
4.4.3	Potencia en función del desgaste	4-10
4.4.4	Análisis de la evolución de la mediana y la variancia	4-11
4.5	Conclusiones del Capítulo 4	4-16
4.6	Bibliografía del Capítulo 4	4-17

Capítulo 5	Etapas preliminar del análisis de señales de maquinado. Parte 2	5-1
5.1	Introducción	5-2
5.2	Método Experimental	5-3
5.2.1	Preparación del experimento	5-3
5.2.2	Realización de la experiencia	5-8
5.2.3	Procedimientos para el análisis de las señales medidas	5-10
5.2.4	Ejemplos de información complementaria acerca del corte	5-12
5.3	Resultados y discusión	5-14
5.3.1	Análisis en frecuencia de las formas de onda	5-14
5.3.2	Análisis de los parámetros característicos	5-16
5.3.3	Discusión global de los métodos para el estudio del estado	5-25
5.3.4	Ejemplos de obtención de información con EA	5-26
5.4	Conclusiones del Capítulo 5	5-35
5.5	Bibliografía del Capítulo 5	5-37
Apéndice 5.1	Fotografías de las virutas producidas por las mechas	5-39
Capítulo 6	Ensayos finales de taladrado en probetas hexagonales de acero	6-1
6.1	Introducción	6-2
6.2	Método experimental	6-4
6.2.1	Preparación de los experimentos	6-4
6.2.2	Realización de los ensayos de taladrado	6-17
6.2.3	Metodología para el procesamiento de los datos	6-19
6.3	Resultados y discusión	6-23
6.3.1	Parámetros de la EA	6-23
6.3.2	Medición del torque	6-26
6.3.3	Relación entre el Torque y los parámetros de la EA	6-26
6.3.4	Análisis de la PM de la EA: gráficos MMPM vs VMPM	6-29
6.3.5	Análisis espectral de las formas de onda de la EA	6-34
6.3.6	Otros métodos para evaluar el grado de estacionariedad	6-38
6.3.7	Discusión adicional sobre la PM de la EA durante el corte	6-41
6.3.8	Determinación de la velocidad de rotación de la mecha	6-42
6.4	Conclusiones del Capítulo 6	6-45
6.5	Bibliografía del Capítulo 6	6-49
Apéndice 6.1	Ejemplo de Imágenes con MEB del fondo de un agujero	6-52

Introducción

A continuación se desarrolla la motivación impulsora de la realización de la presente tesis, tanto desde el punto de vista del estudio de las herramientas de corte, así como desde la aplicación del método de emisión acústica a través del análisis de señales. También se exponen los objetivos y la manera en la que se desarrolló el trabajo a lo largo de los sucesivos capítulos.

Motivación

Respecto del estudio de los procesos de maquinado

En los procesos industriales es de gran importancia el monitoreo del estado de las herramientas de corte y del proceso de corte, por variadas razones que van desde lo económico en el proceso de producción, hasta lo funcional y lo estético del producto manufacturado. En líneas de fabricación, la falla de una herramienta puede tener como consecuencias adversas tiempos de parada considerables, si se detecta la falla y se detiene la producción, o en el peor de los casos una cantidad de productos deficientes que no podrán comercializarse que involucran tiempos de maquinado y material desperdiciados. Los contratiempos antes mencionados tienen un costo económico muchas veces de magnitudes considerables. Por otra parte, desde el punto de vista de la calidad del producto a fabricar, una herramienta en mal estado puede generar productos comercializables, pero de baja calidad. En las nuevas tecnologías hay requerimientos de precisión muy exigentes de los componentes involucrados en donde las piezas deben ser maquinadas con tolerancias muy pequeñas, por ejemplo en la industria nuclear, en la aeronáutica, en la astronáutica, etc. Esto lleva a la necesidad de herramientas y máquinas de alta precisión y sistemas de verificación y evaluación del correcto funcionamiento de estas. Nuevos criterios de manufactura de precisión han sido lentamente incorporados por la industria en general, con el concepto de calidad total de los productos, observándose una tendencia al aumento en la calidad de los productos fabricados en serie y a bajo costo. También el desarrollo de nuevas tecnologías en las máquinas herramienta computarizadas tipo CNC, trae nuevas exigencias en el rubro de las herramientas de corte, de las cuales dependen.

Una de las motivaciones del estudio efectuado en esta tesis está relacionada con un aspecto fundamental del proceso de corte que es el conocimiento del estado de la condición de la herramienta a tiempo real, cuya relevancia se relaciona con lo expresado previamente. Otra información importante del corte que puede indagarse, también relacionada a la optimización del proceso, es aquella relativa al estado de la viruta, la lubricación, y el seguimiento de la etapa del corte que se está desarrollando (p.ej.: si la herramienta está efectuando el corte del material o ya finalizó). La posibilidad de estudiar tales características del proceso de corte de manera no destructiva, y en la línea de producción, son trascendentales al momento de implementar la automatización del maquinado, permitiendo ejecutar procesos en línea independientes de la supervisión humana.

Respecto del estudio de la EA

La EA es un método de ensayos no destructivos (END) relativamente nuevo, difundido en los últimos 40 años, que se basa en la recolección de ondas elásticas generadas en materiales que son sometidos a alguna sollicitación externa, por medio de sensores que convierten la energía elástica en señales eléctricas. En los últimos años, el espectro de aplicabilidad de este método se ha multiplicado de manera asombrosa a todo tipo de material y sollicitación, desde la detección de fallas en grandes componentes metálicos, la evaluación de recipientes de materiales compuestos, el monitoreo de estructuras de hormigón, hasta la obtención de información geológica de sismos y volcanes, pasando por la detección de plagas como termitas por poner algunos ejemplos. El estudio del estado de las herramientas de corte es una de las aplicaciones de la EA que comenzó a fines de la década del 70. Las ondas elásticas generadas en la zona de corte poseen la

información de los fenómenos que allí están ocurriendo en el momento del maquinado. El desafío de este método está en la interpretación de las señales obtenidas y su correlación con el estado del material estudiado. Hay gran cantidad de herramientas matemáticas que se muestran en la literatura para el análisis de las señales de EA, las cuales contraponen la riqueza de información contenida con la dificultad de la metodología desarrollada para extraerla.

La mayor parte de los trabajos no prestan atención respecto de qué tipo de parámetro de EA se está evaluando. Indistintamente se trabaja con alguno de ellos y luego se procesa la información con sofisticados algoritmos matemáticos tales como lógica difusa, redes neuronales y otros sistemas inteligentes, que hacen que la implementación de esta técnica sea complicada y onerosa. Además de requerir información complementaria por otros métodos de sensado. En este trabajo de tesis se evalúa la efectividad de los distintos parámetros de la EA con el fin de encontrar alguno que permita simplificar los pasos posteriores a la obtención de la señal.

Las señales de EA en el proceso de corte provienen de procesos estocásticos producidos en la interacción herramienta-material. Entre las posibles fuentes de EA en el proceso de corte se pueden mencionar la deformación plástica en pieza y viruta, la fractura del material, la fractura de la viruta, la fractura de la herramienta, y la fricción entre la herramienta, la pieza y la viruta. Estos procesos generan distintos tipos de señales de EA. En la EA hay pocos parámetros que sirvan para analizar las dos clases de señales de EA que se producen (continuas y tipo estallido, según el tipo de fuente) a la vez.

Por otra parte, en la literatura no se aprovecha con herramientas concretas y directas, la variabilidad de las señales de EA generadas en el corte que contiene valiosa información de fenómenos relevantes que ocurren en el corte, más allá del estudio de las amplitudes, o las funciones convencionales que se derivan de esta, en su variación en el tiempo.

Objetivo de la tesis

El objetivo principal del presente trabajo de tesis fue la búsqueda de una metodología de medición y análisis que permitiera inferir el estado de una herramienta de corte en un proceso de maquinado. Esa búsqueda se concretó mediante la implementación de ensayos de taladrado de probetas metálicas y se utilizó como método indirecto de detección a la emisión acústica, analizando las señales obtenidas en ensayos efectuados con herramientas con distintos tipos de desgaste, en iguales condiciones de corte tales como tamaño de la herramienta, velocidad de rotación, velocidad de avance, y tipo de lubricación. Luego el objetivo fue encontrar un parámetro de la EA que optimizara la representación de los fenómenos a detectar. Como objetivo secundario del trabajo se buscó por esta metodología obtener información adicional del proceso de corte.

Desarrollo de la tesis

El trabajo de tesis se desarrolla en seis capítulos. Los tres primeros corresponden a una etapa introductoria de los temas involucrados en el estudio realizado, que son: la EA, el corte de metales y los métodos para la determinación del desgaste de las herramientas de corte. En estos tres capítulos se exponen conocimientos extraídos de la bibliografía citada, que son necesarios para obtener un panorama del estado del arte de los objetivos a abordar.

En el **primer capítulo** se describe el método de Emisión Acústica (EA) en una visión general, comenzando con una introducción global y profundizando en cuatro etapas que consisten en la descripción de la propagación de ondas elásticas en sus distintos modos, las diferentes fuentes de EA principalmente en metales, la instrumentación para la detección de las ondas de EA denominada “sistema de EA”, y el análisis de las señales de EA mediante su procesamiento.

El **segundo capítulo** consiste en el tratamiento de los conceptos básicos requeridos para comprender el proceso del corte de metales. Allí se incorporan determinados conceptos y una terminología relativos al corte de metales, que servirán de base para los experimentos y mediciones realizados en esta tesis. Se define el maquinado por arranque de viruta, en particular para una herramienta simple con forma de cuña, y se desarrolla el concepto de corte ortogonal, avanzando de manera resumida sobre los distintos modelos siguiendo una línea temporal desde los más sencillos de la línea de corte hasta los que involucran la zona de corte. También se menciona la extensión de los modelos para el corte oblicuo, el caso más general que representa a los procesos industriales de maquinado. Se describe la fricción en la cara de la herramienta, los tipos de viruta, la energía del corte y la fuerza de avance, así como una resumida descripción de la idea de duración y desgaste de las herramientas que será tratada nuevamente en el siguiente capítulo. También se menciona la influencia del ángulo de corte, los materiales utilizados en las herramientas, la maquinabilidad de los materiales utilizados en las piezas y el uso de fluidos de corte. Por último se describe el proceso de taladrado, mostrando en primer lugar la nomenclatura utilizada en la literatura y en esta tesis, para poder describir la mecánica del corte en una forma resumida.

En el **tercer capítulo** se introducen los métodos para la determinación del estado de herramientas de corte. En este capítulo se completa la parte introductoria del trabajo de tesis presentándose variados métodos directos e indirectos para tal fin, destacándose a la EA como uno de los que más ha crecido en los últimos veinticinco años. Se describen los distintos tipos de fuentes de EA que actúan en el corte, y se expone un ejemplo de cómo se podría calcular el valor RMS de la EA en un modelo acotado cuya aproximación a la realidad es discutible, pero que es presentado en la literatura como un esbozo de aproximar de manera determinista el comportamiento de la EA. Se mencionan los tipos de ruido que afectan a estas mediciones. Otras aplicaciones de la EA en la caracterización del proceso de maquinado se despliegan como una expansión de la metodología desarrollada. Luego por último se tratan los métodos de análisis de señales más utilizados en la literatura con el fin del monitoreo con EA. Se realiza una clasificación de los métodos y se remite a la bibliografía.

Los tres capítulos siguientes exponen las distintas etapas del desarrollo de las investigaciones realizadas, cada una organizada con sus respectivas conclusiones y referencias, correspondiendo a tres experimentos distintos. Los dos primeros capítulos de esta etapa corresponden a estudios preliminares que llevaron al diseño y realización de los experimentos de la última etapa del trabajo de tesis, que corresponde al estudio del taladrado de probetas hexagonales, siendo este el de mayor importancia en el trabajo, tanto en el desarrollo de los experimentos como en las conclusiones extraídas.

En el **cuarto capítulo** se muestran primeros análisis de señales de EA adquiridas en un proceso de corte de metales por medio de un torno, y su relación con el desgaste de la herramienta de corte, en este caso un inserto. La idea del trabajo fue continuar la búsqueda de parámetros para evaluar el estado de la herramienta, en este caso mediante el análisis de la EA producida en el corte. Los datos estudiados corresponden a un trabajo previo del grupo de investigación en el cual se realizó esta tesis [Maradei y otros (2000, 2001)], y se utilizaron para poner a punto métodos de exploración de las señales de EA en el espectro tiempo-frecuencia de las mismas utilizando la transformada ondita. Se relacionó el desgaste de un inserto que perdió su filo a lo largo del proceso hasta llegar a un nivel apreciable de desgaste según norma. A las señales de EA se les calculó la transformada ondita continua y se relacionaron la potencia y dos parámetros surgidos del análisis de las onditas con el grado de desgaste.

En el **quinto capítulo** se describen las primeras mediciones de la EA en un proceso de taladrado con el fin de encontrar parámetros que permitan inferir el estado de desgaste de la herramienta. Se realizaron 35 ensayos en dos condiciones extremas del estado de la herramienta, que fueron mechas nueva y rota. El análisis de los resultados obtenidos comienza intentando implementar el

estudio de la evolución del espectro tiempo-frecuencia desarrollado en el capítulo anterior, pero no se obtienen resultados satisfactorios. Esto lleva a un cambio del enfoque del estudio y se pasa a trabajar con los parámetros característicos típicos de la EA. Entonces, se apunta hacia uno de los objetivos de la tesis que es encontrar el mejor parámetro que permita representar el estado del desgaste y características del proceso de corte tanto para señales continuas como para las no continuas. De esa manera se define en esta parte del trabajo la “potencia MARSE media” (PM) de la EA (MARSE significa “Measured Area under Rectified Signal Envelope”) y con esta se estudia el corte con mechas en buen estado y con el filo craterizado. También se estudió la aplicación de la EA a otros tópicos del maquinado, como por ejemplo la caracterización del tipo de viruta formada en el corte, la detección de las distintas etapas en la realización de un agujero pasante, o el cálculo de la velocidad de rotación de la mecha a partir de una periodicidad en la señal. La finalidad del Capítulo 5 es mostrar las primeras etapas de la implementación de los experimentos y del análisis de las señales, y el camino por el cual se fueron gestando los ensayos y métodos de análisis utilizados a posteriori en el siguiente capítulo.

En el **sexto capítulo** se prosiguen y se refuerzan los estudios iniciados en los dos capítulos anteriores. Este capítulo representa la parte importante del trabajo de tesis. Aquí se continuaron las líneas de investigación previas, pero se realizaron mejoras sustanciales tanto en el desarrollo del método experimental como en el análisis de los datos medidos, para poder obtener resultados concretos. Respecto de la parte de los experimentos, se eligió un material más homogéneo para las probetas a taladrar con el fin de evitar fluctuaciones dadas por las inhomogeneidades durante el corte. Para las mechas con desgaste, se construyeron casos con daño artificial en sus filos, obtenido de manera controlada por electroerosión, tal que la operación fuera repetible. También se estudiaron los casos de cráter en los filos y de esquinas externas gastadas, ambos de manera mecánica, tratando de abarcar un mayor espectro del daño de las herramientas. El seguimiento del estado de cada caso de mecha con y sin desgaste inicial fue seguido por microscopía electrónica de barrido (MEB). Otro avance importante fue la medición del torque como indicador alternativo del estado del proceso de corte y de la herramienta. Luego se buscó la relación de este parámetro mecánico con los parámetros característicos de las señales de EA.

Se continuó utilizando el parámetro definido en el capítulo anterior, denominado “potencia MARSE media” de la EA (PM), y se observó que para cada uno de los estados de la herramienta, además del valor medio, podía extraerse importante información de la dispersión de los valores de la PM medidos en cada ensayo. De esa manera se definió un parámetro denominado variancia móvil que fue representado en función de la media móvil, ambas de la PM de la EA, obteniéndose un mapa en el cual los resultados se distribuyeron en zonas bien definidas para cada distinto tipo de desgaste de las mechas. Luego, el estudio del proceso de corte se completó a partir del análisis en frecuencia de las formas de onda de la EA, iniciado en el Capítulo 4 para torneado; y que en el Capítulo 5 mostró resultados poco alentadores para el taladrado. En pos de solucionar esta dificultad, seguramente debida a la mayor complejidad del corte en el taladrado, se halló una metodología alternativa, a partir de seleccionar para este análisis sólo las señales de EA “estacionarias”. A partir de la FFT se analizó la potencia espectral de la EA, y se evaluaron tres bandas de frecuencia en las que se representó cada caso de desgaste de las mechas. Luego se pudo separar la EA generada por distintos mecanismos durante el corte como son la rotura de viruta por un lado y la EA debida a la fricción y la deformación plástica por el otro. Por último para una tanda de 10 ensayos de taladrado se calculó la velocidad de rotación de la mecha por dos caminos. Por un lado a partir de los parámetros de la EA y por otro utilizando la señal completa de EA (de “streaming”).

La descripción de cada capítulo se repetirá a modo de prólogo en cada uno de estos, como una guía para el lector que aborde una lectura parcial de esta tesis.

Capítulo 1

Introducción a la Emisión Acústica

Este capítulo es el primero de una trilogía que forma una secuencia introductoria de los contenidos que sustentan el presente trabajo de tesis. Se hace hincapié en la descripción de los puntos más importantes de la Emisión Acústica (EA), fundamentalmente por tratarse de una metodología de estudio aplicada a los FND que aun no tiene una difusión masiva pese a los beneficios de su aplicación. A continuación se realiza una introducción al tema, y luego una profundización en cuatro etapas que consisten en el tratamiento de la propagación de ondas elásticas, las fuentes de EA, la instrumentación para la detección de las ondas denominada “sistema de EA”, y los métodos típicos para el procesamiento y análisis de las señales de EA.

1.1 Introducción

El nombre “emisión acústica” (EA) se utiliza para describir tres situaciones. Estas son un proceso físico, un tipo de señal y un método de END [Scruby (2001)]. A continuación se detallará cada una.

1.1.1 Proceso físico de emisión acústica

Se entiende por Emisión Acústica a las ondas elásticas que se generan en un material cuando se ejercen ciertas acciones sobre él. Wadley y Simmons (1985) proponen que la EA podría pensarse como ultrasonido generado naturalmente al producir inestabilidades en el material. Como ejemplo se puede mencionar el caso del crecimiento de una fisura interna como consecuencia de una tensión aplicada al espécimen, produciéndose ondas elásticas, que se propagarán en el medio y podrán ser detectadas en la superficie del mismo, indicando la existencia de la fisura. En algunos casos, dependiendo del tipo de material y del proceso emisor, la detección de las ondas elásticas se realizará escuchando el sonido emitido, tal como en la rotura de un papel, vidrio o madera, o en los casos del maclado del estaño o de las transformaciones martensíticas. Detectando con la audición las ondas emitidas, se infiere la rotura o el proceso que ocurre en el material. Históricamente se han relacionado los sonidos con los procesos de emisión, de ahí su nombre [Drouillard (1996)] [Kishinoue (1990)] [Ohtsu (2008a)].

Pero a veces la detección no es tan simple. Eso puede deberse fundamentalmente a dos razones que dependen fuertemente del material, que son: si la intensidad de la onda es muy baja y si la frecuencia de la onda es mayor que la audible. Esto es lo que ocurre en la mayoría de los casos de EA estudiados en la actualidad, dado que se aplica principalmente a materiales como los metales, en los cuales los fenómenos de emisión ocurren con amplitudes muy pequeñas y a frecuencias situadas en el rango de los ultrasonidos, desde un poco más allá de la región audible hasta unos pocos MHz. Esto ha llevado a cuestionar la terminología del proceso cuyo nombre debería ser emisión de ondas elásticas (“elastic waves emisión”) o emisión de ondas de tensión (“stress waves emisión” (SWE)) [Scruby (2001)].

Más allá del audible, se hace imprescindible un dispositivo que permita captar las ondas elásticas, las registre, las procese y las muestre en algún formato conveniente. Ese dispositivo se denomina sistema de EA.

La emisión acústica puede generarse en principio por cualquier mecanismo que convierta alguna forma de energía, en energía elástica que se propagará por un medio. Las energías pueden ser mecánica, electromagnética, química, térmica, u otras. Esta liberación de energía ocurre de manera estocástica [Grabec (1980)] [Egle (1979)].

Respecto de la escala de la emisión de ondas elásticas del tipo de la EA podemos decir que va desde el movimiento de dislocaciones en la escala microscópica, hasta los eventos sísmicos a nivel macroscópico [Pollock (1995)]. De esta se puede pensar a la EA como un pariente a menor escala de los terremotos en el sentido del reajuste energético del sólido a partir de la emisión de ondas elásticas [Pollock (2008)].

Hablando en general se pueden citar entre los mecanismos de emisión procesos que ocurren en metales e involucran la degradación de los mismos tales como: deformación plástica o movimiento en forma de avalanchas de dislocaciones, crecimiento de fisuras, fractura de inclusiones o precipitados, degradación de superficies (corrosión, falla de recubrimientos, etc.), pérdidas dieléctricas, etc. Otros sin degradación también llamados reversibles tales como: procesos tribológicos como la fricción entre superficies, transformaciones de fases cristalográficas, fusión o solidificación, movimiento de paredes de los dominios magnéticos o ferroeléctricos. [Scruby(2001)]

En materiales compuestos también hay procesos que emiten EA de manera irreversible (con degradación) como: fisuración de la matriz, despegado, rotura de fibras, rotura de recubrimientos y procesos sin degradación como la fricción entre fibras.

También hay EA por ejemplo en procesos de fabricación tales como soldadura, forjado, rolado, maquinado, tamizado y mezclado de polvos, válvulas. O en pérdidas y flujo de partículas, de gases o líquidos, ebullición.

1.1.2 Señales de EA

El sistema de EA se basa en la conversión de las ondas elásticas generadas en el material, en señales eléctricas, denominadas señales de emisión acústica, por medio de un transductor o sensor que habitualmente está constituido por un cristal piezoeléctrico. Las señales eléctricas o de EA luego serán preamplificadas, filtradas, detectadas, amplificadas y procesadas para ser estudiadas de diversas maneras con el fin de extraer información relevante de los procesos y/o del material. Básicamente las señales de EA se clasifican en dos tipos: las señales tipo explosión o “burst” y las señales de tipo continuo (Fig. 1.1). Las primeras son pulsos transitorios tipo paquete de mayor o menor duración según el fenómeno que las produzca y las características del medio en el cual se propagan, estas tienen un comienzo y un final. Las otras como su nombre lo indica no tienen comienzo ni final y en general se supone que están constituidas por un número muy grande de señales transitorias [Ono (2005)]. En los procesos que generan la EA pueden superponerse ambos tipos de señales. El tipo de señal dependerá del tipo de fuente emisora. Se verá posteriormente que por ejemplo la deformación plástica o la fricción generan señales de EA tipo continua, mientras que la fisuración, la corrosión o las transformaciones martensíticas pueden dar señales tipo “burst”.

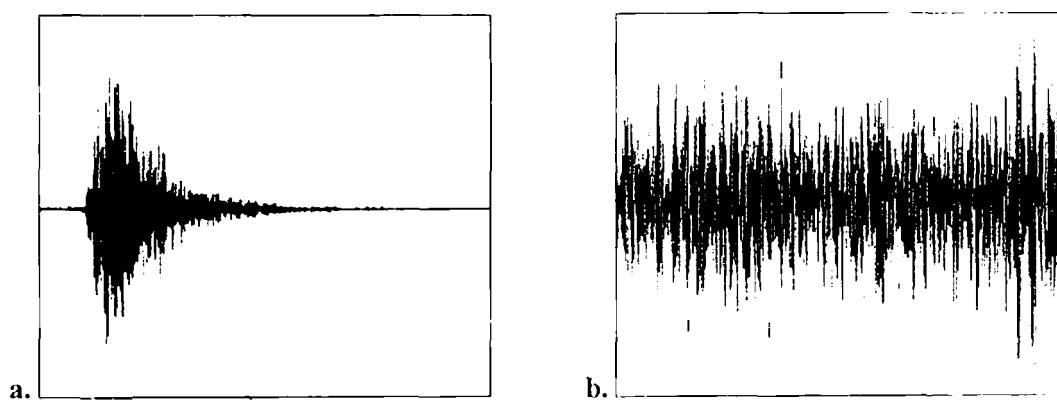


Fig. 1.1. Señales de EA. a. Tipo explosión (“burst”). b. Tipo continua.

1.1.3 EA como Método de END

La emisión acústica es un método de END que usualmente se denomina “pasivo” ya que no se efectúa una excitación con ondas de la misma clase para estudiar la interacción con el material, como ocurre en ultrasonido o en rayos X. Esta clasificación es discutible ya que para que exista EA debe existir una perturbación o sollicitación, que puede ser mecánica, química, magnética, etc. Un material no emitirá EA por sí solo de manera “pasiva”. Los sensores de EA no detectan ni deformaciones estáticas ni de muy alta frecuencia.

La EA difiere de otros métodos END en dos aspectos fundamentales. Estos son, por un lado que la señal se origina en el material examinado, y por otro que la EA detecta movimiento y no discontinuidades geométricas [Pollock (2003)]. La EA es un buen método de END para ser usado en complementación con otros.

Al solicitar un material por una tensión aplicada se podrá monitorear la redistribución de tensiones dentro del mismo a partir de detectar ondas elásticas en la superficie del material.

Como método de END la utilización industrial más difundida es la detección y ubicación de fisuras en estructuras bajo carga. También se encuentran desarrollos importantes en otros muy variados campos tales como: el desgaste de herramientas de corte [Barry y otros (2001)] [Gómez y otros (2010)] [Diniz (1992)], desgaste o la falta de lubricación en maquinas rotantes [Mba (2002)], adherencia de recubrimientos [Piotrkowski y otros (2005)] [Piotrkowski y otros (2009)], detección de pérdidas en válvulas o tubos, reacciones químicas y corrosión [Jomdecha (2007)], conteo de partículas granulares, detección de xilófagos en maderas (termitas) [González de la Rosa y otros (2008)], conservación de obras de arte, movimiento de las paredes de dominios ferroeléctricos o ferromagnéticos (MAE) [Ono y Shibata (1990)], pérdida de aislación en transformadores [Howells (1978)], en la medicina en el estudio del movimiento de articulaciones y estado de los huesos [Mascaro (2009)], monitoreo de integridad estructural [Ono (2008)], monitoreo de estructuras civiles [Carpinteri y otros (2007)] [Shiotani (2008)] [Ohtsu y otros (2008)], monitoreo de estructuras geológicas [Hardy (2003)] [Turcotte y otros (2008)] [Corral (2008)].

Respecto de las ventajas de la EA puede citarse la aplicación de manera no intrusiva (fácil colocación de los sensores). Colocando la cantidad de sensores necesaria puede usarse para evaluar una estructura completa en un único ensayo. Entre las desventajas de este método podemos citar que generalmente: requiere sollicitación de la estructura, los ensayos son irrepetibles, y la relación señal-ruido es un factor importante a ser tenido en cuenta [Pollock (2003)]. Además, si se trabaja con metales debe tenerse en cuenta el efecto Kaiser, que se desarrolla a continuación.

Efectos Kaiser y felicity

En la mayoría de los metales, al aplicarles una tensión aparece una respuesta irreversible en forma de EA, que se manifiesta cuando el material no ha sido cargado previamente o cuando se supera el valor máximo de la carga anteriormente aplicada. Este comportamiento se denomina “efecto Kaiser”. Este efecto “memoria” depende del material ensayado, y dura más o menos tiempo según las características de recuperación a temperatura ambiente del mismo. En la mayoría de los casos la EA es un proceso irreversible e irrepetible. Esto es una desventaja frente a otros métodos de END que pueden repetir indefinidamente su aplicación. Sin embargo también tiene una ventaja producida por el efecto Kaiser que es la posibilidad de evaluar la máxima carga a la que estuvo sometido un material o una estructura [Dunegan y Tatro (1967)]. La EA durante una prueba de carga es una medida del daño producido durante el precedente periodo de trabajo. La aplicación práctica del efecto Kaiser se realiza a través de incrementos sucesivos de carga.

Hay materiales que no cumplen el efecto Kaiser y tienen un comportamiento denominado “efecto felicity”. Un ejemplo de la falla del efecto Kaiser y la aparición del “felicity” está dado cuando se estudia el comportamiento a la carga de materiales compuestos plásticos reforzados con fibra, los cuales están deteriorados o próximos a la rotura. Una importante aplicación práctica del efecto felicity ha sido la detección de daños en recipientes o tanques de almacenamiento de fibra de vidrio. El efecto felicity está determinado por el cociente felicity que se define como:

$$F = (\text{Tensión de reinicio de la EA}) / (\text{máx. tensión previa}) \quad (1.1)$$

Este coeficiente puede indicar la severidad de la discontinuidad.

El efecto Kaiser falla en situaciones donde la deformación está controlada por mecanismos dependientes del tiempo. En materiales compuestos y hasta en metálicos, en los procesos mecánicos puede ocurrir fricción entre superficies libres en regiones dañadas (por ejemplo fisuras) lo que puede ser una importante fuente de EA. Tales fuentes no coinciden con el efecto Kaiser pero son útiles en la búsqueda de daño y discontinuidades.

1.2-Propagación de las ondas elásticas

Los fundamentos sobre la propagación de ondas elásticas que se describen a continuación se basan en las ecuaciones lineales de elasticidad de los medios materiales. Esto es una extensión de la ley de Hooke a tres dimensiones. Las ondas elásticas en general son producidas por una perturbación y viajan por el medio hasta el detector. Los desarrollos de los temas citados a continuación están estudiados con distinta profundidad en Aki y Richards (1980), Achenbach (1973), Harker (1988) y Egle (1985).

1.2.1 Medio infinito isótropo

Para comenzar el estudio se aplican los fundamentos de la mecánica del continuo en el caso más simple que es un sólido lineal, elástico e infinito.

A partir de los conceptos de tensor deformación y tensor de tensiones, se aplica una fuerza F en un punto de la superficie del cuerpo. Luego se plantean la conservación de la cantidad de movimiento y de la energía. Esta última, a través de la suposición de elasticidad de Green y de la relación de Cauchy aplicada para pequeñas deformaciones, lleva a una relación lineal llamada ecuación constitutiva tensión-deformación,

$$\tau_{ij} = c_{ijkl} e_{kl} \quad (1.2)$$

donde c_{ijkl} es la matriz de constantes elásticas. La matriz en principio tendría 81 componentes, pero por simetrías se reducen a 21 para los materiales hiperelásticos y 36 para los elásticos. Siguiendo las restricciones de las simetrías, se puede disminuir el número de constantes como ocurre para el caso de un material isótropo. Por ejemplo en los materiales policristalinos de tamaño de grano pequeño se puede suponer isotropía, quedando solo dos parámetros independientes que son las constantes de Lamé: λ y μ .

$$c_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu \delta_{ik} \delta_{jl} + \mu \delta_{il} \delta_{jk} \quad (1.3)$$

$$\tau_{ij} = \lambda e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (1.4)$$

Donde δ_{ij} corresponde a la delta de Kronecker

Las constantes elásticas están relacionadas por funciones con los módulos de Bulk (B), de Young (Y) y relación de Poisson (ν):

$$B = \lambda + \frac{2}{3}\mu \quad (1.5)$$

$$Y = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (1.6)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (1.7)$$

Cuando la conservación de momento se combina con la ecuación constitutiva se llega a una ecuación de ondas expresada en términos del desplazamiento que para medio isótropo y homogéneo queda:

$$(\lambda + \mu)u_{i,jj} + \mu u_{i,jj} + \rho f_i = \rho u_{i,tt} \quad (1.8)$$

Donde

λ y μ : constantes de Lamé

ρ : densidad del medio

La notación de $u_{,,\mu}$ corresponde a diferenciación respecto de la variable después de la coma y suma sobre los índices repetidos.

El método más conveniente para resolver esta ecuación es a través de los potenciales, donde para el desplazamiento:

$$\vec{u} = \vec{\nabla}\phi + \vec{\nabla} \times \vec{\Psi} \quad (1.9)$$

$$\text{Más la condición adicional de} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{\Psi} = 0 \quad (1.10)$$

$$\text{Y para la fuerza:} \quad \vec{f} = \vec{\nabla}\alpha + \vec{\nabla} \times \vec{\beta} \quad \text{con} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{\beta} = 0 \quad (1.11)$$

Para las ondas

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2\phi + \rho\alpha = \rho\phi_{,,\mu} \quad \text{Ecuación escalar de ondas} \quad (1.12)$$

$$\mu\nabla^2\vec{\Psi} + \rho\vec{\beta} = \rho\vec{\Psi}_{,,\mu} \quad \text{Ecuación vectorial de ondas} \quad (1.13)$$

$$\text{De (1.11)} \quad c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{velocidad de fase de ondas compresivas o longitudinales} \quad (1.14)$$

$$\text{De (1.12)} \quad c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{velocidad de fase de ondas transversales o de corte.} \quad (1.15)$$

Las velocidades de fase son aquellas de puntos determinados de la onda. El cociente de las velocidades de fase longitudinal y transversal es:

$$\frac{c_p}{c_s} = \sqrt{\frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}} \quad (1.16)$$

Soluciones temporales armónicas

Ondas armónicas de la forma

$$\phi = Ag(\vec{k}_p \cdot \vec{r} - \omega t) \quad (1.17)$$

son solución de la ecuación escalar de ondas con desplazamiento paralelo al vector de onda.

$$u = A\vec{k}_p g'(\vec{k}_p \cdot \vec{r} - \omega t) \quad (1.18)$$

Mientras que

$$\vec{\Psi} = \vec{B}h(\vec{k}_s \cdot \vec{r} - \omega t) \quad (1.19)$$

es solución de la ecuación vectorial con desplazamiento perpendicular al vector de onda

$$\vec{u} = \vec{k}_s \times \vec{B}h'(\vec{k}_s \cdot \vec{r} - \omega t) \quad (1.20)$$

Velocidad de grupo.

Representa la velocidad de la suma de ondas que forman un paquete o grupo.

$$\text{La velocidad de grupo puede calcularse como: } v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (1.21)$$

Velocidad de propagación de la energía

Puede calcularse como el cociente entre la densidad de flujo de potencia promediada en t y la densidad de energía almacenada en la onda elástica promediada en el tiempo.

El flujo de energía a través de un elemento de área es la tasa de deformación por la tracción

$$dF = \bar{u}_j \cdot \bar{\tau} dS \quad (1.22)$$

Luego, el flujo de energía por unidad de área es:

$$\bar{F} = \bar{u}_j \cdot \bar{\tau} \quad (1.23)$$

El modulo de $\bar{F}$ es la intensidad.

La densidad de energía se calcula como:

$$K + U = \frac{1}{2} \rho u_{i,l} u_{i,l} + \frac{1}{2} c_{ijkl} e_{ij} e_{kl} \quad (1.24)$$

donde K y U son las energías cinética y de deformación.

En general la velocidad de grupo (v_g) es coincidente con la velocidad del transporte de energía.

Esto es valido para medios no disipativos.

1.2.2 Impedancia

Da la respuesta del sistema a un estímulo externo. Suele usarse para cuantificar las discontinuidades de medios por ejemplo para problemas de refracción y reflexión. La impedancia elastodinámica o acústica se define como el cociente entre la fuerza y la velocidad de propagación. La fuerza será la tensión o tracción y la impedancia es una cantidad matricial.

Para un medio isótropo la impedancia será:

$$\text{Para una onda de compresión} \quad Z_{ij}^p = \rho c_p \delta_{ij} \quad (1.25)$$

$$\text{Para una onda de corte} \quad Z_{ij}^s = \rho c_s \delta_{ij} \quad (1.26)$$

1.2.3 Presencia de discontinuidades en el medio

Las discontinuidades alteran la separación en ondas puras de compresión y corte. Aparecen dos clases de efectos:

1. Reflexión, refracción y conversión de modos.
2. Ondas superficiales y ondas guiadas.

1.2.3.1 Reflexión, refracción y conversión de modos

Sean ondas planas que inciden oblicuamente sobre una superficie plana. Las ondas tipo P producen movimientos de las partículas materiales o desplazamientos paralelos a la dirección de propagación de la onda, mientras que en las tipo S ese movimiento es transversal a la propagación. Cuando las ondas S inciden con un ángulo sobre una superficie plana, el plano de polarización de S, se puede descomponer en dos componentes transversales, siendo SH (H: horizontal) la componente paralela a la superficie incidida y SV (V: vertical) la componente transversal a SH. Esta denominación se origina en la geofísica.

Se escriben los potenciales para ondas planas (P, SV y SH) incidentes, transmitidas y reflejadas, en términos de funciones exponenciales, y se pide que los potenciales a ambos lados del contorno cumplan:

$$\phi = \phi' + \phi'' \quad \text{y} \quad \Psi = \Psi^{t,SH} + \Psi^{r,SH} + \Psi^{t,SV} + \Psi^{r,SV} \quad (1.27)$$

En función de los potenciales, los desplazamientos de las ondas P y SV serán

$$u_x = \phi_{,x} - \Psi_{v,z} \quad (1.28)$$

$$u_z = \phi_{,z} - \Psi_{v,x} \quad (1.29)$$

$$\tau_{vz} = \mu(2\phi_{,vz} - \Psi_{v,zz} + \Psi_{v,xx}) \quad (1.30)$$

$$\tau_{xx} = \lambda(\phi_{,xx} + \phi_{,zz}) + 2\mu(\phi_{,zz} + \Psi_{v,zz}) \quad (1.31)$$

Mientras que para las SH:

$$u_y = \Psi_{x,z} - \Psi_{z,x} \quad (1.32)$$

$$\tau_{x,y} = \mu(\Psi_{x,zz} - \Psi_{z,xz}) \quad (1.33)$$

Se observa que las ondas tipo P y las SV están mezcladas por lo que al interactuar con la interfase producirán conversiones de modo. Eso no ocurre con las SH. Este problema se puede estudiar en dos casos el primero para la incidencia de ondas tipo SH y luego para la incidencia de ondas tipo P y SV. Para las ondas transversales se puede separar el comportamiento en ondas SH y SV. Las ondas SH que inciden sobre una superficie libre, presentan el caso más sencillo de análisis.

1.2.3.1.1. Reflexión de ondas tipo SH

Un contorno rígido impone desplazamientos nulos en su superficie ($x=0$), mientras un contorno libre impone tracciones nulas. Se verifica que para ambos casos el ángulo de reflexión es igual al de incidencia. También los módulos de la amplitud de las ondas incidente y la reflejada serán iguales para ambos tipos de interfase, pero lo que cambia para cada caso es la fase de la onda reflejada ya que para el contorno rígido la reflejada tendrá un desfase en π , mientras que en la superficie libre de tracción no habrá cambio de fase.

1.2.3.1.2 Reflexión de ondas P y SV

Como se ve en las ecuaciones de desplazamiento las ondas compresivas y las de corte están interrelacionadas, lo que produce la conversión de modos. Esto permite que una onda P, o una onda SV, que incidan sobre la interfase puedan dar ambas ondas P y S reflejadas. En la resolución, para que se cumplan las condiciones de contorno aparece una condición que es:

$$k_p \sin \theta_p = k_s \sin \theta_s \quad (1.34)$$

Esta puede reescribirse como un análogo elástico de la Ley de Snell:

$$\frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_s} = \frac{c_p}{c_s} \quad (1.35)$$

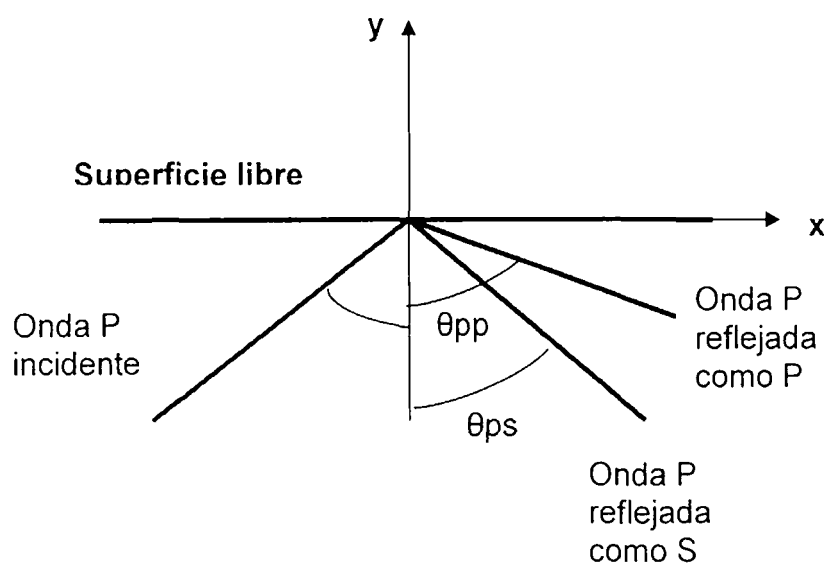


Fig. 1.2. Reflexión de ondas P en una superficie libre.

Para una onda P incidente los coeficientes de reflexión serán:

$$\text{Para P reflejada como P} \quad R_{pp} = \frac{\sin 2\theta_p \sin 2\theta_{rs} - (c_p / c_s)^2 \cos^2 2\theta_{rs}}{\sin 2\theta_p \sin 2\theta_{rs} + (c_p / c_s)^2 \cos^2 2\theta_{rs}} \quad (1.36)$$

$$\text{Para P reflejada como S} \quad R_{ps} = \frac{2 \sin 2\theta_p \cos 2\theta_{rs}}{\sin 2\theta_p \sin 2\theta_{rs} + (c_p / c_s)^2 \cos^2 2\theta_{rs}} \quad (1.37)$$

Para una onda SV incidente el coeficiente de reflexión será:

$$\text{Para S reflejada como P} \quad R_{sp} = \frac{-2(c_p / c_s)^2 \sin 2\theta_p \sin 2\theta_s}{\sin 2\theta_p \sin 2\theta_s + (c_p / c_s)^2 \cos^2 2\theta_s} \quad (1.38)$$

$$\text{Para S reflejada como S} \quad R_{ss} = \frac{\sin 2\theta_{is} \sin 2\theta_{rp} - (c_p / c_s)^2 \cos^2 2\theta_{is}}{\sin 2\theta_{is} \sin 2\theta_{rp} + (c_p / c_s)^2 \cos^2 2\theta_{is}} \quad (1.39)$$

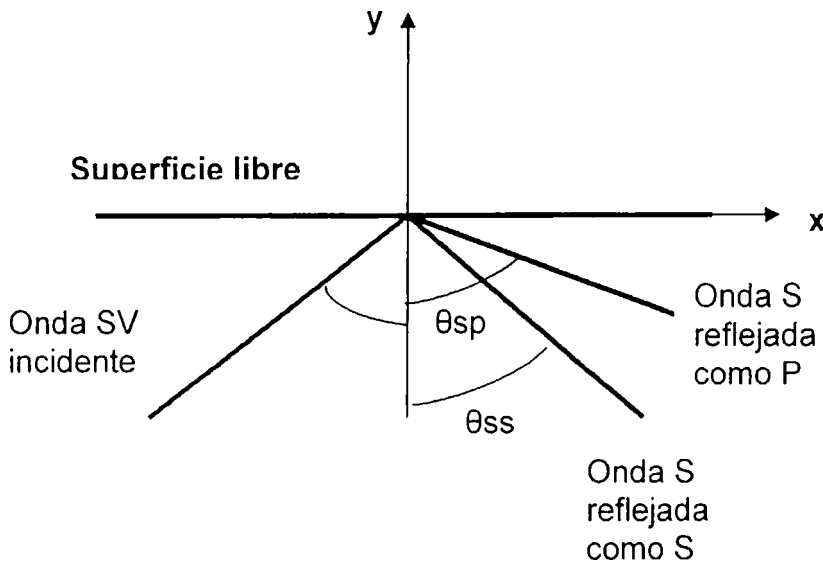


Fig. 1.3. Reflexión de ondas S en una superficie libre.

En el caso de SV incidente existe un ángulo crítico en el cual la onda P se propaga por la interfase ($\theta_p = 90^\circ$), esto es cuando:

$$\sin \theta_c = \frac{c_s}{c_p} \quad (1.40)$$

1.2.3.1.3 Reflexión y transmisión entre dos sólidos de materiales diferentes

Se pueden calcular la reflexión y la refracción de ondas en la interfase entre dos medios de diferentes materiales. En esa interfase se debe requerir la continuidad de tensiones y desplazamientos para las componentes normales y tangenciales. En algunos casos, la interfase no puede transmitir los esfuerzos de corte y solo transmite la componente normal. En esa situación podría no haber continuidad en la componente tangencial.

Para el caso de continuidad de ambas componentes para ondas tipo P y SV, será:

$$\tau'_{xx} + \tau''_{xx} = \tau'_{xx} \quad (1.41)$$

$$\tau'_{xz} + \tau''_{xz} = \tau'_{xz} \quad (1.42)$$

$$u'_x + u''_x = u'_x \quad (1.43)$$

$$u'_z + u''_z = u'_z \quad (1.44)$$

Con las cuatro condiciones de contorno, se puede resolver un sistema de ecuaciones para P y SV incidentes, reflejadas y transmitidas. La solución puede realizarse de manera numérica.

Si se representa por ejemplo una capa de acoplante entre el espécimen y el sensor. Haciendo simplificaciones como incidencia normal y ausencia de conversión de modos, y usando el concepto de impedancia, si la onda incide de un medio con Z_1 a otro de Z_2 , la relación entre las potencias reflejada e incidente y transmitida e incidente serán:

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{(Z_{11} - Z_{12})^2}{(Z_{11} + Z_{12})^2} \quad (1.45)$$

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{4Z_{11}Z_{12}}{(Z_{11} + Z_{12})^2} \quad (1.46)$$

Con $Z_{11} = \rho_1 c_{L1}$ y $Z_{12} = \rho_2 c_{L2}$ (1.47)

P_i, P_r y P_t son las potencias de las ondas incidente, reflejada y transmitida respectivamente.

1.2.3.2 Ondas superficiales y ondas guiadas

1.2.3.2.1 Ondas de Rayleigh o de superficie

Rayleigh estudió las soluciones de las ecuaciones para una superficie libre sobre la cual no incidían ondas, encontrando la solución para otro modo de propagación que son las ondas superficiales. De la resolución de las ecuaciones para el desplazamiento de las ondas en la superficie llegó a una condición sobre c_R la velocidad de las ondas R (de Rayleigh) tal que:

$$c_R = \alpha c_s \quad (1.48)$$

La resolución da tres soluciones dos de ellas complejas tomándose la real como c_R .

Los desplazamientos normal y tangencial de la superficie están desfasados en $\pi/2$ por lo tanto el movimiento de las partículas materiales de la superficie es en forma elíptica. Estas ondas decaen menos que las P o las S, (como $r^{-1/2}$ en vez de r^{-1}) por lo tanto sus amplitudes son mayores (p.ej.: son las ondas que mayor devastación causan en un terremoto). Por este motivo y dado que los sensores de EA se colocan en la superficie contribuyen de manera relevante.

Un valor aproximado de c_R puede calcularse de la fórmula de Bergmann donde ν es el coeficiente de Poisson del medio, siendo para los casos más comunes c_R un poco menor que la c_s

$$\alpha = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (1.49)$$

La penetración de las ondas R en el material se considera no mayor que una o dos longitudes de onda.

1.2.3.2.2 Ondas Guiadas

Sean ondas armónicas propagándose por un cuerpo extendido con una sección de corte de dimensiones finitas, por ejemplo una placa plana de espesor $2h$. En ese caso las ondas se reflejarán una y otra vez entre los planos. Estas ondas incidentes y reflejadas formaran ondas estacionarias. Estas ondas podemos representarlas en el modo SII siendo paralelas al plano de la placa (u horizontales), o en modos P y S propagándose en el plano formado por la normal a la placa y la dirección de propagación, siendo el segundo caso el de las ondas de Lamb.

Para el estudio de ambos casos podemos separar el problema según los modos de propagación, sin analizar las reflexiones de las ondas como en el sólido semi-infinito, sino estudiando el problema estacionario a través de la sección de corte y de ondas viajeras en la dirección de la propagación en la guía de onda.

Ondas en el modo SII

En primer lugar en la placa habrá una propagación del modo SII (en la dirección perpendicular al plano de propagación, paralela a la placa, u horizontal). Ondas incidentes en el modo SII, que se reflejan en ambas superficies libres interferirán constructivamente para dar un

patrón estacionario. A través de consideraciones geométricas del frente de ondas se llega a una ecuación de frecuencias posibles de los modos de propagación. Eso también puede alcanzarse a partir de la ecuación de ondas [Achenbach (1973)]. A cada frecuencia le corresponderá un modo de propagación. Cada uno de estos transporta energía. La energía se propagará con una velocidad igual a la velocidad de grupo.

Ondas en el plano de propagación (de Lamb)

Las ondas de Lamb se propagan en sólidos acotados de espesores característicos menores o del orden de la longitud de onda de la propagación. Aunque el formalismo planteado por Horace Lamb en 1917 era para una placa infinita de espesor $2h$, este puede extenderse a tubos o cilindros sólidos.

Para la placa infinita, la propagación se produce mediante complejas conversiones entre los modos P y S, aunque la energía se conserva en el sistema.

En las ondas P y SV en una placa elástica se puede hacer un estudio similar que el anterior, pero ahora utilizando los potenciales considerando soluciones de la forma:

$$\phi = \Phi(z) \exp[i(kx - \omega t)] \quad (1.50)$$

$$\text{con} \quad \Phi(z) = A \cos(pz) \quad (1.51)$$

$$\text{donde} \quad p^2 = \frac{\omega^2}{c_p^2} - k^2 \quad (1.52)$$

$$\psi = \Psi(z) \exp[i(kx - \omega t)] \quad (1.53)$$

$$\text{con} \quad \Psi(z) = B \sin(qz) \quad (1.54)$$

$$\text{donde} \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_s^2} - k^2 \quad (1.55)$$

Luego al calcular los desplazamientos se observa que estos serán simétricos y antisimétricos, respecto de un plano que corta al medio en espesor a la placa, es decir el plano con $z=0$.

Las ecuaciones características para las ondas de Lamb que se deducen de las tensiones en las superficies serán:

$$\frac{\tan(1-\nu)^{1/2} \Omega}{\tan(\kappa-\nu)^{1/2} \Omega} = \left[\frac{4\nu(1-\nu)^{1/2} (\kappa-\nu)^{1/2}}{(2\nu-1)^2} \right]^{+1} \quad (1.56)$$

Con el exponente positivo para el caso simétrico y el negativo para el antisimétrico, y donde:

$$\Omega = \frac{\omega h}{c_s} \quad (1.57)$$

$$\kappa = \left(\frac{c_s}{c_p} \right)^2 \quad (1.58)$$

$$\nu = \left(\frac{c_s}{\nu} \right)^2 \quad (1.59)$$

ν es la solución de la Ec. 1.55 que permite obtener la velocidad de fase de las ondas propagándose sin atenuación. Corresponde a ondas P y S propagándose con ángulos θ_p y θ_s respecto de la normal al plano de la placa. Al igual que en la descripción de Rayleigh el movimiento de las partículas por las ondas de Lamb es elíptico.

Tanto la velocidad de fase como la de grupo dependen de la frecuencia de las ondas. En general solo ciertos valores de ν están permitidos por la condición de interferencia entre las ondas reflejadas en las superficies de la placa. Como ν es una función de Ω las ondas son dispersivas. Los modos son llamados s o a dependiendo de la simetría. Son discretos y numerados desde cero

en adelante. En el limite de la alta frecuencia la velocidad de fase tiende a c_s . Lo mismo ocurre

para la velocidad de grupo:

$$v_{gi} = \frac{v}{1 - \frac{\Omega}{v} \frac{\partial v}{\partial \Omega}} \tag{1.60}$$

En la Fig. 1.4 se pueden ver las velocidades de fase y grupo de los distintos modos simétricos y antisimétricos en función de la frecuencia para un acero cuyas velocidades longitudinal y transversal son de 5900 m/s y 3100 m/s respectivamente con un espesor de placa de 10 mm.

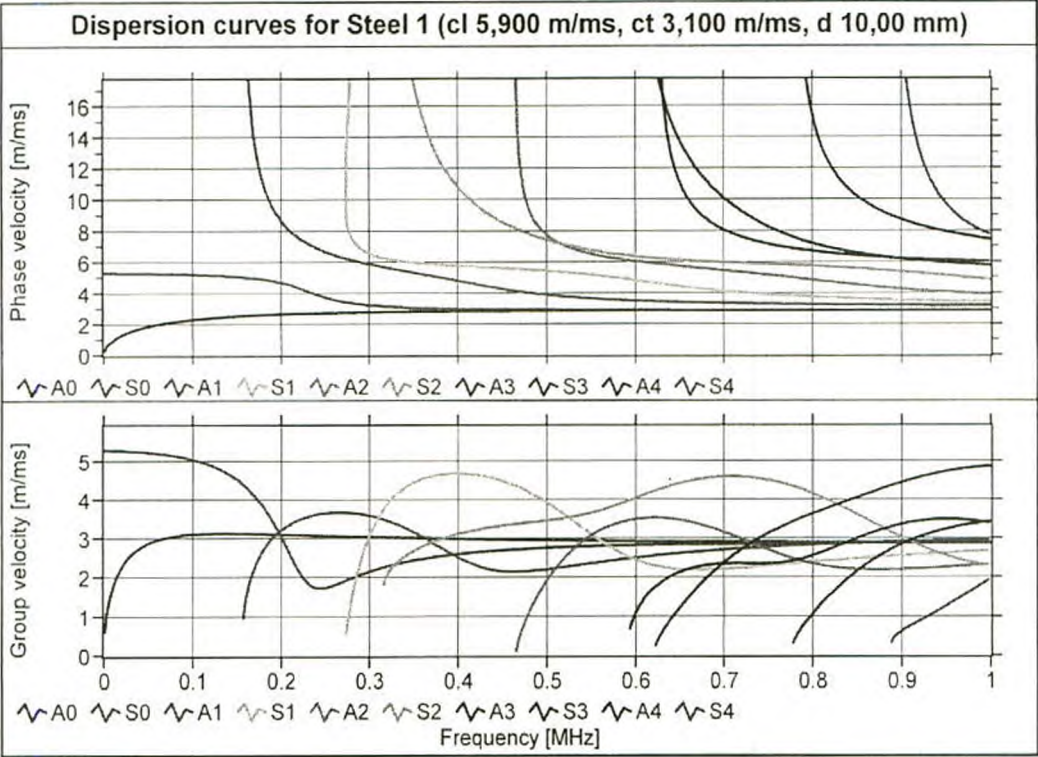


Fig. 1.4. Velocidades de fase y grupo en función de la frecuencia para acero [programa Disperse Vallen System usado para el cálculo].

El orden cero comienza en frecuencia cero y muestra un modo extensional y otro flexural. En el primero el movimiento elíptico esta en el plano de la placa y en el segundo modo en el plano perpendicular a esta. En este orden el modo *s* tiene menor amplitud que el *a*. También es más fácil de excitar y lleva la mayor parte de la energía. Los órdenes mayores aparecen a frecuencias relacionadas con las frecuencias de resonancia de la placa. A grandes frecuencias, todos los órdenes convergen a la velocidad de las ondas de corte. Por esta razón las ondas que se mueven a velocidades de Rayleigh y de corte son importantes en placas de espesor grande, entonces la mayor parte de la energía se propaga con velocidades cercanas a c_s .

Cuando una onda de Lamb se propaga en una placa transfiere la energía paralela a las superficies de la placa, solo el flujo de energía en la dirección de propagación tiene media no nula.

El modelo de la placa infinita se puede extender a un cilindro infinito en donde las ecuaciones de movimiento se escriben en coordenadas cilíndricas, en las que las soluciones de la parte de la interferencia, en lugar de senos y cosenos, serán funciones de Bessel.

Las ondas de Lamb son de gran importancia en los ensayos de EA, tanto en laboratorio como para END en la industria, ya que en general se está en la condición de que la longitud de onda es del orden o mayor que las longitudes típicas de la sección de corte del material de las probetas o componentes. Como ejemplos se pueden citar una probeta de tracción o un tanque cilíndrico o esférico.

1.2.3.2.3 Ondas de Love.

La extensión de la solución de Rayleigh de partículas moviéndose en un medio semi-infinito, en la superficie, en el plano de propagación, para ondas SH da resultados inapropiados, en discordancia con resultados experimentales de la geología. La solución de este problema la realizó Love describiendo al problema geológico como un medio semi-infinito cubierto por una delgada capa de otro material. Esto dio el resultado de ondas dispersivas propagándose por la capa con distintos modos de propagación, en diferencia con las de Rayleigh, que son dispersivas.

1.2.4 Atenuación de las ondas

Cuando las ondas elásticas se propagan en un medio material, se produce una atenuación o disminución de la amplitud debida a diferentes mecanismos [Papadakis (1965)] [Truell y otros (1969)] [Gómez (2003)] [Gómez y otros (2005)]. La primera causa de atenuación se debe a factores geométricos. En estos se puede encuadrar tanto a la atenuación geométrica que no depende del medio, como a la debida a la difracción que si depende. Luego hay otros factores dependientes del medio que contribuyen a la atenuación tal como las pérdidas magneto y termoelásticas.

1.2.4.1 Atenuación geométrica

Si se emiten ondas desde un origen localizado, que para facilitar la visualización se podría considerar como cuasi-puntual, al propagarse el frente de onda alejándose de la fuente se va expandiendo (en tres dimensiones va aumentando su superficie) produciendo una disminución de la intensidad es decir la potencia (energía por unidad de tiempo) emitida por unidad de superficie, siendo esto independiente de otros posibles mecanismos de atenuación. De esta manera se ve que la disminución del valor de la amplitud, no implica necesariamente una pérdida en la energía de la onda, sino que puede ocurrir una redistribución de la misma. Esta atenuación no depende del medio sino de la fuente emisora.

1.2.4.2 Atenuación por difracción

Es debida a discontinuidades en el material (complejos contornos, agujeros, cavidades, inclusiones, fisuras, granos, etc.) y depende de la longitud de onda. Se origina dentro del sólido con objetos que actúan en mayor o menor medida como difractores según la longitud de la onda. En el rango de la EA la difracción es notable por la presencia de defectos del material.

En este caso distintas partes de la onda siguen por diferentes caminos, disminuyendo la intensidad en ciertas zonas y aumentándola en otras. Estos fenómenos han sido ampliamente estudiados en la literatura para las ondas en general y para ondas elásticas como el ultrasonido [Merkulov (1956)] [Merkulov (1957)] [Papadakis (1965)] [Truell y otros (1969)] [Papadakis (1972)]. Un mecanismo similar al anterior sucede con el fenómeno de desdoblamiento.

1.2.4.3 Atenuación por absorción y amortiguamiento o pérdidas genuinas

La amplitud decrece exponencialmente con la distancia dependiendo de las propiedades del material y la frecuencia. En general para las pérdidas genuinas la atenuación crece proporcionalmente a la frecuencia, es decir a mayor frecuencia habrá mayor atenuación. En estas pérdidas “genuinas”, hay disminución de la energía por interacción con el medio y pueden asociarse a efectos magnetoelásticos, termoelásticos, etc. En general, en una situación concreta ocurre la combinación de la mayor parte de los fenómenos mencionados. Como regla se puede afirmar que la atenuación es dependiente de la frecuencia de la onda, siendo mayor a medida que ésta aumenta. [Merkulov (1957)] [Papadakis (1965)] [Truell y otros (1969)] [Gómez (2000)] [Gómez y otros (2005)]

1.3. Fuentes de EA

1.3.1 Modelos estático y dinámico de fuentes de EA

En los sólidos, repentinos cambios transitorios de la tensión local y del campo de deformaciones de un cuerpo elástico producen la radiación de ondas elásticas [Achenbach (1973)] [Aki y Richards (2002)]. De esa manera en un sólido se pueden producir diferentes tipos de fuentes de EA a partir de: el crecimiento de fisuras, la deformación plástica con el movimiento de dislocaciones, la separación de interfases, la corrosión, la separación fibra-matriz en materiales compuestos, el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, transformaciones de fase, descargas parciales en dieléctricos, etc.

Se esperaría que las señales de EA provean información sobre las características dinámicas de tales procesos. El trabajo hecho externamente sobre un espécimen genera ondas elásticas que se manifiestan como ondas que se propagan en el material.

Una fuente de EA se la puede considerar como un radiador de ondas de energía elástica. Parámetros microscópicos como la tensión y la deformación en volumen permiten obtener una solución estática del problema, sin tener en cuenta los mecanismos de relajación de la fuente. Por otro lado pueden usarse los campos de tensión y deformación locales, variables en el tiempo, cerca de la fuente para calcular los cambios dinámicos asociados con la emisión [Wadley y otros (1980)].

Los modelos de fuente estática estudian como se distribuye la energía producida por una fuente, para generar ondas elásticas. En general se puede dividir entre: la energía superficial (creación de fisuras o deslizamiento), la energía de las redes de dislocaciones y la generación de calor por deformación plástica. Solo una pequeña fracción de la energía disponible se irradia como ondas elásticas transitorias de EA que finalmente pasan a energía térmica. Si el modelo fuera totalmente elástico las ondas seguirían reflejándose indefinidamente. La idea del modelo estático es poder relacionar los mecanismos de la emisión (p.ej. la mecánica de fractura) con los procesos microscópicos de fractura, a partir de la medición de la energía de la emisión acústica. Eso sería posible si se conociera como se distribuye la energía en los distintos mecanismos, entonces se podría estimar la energía de la fuente, cosa que no es simple en la práctica. La fracción de la energía irradiada como ondas elásticas depende de diversos factores como el proceso de emisión (fuente), o de las propiedades y morfología del medio de propagación (material estudiado). Un ejemplo de esta indeterminación es como la función de distribución de la energía varía para cada fuente. Aunque se conociera la distribución, la fracción de energía de la onda elástica detectada por el transductor podría variar dependiendo de la posición de la fuente. La proporción de energía emitida que alcanza al sensor es una función compleja de la fuente, la probeta y las propiedades del sensor.

Los primeros **modelos de fuentes dinámicas de EA** consideraban que la EA se generaba por mecanismos de relajación, basados en una masa y dos resortes [Pollock (1975)]. Luego Mirabile (1975) aplicó la analogía de Eshelby (1962) de suponer que al igual que las cargas eléctricas aceleradas, las dislocaciones al acelerarse irradiarían en el medio un campo de oscilaciones elásticas, y propusieron un modelo en función de los parámetros de las dislocaciones. Posteriormente se han hecho aproximaciones de las fuentes por métodos análogos a los usados en sismología para modelar terremotos. Estos modelos utilizan la función de Green. En el trabajo de Pekeris y Lifson (1957) se muestra que es posible relacionar la variación en el tiempo de una forma de onda del desplazamiento de una superficie, a la dependencia temporal de la relajación de la fuerza de un evento de una fuente monopolar [Pekeris y Lifson (1957)]. Para eso calcularon las componentes vertical y horizontal del desplazamiento de la superficie en un medio semi-infinito para una fuente dependiente del tiempo por una función de Heaviside. Luego esa idea se extrapoló de la geología al estudio de la EA cuando distintos autores como Breckenridge (1982)

y Scruby y otros (1978) utilizaron la fractura de distintos materiales tales como probetas de acero, capilares de vidrio y minas de lápiz como fuentes de ondas elásticas. Otra cosa que mostraron Pekeris y Lifson fue que la función desplazamiento de la superficie depende muy sensiblemente de la distancia (sobre la superficie) del observador al epicentro. Si la distancia es grande el desplazamiento de la superficie es dominado por ondas superficiales.

Scruby y otros (1983) han planteado un importante criterio de detectabilidad basado en los modelos de la función de Green con el cual se pueden hallar cotas para el desplazamiento de la superficie de un medio semi-infinito para distintos tipos de fuente, tales como: dislocaciones simples y un número grande de ellas (avalanchas), fisuras frágiles y dúctiles, así como también para cambios de fase, en función de las posibilidades de los sensores. En general este tipo de fuentes activadas por sollicitaciones mecánicas externas suelen ser de menor amplitud que otras que se activan en transformaciones de fase o por corrosión. La base de ese modelo es tratada a continuación.

1.3.2 Modelo de emisor microscópico en medio semi-infinito

Sea una discontinuidad que se encuentra a una profundidad r de la superficie de un medio semi-infinito. Factores externos inducen un cambio de tensión en la discontinuidad emitiendo ondas elásticas. Se supone emisor puntual y por lo tanto ondas esféricas. Entonces causará un desplazamiento dependiente del tiempo en la superficie, el cual dependerá de la distancia al cuadrado, de la directividad de la fuente y de las reflexiones y conversiones de modo. Este desplazamiento generado por ondas P, S y R, se estudia en las componentes vertical y horizontal [Pekeris y Lifson (1957)]. Luego, un sensor en la superficie convertirá el movimiento de la misma en voltaje. El análisis se hace considerando un aparente cambio de tensión dentro de la estructura y una fuerza de tracción en la superficie, usando la aproximación de la función de Green

$$u_i(r, t) = \int dr' \int G_{ij,k'}(r, r', t - t') \Delta \sigma_{jk}(r', t') dt' - \int dS'_{k'} \int G_{ij}(r, r', t - t') \Delta \tau_{jk}(r', t') dt' \quad (1.61)$$

$G_{ij}(r, r', t)$: componentes del tensor de Green elastodinámica representando movimiento en la dirección x_i en el punto r y en función del tiempo t , producida por un impulso aplicado en r' en $t=0$ en la dirección x_j .

$G_{ij,k'}$ es la solución de la ecuación de onda para una fuerza .

$\Delta \sigma_{jk}$ y $\Delta \tau_{jk}$ son las variaciones de la tensión en volumen y la tracción en la superficie asociados con la fuente.

$G_{ij}(r, r', t)$ en la aproximación de fuentes infinitesimales puede expandirse como una serie que dará sucesivos órdenes, pudiéndose aproximar soluciones realistas contemplando solamente el primer orden (o fuente dipolar).

Luego puede incluirse el efecto del transductor al proceso de la señal. Se supone que el sensor no altera o carga el desplazamiento de la superficie. Sea S_T el área del sensor, $T_i(r, t)$ con $r \in S_T$ es la respuesta impulsiva puntual del sensor y está definida como el voltaje a tiempo t producido en el sensor por un desplazamiento que sin el sensor tendría una función δ en un punto r en la dirección x_i a $t=0$. Entonces el voltaje a tiempo t dado por una fuente infinitesimal, será:

$$V(t) = \int_{S_T} \int T_i(r, t - t') G_{ij,k'}(r, r_0', t' - t'') \overline{\Delta \sigma_{jk}}(t'') dr dt'' \quad (1.62)$$

Esta ecuación tiene la forma de convolución entre la función fuente, y las respuestas al impulso del espécimen y del sensor. Pudiéndose escribir en el dominio del tiempo como:

$$V(\omega) = T_i(\omega) G_{ij,k'}(\omega) \overline{\Delta \sigma_{jk}}(\omega) \quad (1.63)$$

Entonces para un semi-espacio lineal elástico e isótropo la función de Green para una fuente a una distancia x_3 de la superficie en la cual hay sensores en campo lejano queda:

$$G_{jk,l}(t) \approx \frac{\delta_{l3}}{2\pi\rho x_3} \left[\frac{(\delta_{j3}\delta_{k3})\dot{\delta}(x_3 - \frac{t}{a})}{a^3} + \frac{(\delta_{jk} - \delta_{j3}\delta_{k3})\dot{\delta}(x_3 - \frac{t}{c})}{c^3} \right] \quad (1.64)$$

Y para que el desplazamiento sea detectado debe cumplirse que

$$d_j \leq \frac{\kappa(\tau)}{2\pi\rho x_3} \max_{t>0} \left[\frac{\delta_{j1}}{c^3} \Delta\sigma_{13}(x_3 - \frac{t}{c}) + \frac{\delta_{j2}}{c^3} \Delta\sigma_{23}(x_3 - \frac{t}{c}) + \frac{\delta_{j3}}{c^3} \Delta\sigma_{33}(x_3 - \frac{t}{a}) \right] \quad (1.65)$$

Nota: Aunque en los metales existen normalmente mecanismos no lineales (fricción interna), anisotropía (orientación de granos) pérdidas de energía, propagación no esférica, etc., que afectarán en mayor o menor grado, en general en los modelos se plantean linealidad, isotropía y elasticidad para describir el sólido oscilante.

1.3.3 Direccionalidad de las fuentes.

Otro factor que afecta la detectabilidad es la dirección en que emite la fuente. Dependiendo de la naturaleza física del proceso de emisión, la fuente podrá tener una fuerte direccionalidad en la irradiación de las ondas elásticas. En la Fig. 1.5 se detalla la dependencia angular de los distintos tipos de fuentes de EA. En Scruby (1985) se detalla la directividad para fuentes primarias y secundarias, y en Grosse y Linzer (2008) se retoma ese tipo de análisis.

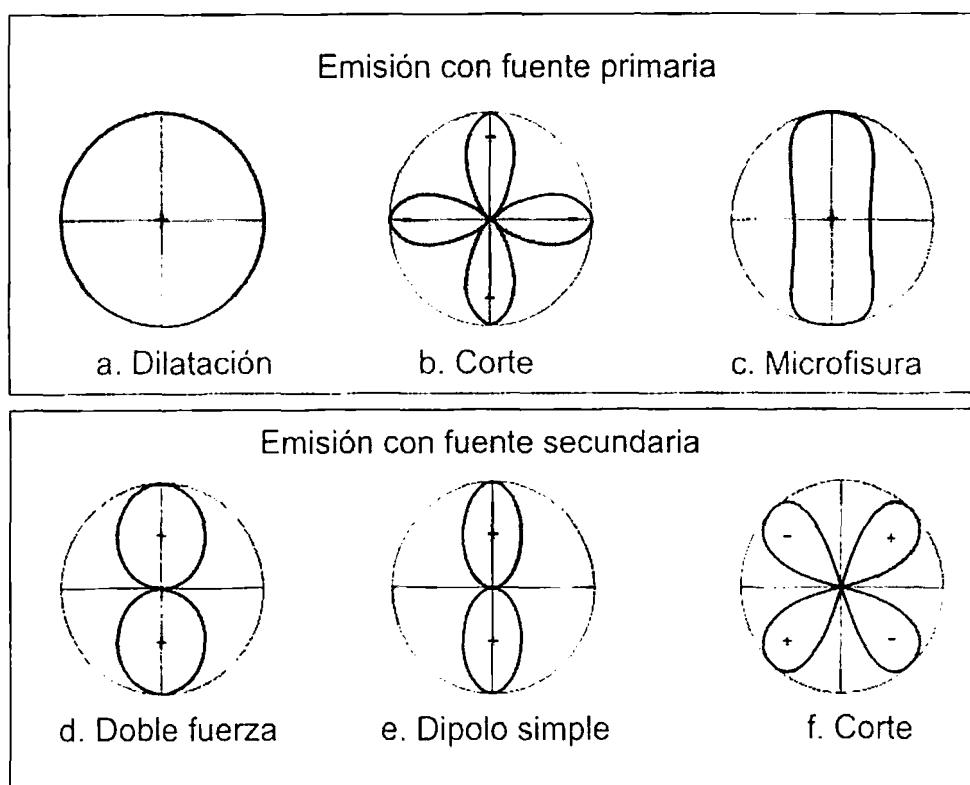


Fig. 1.5. Emisión con fuentes primarias y secundarias de EA.

Efectos por probeta finita

Al utilizar probetas de tamaños que se alejan del modelo semi-infinito aparecen reflexiones múltiples, conversión de modos e interferencia. De esta manera las partes últimas de la onda representarán más a los modos normales de la probeta o espécimen a una estimulación de pulso transitorio y proveerán más información de la geometría de la probeta que de la fuente.

1.3.4 Descripción de distintos tipos de fuentes de EA

A continuación se mencionarán algunos de los mecanismos más importantes en la generación de ondas elásticas en la forma de EA. Entre estos podemos citar a la dinámica de las dislocaciones, el maclado, el movimiento de dominios magnéticos, distintos tipos de fracturas y fricción entre superficies.

1.3.4.1 Dislocaciones como fuentes de EA. Deformación plástica

El movimiento de dislocaciones es el principal mecanismo en la deformación plástica de los metales y otros sólidos cristalinos. Típicamente la energía total de la deformación se divide en una parte elástica que es reversible y otra que es el llamado trabajo plástico de deformación. Esta representa en gran parte la energía térmica por la generación de un gran número de fonones por el pasaje de las dislocaciones por la red cristalina. También incluye un pequeño componente, de aproximadamente el 10% de su total que representa el incremento del número de dislocaciones y otros defectos [Gillis (1972)] [Gillis y Hamstad (1974)].

El cambio de la energía con la variación de las configuraciones de dislocaciones puede considerarse como posible fuente de EA. Solo una pequeña parte de la deformación plástica es guardada en la red cristalina como campos residuales de deformación de los arreglos de dislocaciones. La mayor parte del trabajo realizado se dedica al incremento de la temperatura del material, atribuido al movimiento de las dislocaciones a través de la red cristalina que le entrega energía de vibración a los átomos que cruza.

Estimación de la detectabilidad de la EA producida por las dislocaciones

Wadley y Scruby utilizando el modelo de la sección anterior calcularon la detectabilidad de las inclusiones. Scruby y otros (1981) relacionó la amplitud pico del desplazamiento de la superficie de un material isótropo por el arribo de la onda longitudinal, con el crecimiento de un lazo de dislocaciones. Se supuso que el lazo está ubicado a una distancia D del epicentro, a 45° de la normal a la superficie y creciendo a velocidad constante v , desde cero al radio final r . La amplitud pico del desplazamiento se calculó como:

$$U = \frac{brvC_L^2}{DC_L^3} \quad (1.66)$$

Donde b es el vector de Burgers, y C_L y C_T son las velocidades de las ondas longitudinal y transversal respectivamente. Como ejemplo, usando valores típicos para el aluminio, $C_L=6400$ m/s, $C_T=3200$ m/s, $b=2,9 \times 10^{-10}$ m, si la velocidad de la dislocación es de 200 m/s, y la fuente está a 4 cm del epicentro, el pico de amplitud de desplazamiento, calculado para un lazo de dislocaciones expandiéndose hasta el radio correspondiente a un monocristal (4 mm de diámetro) es de 1×10^{-13} m. Este desplazamiento puede ser detectado por un transductor piezoeléctrico (los sensores comerciales pueden detectar desplazamientos del orden de 10^{-14} m). El movimiento de la fuente, no modifica considerablemente los resultados obtenidos [Ohtsu y Ono (1984)].

En materiales policristalinos comerciales, donde la distancia de deslizamiento de una dislocación es improbable que exceda los 20 ó 50 μm , no es probable que el movimiento de una sola dislocación produzca ondas elásticas detectables. Por lo tanto, con la posible excepción de los monocristales o muestras puras de grano grande, las ondas elásticas de EA detectables serán aquellas producidas por el movimiento simultáneo de muchas dislocaciones por ejemplo en la zona de fluencia. Esto fue corroborado experimentalmente [James y Carpenter (1976)].

En muchos casos (por ejemplo hierro de bajo carbono) durante la deformación en la zona de Lüders la tensión mecánica aumenta, debido a que las dislocaciones fueron frenadas por algún obstáculo. Luego, al aumentar más la tensión estas dislocaciones superan el obstáculo generando una avalancha, por lo tanto, cae la tensión mecánica, observándose un pico en la EA. Este fenómeno confirma lo dicho previamente. Similar es el caso donde se presenta el fenómeno de

Pôrtevin - LeChatelier en el cual se traban y destraban dislocaciones en átomos de soluto. Esto fue observado por Pascual (1974) y Hsu y Ono (1982).

Mecanismos de la EA por las dislocaciones

Existen varios mecanismos por los cuales las dislocaciones pueden crear ondas elásticas: la relajación de un campo de tensiones elásticas, causada por el pasaje de una dislocación, radiación emitida por una dislocación acelerada (analogía de Eshelby de la radiación de Bremstrahlung), fuentes de Frank-Read [Natsik y Chishko (1975)] aniquilación de dislocaciones, son todos posibles mecanismos, de los cuales muchos han sido justificados teóricamente.

Jax postuló como una posible fuente de EA el destrabe de dislocaciones resultantes en la propagación de grupos de dislocaciones a través del plano de deslizamiento [Wadley (1980)].

Ohtsu (1983) basado en la elastodinámica representó características espectrales de las dislocaciones que moviéndose generan EA, haciendo ensayos de compresión uniaxial.

Se ha estudiado que en metales, como por ejemplo Cu y Al, hay una abrupta liberación de dislocaciones de una fuente seguidas por su propagación en grupo de una fracción apreciable de los planos de deslizamiento del cristal.

Como se ha visto la EA puede ser radiación de Eshelby, o de otro modo, el reacomodamiento del campo de energía de deformación elástica seguido por una abrupta relajación plástica localizada. No todos los movimientos de las dislocaciones pueden ser detectados. Los grandes números de dislocaciones moviéndose serán más fácilmente detectados.

En la zona de fluencia, la cantidad de dislocaciones móviles convertidas en posibles fuentes de EA se ven incrementadas generando mucha EA. Luego en la zona plástica el mayor número de dislocaciones hace que estas se bloqueen entre si restringiendo la magnitud del deslizamiento y deteniéndolas (p.ej.: interacción de dislocaciones de foresta), en un fenómeno conocido como “endurecimiento por trabajado”. Eso causa la disminución o la pérdida de la EA detectable luego de altas deformaciones.

La relación entre la EA y la deformación dependerá de factores que afectan el deslizamiento como la orientación cristalina, la energía de falla de apilamiento, la composición, o la temperatura. La EA ha sido de gran importancia para los metalurgistas que estudian los mecanismos de deformación ya que como lo muestran muchos trabajos [Clough (1972)] [Schaarwächter y Ebener (1990)] las propiedades de las ondas elásticas generadas tienen una estrecha relación con la dinámica de los procesos estudiados.

Iatano (1975) estudió la energía de la EA en la deformación de aluminio puro observando que esta no es periódica sino aleatoria. Eso lo analizó mediante la autocorrelación de la señal que da una función monótona decreciente. La potencia al comienzo de la deformación fue de 5 pW, luego decayendo a 0,3 pW. El pico de energía que observó al comienzo lo supuso relacionado con la aceleración de dislocaciones por la concentración de tensiones en el borde de grano del material.

Influencia del tamaño de grano en la EA por dislocaciones (Policristales)

En un policristal, se suma a los efectos anteriores el tamaño de grano, el cual restringe el área en la cual ocurren los deslizamientos. De esta manera se reduce la aparición de EA. Hay muchos trabajos en la literatura que analizan esta dependencia [Heiple y Carpenter (1987a)] [Heiple y Carpenter (1987b)] [Pascual (1974)] [Tandon y Tangri (1975)] [Mintzer y otros (1978)] [Kim y Kishi (1978)] [Baram y Rosen (1980)] [Scruby y otros (1981)]. La conclusión que se puede sacar de tales estudios es que para los distintos casos tratados en esos trabajos la EA crece, disminuye o no se altera con el tamaño de grano. Eso se debe a que los mecanismos involucrados en la deformación son variados y complejos, con efectos que pueden actuar de manera cooperativa o cancelativa.

EA por bandas de Lüders

En algunas aleaciones base hierro como por ejemplo en aceros de bajo carbono se produce el efecto de iniciación y propagación de bandas de Lüders. Esto produce una importante

EA que ha sido estudiada en la literatura. En estos casos los picos observados en la curva tensión deformación correspondientes a la acción de los mecanismos que generan las bandas tienen un pico correspondiente en los gráficos de la EA (p.ej.: en número de cuentas vs. deformación).

1.3.4.2 EA por Maclado

Otro mecanismo de deformación plástica que genera ondas elásticas es el maclado. Este se produce cuando una porción del cristal cambia su orientación original a una nueva, perfectamente simétrica con la primitiva. La región maclada es una imagen especular del cristal original. El movimiento de los átomos durante el deslizamiento generalmente ocurre en múltiplos del espaciado interatómico, mientras que en el maclado, los movimientos atómicos son a menudo mucho menores que la distancia entre átomos.

Dado que las maclas de deformación liberan suficiente energía y lo hacen dentro de un tiempo muy corto, son excelentes fuentes de EA. Aun en algunos materiales, como el estaño y el zinc, la deformación por maclado produce EA en el rango audible, como fue comentado en un comienzo. Resumiendo, el movimiento cooperativo de una gran cantidad de átomos genera EA detectable.

1.3.4.3. Emisión Magneto-Acústica

En la zona de Hooke, para el caso de un material ferromagnético existe emisión por el movimiento de las paredes de los dominios ferromagnéticos del material.

Dadas las propiedades magnetostrictivas de los materiales ferromagnéticos, la aplicación de una tensión tiende a alinear los dominios tal que su tensión magnetostrictiva esta en la dirección de la tensión aplicada. La alineación de los dominios bajo una tensión aplicada es similar a aquella que aparece cuando un campo externo es aplicado, p.ej. cuando hay movimiento de paredes de dominios y rotación de dominios. [Higgins y Carpenter (1978)] [Webbhorn y Rawlings (1981)]

Para analizarla se supone que la estructura de dominios se encuentra estable, presentando un tamaño de los mismos constante. Al aplicar la carga se produce el movimiento simultáneo de una gran cantidad de átomos, ubicados en las paredes (de Bloch) de los dominios que cambian de orientación, generando EA. La magnitud de la distancia entre estas paredes es aproximadamente de algunos cientos de parámetros de red. El movimiento de los dominios también produce pequeñas variaciones del campo magnético, pudiéndose detectarlas por medio de una pequeña bobina próxima al metal. El fenómeno magnético se denomina “ruido Barkhausen” y el elástico “Emisión Magneto Acústica”.

1.3.4.4. EA por fractura

El crecimiento de fracturas en un material es una de las fuentes más importantes de EA. Tensiones y deformaciones variables son fuentes de ondas elásticas. Si la variación de tensión es grande y rápida, como en el caso de la fractura frágil, se generarán ondas elásticas de gran amplitud portando una parte importante de la energía de la fuente. Si la variación es lenta como en el caso de la fractura dúctil, gran parte de la energía va a la región de la punta de la fisura activando dislocaciones y agrandando una zona plástica relacionada con el crecimiento de la fisura. Ese mecanismo hace que la propagación no sea catastrófica y de esta manera menos energía será irradiada como ondas de EA. Scruby ha demostrado que la amplitud de la EA está relacionada con la variación de la energía liberada y no con su valor.

De esta manera la fisura frágil en general producirá una EA detectable mientras que la dúctil puede no serlo, dependiendo de otros factores como una prefisuración, o que crezca mucho. Sí, podría ser detectada la deformación producida en una fisura dúctil indetectable (muy lenta).

Múltiples fuentes producen EA durante el crecimiento de la fisura, aquellas relacionadas con la acumulación de daño en el material se denominan primarias. Las secundarias son aquellas fuentes que no indican el avance de la fisura (como la rotura de inclusiones o la fricción entre las caras de la fisura) [Scruby (1987)].

1.3.4.4.1 Fractura frágil por clivaje

La microfractura por clivaje o transgranular o fractura frágil es frecuente en el caso de que el material se encuentre debajo de la temperatura dúctil frágil, que puede ser la temperatura ambiente para muchos materiales como aceros, cerámicos, etc. También ocurre en materiales compuestos. En general ocurren en metales cúbicos de cuerpo centrado (bcc) y cristales iónicos, presentando fracturas antecedidas por cantidades menores de deformación plástica, con una fisura que se propaga rápidamente a lo largo de planos cristalográficos de baja energía superficial, llamados “planos de clivaje”.

1.3.4.4.2 Detectabilidad de la fractura por clivaje

Al igual que para las dislocaciones Wadley y Scruby han calculado el desplazamiento de la superficie de un espécimen para una microfisura horizontal por clivaje en acero. Los valores típicos que se han tomado para este cálculo son: 10 micrómetros de radio de la fisura, 1000 m/s su velocidad de propagación, una tensión aplicada de 500 MPa y una profundidad de 0,04 m. Haciendo los cálculos se determina que el desplazamiento vertical en el epicentro tendrá una amplitud de pico de $2,5 \cdot 10^{-11}$ m con una duración del orden de los 10 ns. Las señales de EA serán de considerable amplitud y ancho de banda de frecuencia.

1.3.4.4.3 Fractura frágil intergranular

Este tipo de fractura emite mucha EA. En general el radio de la fisura intergranular suele ser varias veces mayor que el correspondiente a las de clivaje, y en muchos casos las velocidades son casi tan altas, entonces la EA puede ser uno o dos órdenes de magnitud mayor que para el caso del clivaje. En muchas aleaciones, incluyendo los aceros, los bordes de grano suelen ser lugares debilitados del material, desde el cual comienzan a propagarse fallas. Los procesos de fragilización en borde de grano suelen estar promovidos por la segregación de elementos hacia ese contorno, como también por la aparición de nuevas fases frágiles en el mismo. Dependiendo del tipo de material, actuarán distintos mecanismos en el borde de grano tales como: descenso de la temperatura de transición dúctil-frágil, transición de modo de fractura (p.ej. de clivaje a intergranular), etc.

1.3.4.4.4 Fractura dúctil

El estudio de la EA producida por una fractura dúctil es un tema clave en la aplicación de este fenómeno como método de END. La razón es que la EA puede ser muy activa o muy poco activa para eventos con distintos mecanismos de relajación de la energía de deformación.

Para aceros de alta resistencia, hay EA en el período de expansión de la zona plástica pero la mayor parte de la actividad ocurre en el último 20% de la deformación. En aceros de baja resistencia, la mayoría de la EA ocurre durante el período de expansión de la zona plástica, mientras los incrementos del avance de la fisura se pueden considerar silenciosos. Esta pérdida de la emisión durante el avance de la fisura es un inconveniente al aplicar este método a la inspección de estructuras mecánicas construidas con estos aceros.

El mecanismo de la emisión por fractura dúctil ocurre cuando al cargar un material, que posee inclusiones estas concentran tensiones a su alrededor produciendo fisuras o desuniones. Las zonas entre las inclusiones sufren una deformación plástica que nuclea precipitados finos que a su vez nuclean huecos secundarios que se comienzan a unir y forman la grieta cuyo tamaño es la distancia entre inclusiones. El crecimiento de la fisura para materiales de baja resistencia a la fluencia y alta capacidad de endurecimiento por trabajado se hace de manera lenta y poco energética con un modo de coalescencia que se vuelve indetectable. Para los de alta resistencia y baja capacidad de endurecimiento por trabajado aparece una prematura coalescencia de los huecos por corte, ocurriendo a una velocidad no despreciable en pequeñas distancias del orden de la centena de micrones. Ese corte alternado es una fuente cuya EA puede detectarse.

1.3.4.5 EA por microfractura de inclusiones y precipitados

Inclusiones, precipitados y fases secundarias pueden ser frágiles a temperatura ambiente por lo que al sufrir una tensión aplicada pueden romperse de manera frágil. Una concentración de

tensiones ocurre en las partículas por la diferencia de propiedades elásticas con la matriz en la que están inmersas. Además la interfase de esas discontinuidades suele ser frágil y comienza a fallar a bajas solicitaciones. [Arieli y otros (1983)]

La EA dependerá del tipo de material matriz, del tipo de inclusión o precipitado tanto en los elementos que los conformen como en su tamaño, pudiendo ocurrir en función de las condiciones plantadas en distintas etapas de la sollicitación del material.

Se puede dividir el estudio de la EA según el tipo de material que presenta las inclusiones. Siendo en general los casos más tratados en la literatura de la EA en metales el de inclusiones en aleaciones base hierro y otro en aleaciones no ferrosas.

1.3.4.5.1 Inclusiones en aleaciones ferrosas.

Los posibles mecanismos más comunes de la EA por inclusiones en aleaciones base Fe están dados por:

- Fractura de carburos. La fractura de plateletas de carburos había sido propuesta en los comienzos de la EA como una posible fuente de EA pero varios trabajos posteriores indicaron que la rotura de carburos es indetectable con la instrumentación habitual de EA.
- Decohesión/fractura de inclusiones de MnS.

La fractura frágil de MnS es una importante fuente conocida de EA en aceros comerciales, en especial cuando no se activan modos de fractura frágil del material matriz. La emisión dependerá principalmente del contenido de azufre y de la orientación del espécimen respecto de los ejes de laminación.

1.3.4.5.2 Inclusiones y precipitados en aleaciones no ferrosas.

En aleaciones no ferrosas, por ejemplo en aleaciones base aluminio, la fractura de inclusiones genera gran cantidad de emisión acústica. En numerosos trabajos se estudió la fractura de inclusiones frágiles, determinándose la influencia de la morfología y composición de las mismas. La influencia del tamaño de las inclusiones en la EA no tiene un comportamiento uniforme, en algunos casos se verifica y en otros no. La topología de las ondas emitidas por la rotura de inclusiones por lo general es del tipo de explosión ("burst"). Eso puede observarse por ejemplo al solicitar una matriz de aluminio con inclusiones ricas en Cr, conteniendo trazas de otros elementos como Fe, Mn, Ti, Cu, etc. En general en estas aleaciones los precipitados no son tan grandes ni frágiles como las inclusiones, por lo tanto la EA prácticamente no será detectable.

1.3.4.6 EA por fricción

Algunos detalles del mecanismo de fricción serán dados en el próximo capítulo. Un completo y extenso análisis sobre la EA generada por la fricción se puede encontrar en Baranov y otros (2007). Básicamente se asume que la fricción es producida por varios efectos combinados como deformación de asperezas, barrido de asperezas duras, partículas desprendidas atrapadas y adhesión.

Los mecanismos de fricción y desgaste están relacionados con el material, el entorno, las condiciones de operación, la topografía de la superficie y el largo aparente de la superficie de contacto en la dirección de deslizamiento [Lingard y Ng (1989)] [Jiaa y Dornfeld (1990)].

Las dos fuentes potenciales de EA en la fricción son por un lado la deformación en la superficie y la sub-superficie y por otro la fractura de sólidos.

Haciendo una suma de los mecanismos, propuestos por Rigney y Hirth (1979) y por Baranov y otros (2007), que producen EA en los procesos que involucran fricción, se pueden citar mecanismos que producen eventos de disipación de la energía de deformación:

- Deformación anelástica asociada con irregularidades geométricas y termoclasticidad.
- Transformación de fase inducida por tensión y maclado.
- Generación, movimiento e interacción de dislocaciones.

Parte de la energía liberada en el material en forma de ondas de tensión elástica podrán ser detectadas por un transductor en la superficie como EA. En contacto de deslizamiento fuentes adicionales de EA de la fricción y de los procesos de desgaste incluyen:

- Nucleación de fisuras y propagación. Nuevas superficies.
- Cambios en el estado de tensiones de un volumen local de la capa sólida superficial
- Interacción elástica, impactos
- Golpes impulsivos dados por residuos.
- Micro vibración excitada por adherencia-deslizamiento (“stick-slip”) en la interface.

En la bibliografía se encuentran trabajos en los que se relaciona la EA y el trabajo de fricción. En Jiaa y Dornfeld (1990) se cita la tesis doctoral de Diei (1985) en la cual se estudiaron ensayos de deslizamiento de una punta sobre un disco (“pin-on-disk test”), y se encontró que el RMS de la EA estaba relacionado con la disipación de energía de fricción. Esta relación era una función del área efectiva y de la velocidad de deslizamiento ambas elevadas a un exponente fraccionario que ajustaba bien con los datos experimentales. Trabajos posteriores siguieron confirmando la relación entre la fricción, el desgaste y la EA, a partir de experimentos con el “Pin-on-disk test”. Jiaa y Dornfeld (1990) observaron que el RMS de la EA podía ser un buen indicador del desgaste.

También el análisis de las señales de EA ha servido para estudiar las características de superficies de contacto. El nivel de energía de las señales de EA es sensible a la plasticidad de las superficies en contacto que se evalúa como una función del volumen de aspereza bajo deformación plástica. Carpenter y otros (1992) han mostrado en un experimento de fricción de un bloque sobre un anillo (“Block on ring sliding test”) una excelente correlación con los resultados obtenidos en otros experimentos de fricción como en el caso del deslizamiento de una punta simple (“Pin-on-disk”). El acuerdo entre ambos experimentos se explicita en la relación entre la EA y la fuerza de fricción a una velocidad de deslizamiento constante. Además demostraron que la EA aumenta significativamente con el incremento de la velocidad de deslizamiento, mientras que no es tan notable su aumento con el incremento de la carga aplicada. Observaron que la EA en ensayos de fricción de pares de materiales de poca fricción fue baja. Los resultados de Carpenter también concordaron con la hipótesis que el frotamiento en la fricción es la fuente principal de EA en herramientas de corte. Baranov y otros (1997) hacen un modelo de la presión ejercida en las superficies en contacto y como se relaciona con la amplitud de la EA.

Entre algunos trabajos que muestran la relevancia del estudio y caracterización de procesos de fricción por EA, se puede citar a Belyi y otros (1981) con la fricción de pares polímero-metal a través de la EA denominada como espectroscopia acústica, Hisakado y Warashina (1997) al igual que los autores del trabajo anterior y otros contemporáneos, basan el estudio de la EA en la medición del número de hits de EA durante el proceso estudiado. Wang y Chu (2001) aplican onditas a la detección y localización de fricción en un rotor. Benabdallah (2008) muestra la caracterización de la fricción en el deslizamiento de distintos polímeros en nitruro de silicio (Si_3N_4) a partir del estudio del RMS de la EA. Ahn y Lee (2009) estudian la fricción en micro maquinado. Fan y otros (2010) presentan un modelo de EA generada por fricción en el cual la EA está determinada por la carga soportada por las asperezas del contacto, la velocidad de deslizamiento, el número de asperezas y las características topográficas de la superficie. Ferrer y otros (2010) se basan en el estudio de la amplitud máxima de la señal de EA para estudiar la emisión de señales tipo explosión en un experimento de “stick-slip”.

Más allá de los trabajos aquí mencionados, la línea de investigación respecto de la evaluación de la fricción a partir de la EA en el caso específico de las herramientas de corte será abordado en el Capítulo 3.

1.4 Instrumentación de la EA. Sistema de EA.

Para conceptualizar rápidamente la estructura de un sistema de EA se puede observar el esquema de la Fig. 1.6, el cual corresponde a un canal de EA, que consiste en la cadena que forman el sensor, el preamplificador y el equipo de EA, el cual también permite la medición de parámetros externos, como por ejemplo: carga, desplazamiento o temperatura. Un sistema de EA puede tener tantos canales como sea necesario.

Una vez que la señal de EA es detectada y convertida en señal eléctrica por el sensor, y amplificada por un preamplificador, llega a un equipo que la procesará y registrará. Históricamente los comienzos de la EA, coinciden con el apogeo de la era analógica. En función de la información a manejar, la señal era amplificada y luego se extraían parámetros obtenidos mediante circuitos electrónicos que calculaban principalmente el valor RMS, la cantidad de cruces por cero o por el umbral de la señal, o la amplitud máxima. También en algunos casos se podían registrar fragmentos de la forma de onda de la señal en los primeros osciloscopios digitales (referencias). En la actualidad los equipos comerciales permiten los siguientes modos de adquisición:

- A. Parámetros característicos de EA.
- B. Formas de onda.
- C. Señal de EA en modo de streaming.

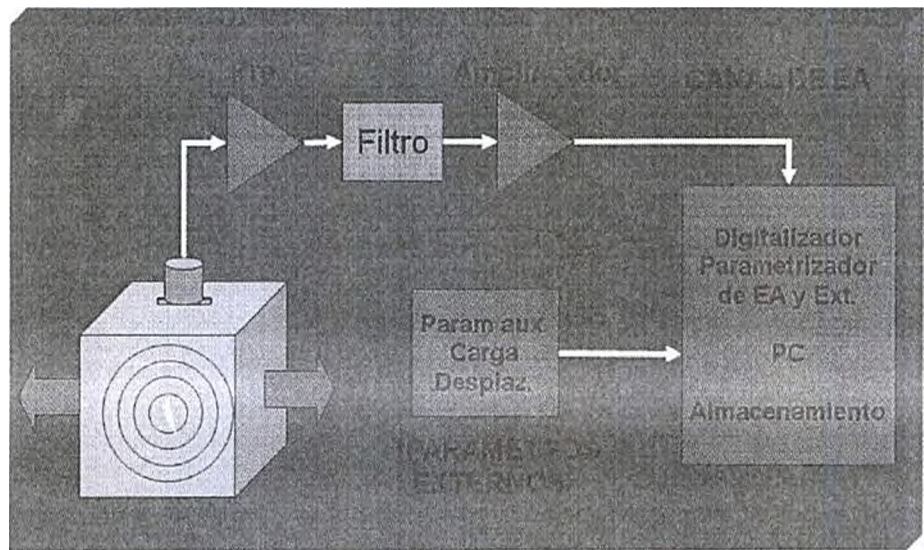


Fig. 1.6. Esquema de un sistema de EA de un canal.

A continuación se detallarán cada uno de los componentes del sistema de EA.

1.4.1 Sensores de emisión acústica

La denominación de “sensor de emisión acústica” corresponde al nombre de aquellos transductores que se utilizan en la detección de señales de emisión acústica en el campo de los END, siendo esa terminología de uso estandarizado [IRAM (2005)].

Estos dispositivos son de fundamental importancia en los experimentos que estudian la EA ya que permiten la detección de las ondas elásticas generadas por las fuentes de EA convirtiéndolas a una tensión eléctrica, la señal de EA, que será acondicionada, registrada y estudiada. El éxito de los experimentos estará fuertemente condicionado por las características del sensor.

En general en la práctica los sensores están acoplados a la superficie del espécimen estudiado detectando la pequeña variación dinámica del desplazamiento de la superficie, y dando como resultado pequeñas corrientes en los terminales del sensor.

Un transductor ideal debería medir desplazamientos (o velocidades) de la superficie en sus componentes horizontales y verticales, en un punto de la misma, y convertir el desplazamiento en señales eléctricas en un amplio ancho de banda. Se puede hacer una estimación del ancho de banda de una fuente típica de EA. La creación de una fisura de 30 micrones en acero, creciendo a un 10% de la velocidad de las ondas transversales, daría un tiempo de vida de la fuente de 0,1 microsegundos. Ese tiempo se corresponde con ondas de hasta 10MHz. Mayores velocidades o menor tamaño de fisura implicarían la medición de mayores frecuencias.

1.4.1.1 Tipos de sensores

Los tipos de sensores son muy variados, dependiendo de los principios físicos utilizados para la transducción, así como también de las características funcionales, formas o tamaños. Los principios físicos utilizados para la detección de ondas elásticas en el rango de la emisión acústica son básicamente la piezoelectricidad para los sensores piezoeléctricos, la capacidad variable para los capacitivos y la interferencia óptica para los interferométricos. En la actualidad se agregan otros tipos de métodos de detección como los EMAT's (transductores electromagnéticos - acústicos) que aun no tienen características demasiado favorables en el rango del estudio de la EA, y los sensores MEMS [Greve (2007)] [Mc Intosh (2002)] que están comenzando a implementarse.

1.4.1.1.1 Sensores capacitivos

Los sensores capacitivos son utilizados para la detección de la EA principalmente en laboratorio como patrón de calibración de sensores. Breckenridge y Greenspan (1981) muestran como se pueden hacer mediciones absolutas del desplazamiento de una superficie a partir del diseño y construcción de un transductor capacitivo. Luego dispositivos similares fueron utilizados en las normas internacionales de calibración de sensores. Previamente Scruby y Wadley (1978) habían descripto un diseño de capacitor para la detección de EA. El principio de funcionamiento está basado en la variación de la capacidad de un condensador de placa móvil, producida por la variación de la distancia entre placas. Esta distancia dependerá del desplazamiento de la superficie de la probeta a medir con la que está en contacto. El cambio de la capacidad producirá en un circuito una diferencia de potencial que será la señal de EA. La ventaja de estos dispositivos respecto de los piezoeléctricos es su mayor ancho de banda, produciendo señales eléctricas que reproducen fielmente el desplazamiento de la superficie del material estudiado. Una desventaja es la menor sensibilidad (ver Tabla I.1).

Tabla I-I. Distintos tipos de sensores de EA. Sensibilidad y rango de frecuencia.

Principio de funcionamiento	Sensibilidad de desplazamiento	Rango de frecuencia
Piezoeléctrico resonante	⁻¹⁴ 10 m	0,1-0,8 MHz
Piezoeléctrico amortiguado	⁻¹³ 10 m	0,1-2 MHz
Capacitivo	⁻¹² 10 m	0-50 MHz
Interferométrico	⁻¹⁰ 10 m	0-10 MHz

1.4.1.1.2 Sensores interferométricos

Esta forma de medir dinámicamente el desplazamiento de la superficie del espécimen estudiado se basa en la medición de variación de distancia por medio de la interferometría láser, esto es midiendo la diferencia de fase producida por la variación del camino óptico, es decir la distancia a la superficie. Las principales ventajas de estos dispositivos es que permiten realizar mediciones a distancia, muy importante en ciertos ambientes industriales como por ejemplo en la detección de defectos en componentes a muy alta temperatura, o en zonas corrosivas o radioactivas. Las desventajas son su sensibilidad y su implementación. Aun estos dispositivos

son costosos y difíciles de implementar para lograr una sensibilidad satisfactoria [Green Jr. (2004)] [Kline y otros (1978)] [Palmer y Green Jr. (1977)] [Kim y Park (1984)].

1.4.1.2 Sensores piezoeléctricos

El método de detección más utilizado se realiza a través de materiales piezoeléctricos, en particular del tipo cerámico (PZT o Zirconato Titanato de Plomo), también poco frecuentemente se utilizan polímeros.

La piezoelectricidad se produce en esos materiales por la deformación causada por la tensión mecánica aplicada por la onda. La deformación produce un reordenamiento de cargas en la estructura del piezoeléctrico generando una diferencia de potencial eléctrico (Ver Fig. 1.7). La salida eléctrica del transductor ($V(x,t)$) es la resultante de la convolución entre el desplazamiento superficial de la superficie ($Y(x,t)$) con una función respuesta del transductor ($T(t)$).

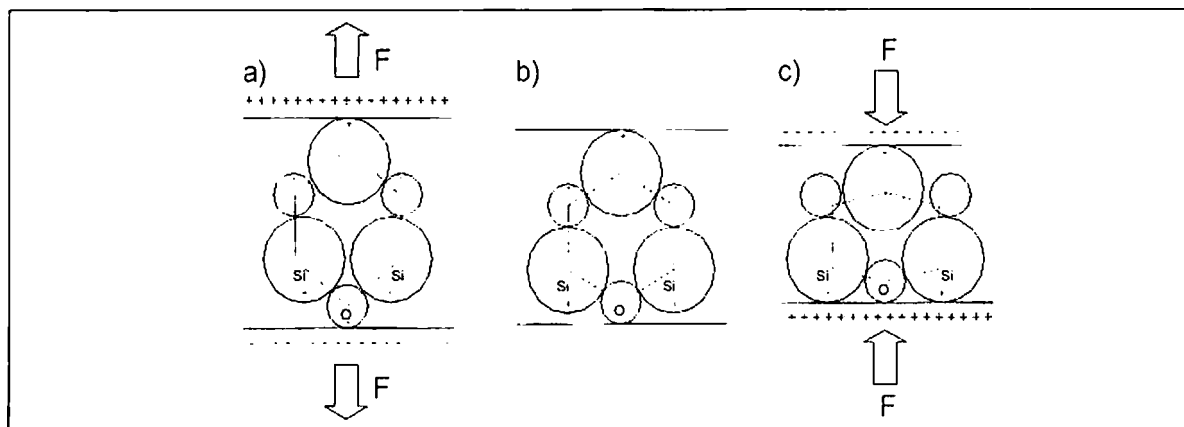


Fig. 1.7. Acción del piezoeléctrico.

Estos sensores tienen ventajas y desventajas que en un balance, hasta el día de la fecha, los convierten en los más elegidos en el campo de la aplicación de la EA con fines industriales. Este tipo de sensores fue el elegido para realizar las mediciones en el presente trabajo de tesis.

Entre las principales ventajas podemos destacar la altísima sensibilidad, bajo costo y fácil implementación. Respecto de las desventajas, la fundamental es la imposibilidad de obtener un ancho de banda lo suficientemente amplio que permita estudiar ciertos fenómenos con los sensores convencionales de uso masivo. Otra limitación de los piezoeléctricos es la temperatura de trabajo a la cual se los puede poner en contacto, ya que están condicionados por la temperatura de Curie la cual no pueden sobrepasar para evitar la pérdida de sus propiedades.

En las señales detectadas por estos dispositivos aparece la impronta de la frecuencia característica de oscilación del cristal utilizado. Breckenridge y Proctor han desarrollado sensores a partir de pequeños piezoeléctricos cónicos, que mejoran ampliamente la respuesta en frecuencia, pero en desmedro de la sensibilidad. Estos sensores de banda ultra ancha denominados sensores NBS por su lugar de procedencia, muestran una gran ventaja que es una baja influencia del efecto apertura pero con la desventaja de captar una menor cantidad de energía de la onda por su muy pequeña área [Proctor (1982)] [Greenspan (1987)]. Una forma de manufactura de estos sensores es por micro maquinado [Lee (2006)]

1.4.1.2.1 Sensibilidad en amplitud y frecuencia

La detección de las ondas elásticas generadas por las fuentes de EA estará condicionada a la sensibilidad del sensor en la amplitud del desplazamiento y en las frecuencias características. Si el frente de onda que llega al sensor contiene aquellas componentes de frecuencia dentro del ancho de banda, aparecerá una diferencia de potencial entre las caras del sensor, que deberá ser mayor que el ruido para ser considerada como señal de EA. Se ha visto en la Tabla I-I que los sensores piezoeléctricos son los más sensibles en el desplazamiento pero no en ancho de banda. Esto condiciona el rango de aplicación de la EA en la industria a una escala en frecuencia de entre 30 kHz y 2 MHz (típicamente 1 MHz máximo). Un condicionamiento extra es que la

atenuación de la onda en el material crece rápidamente con la frecuencia como ya se ha visto anteriormente.

1.4.1.2.2 Influencia del espesor y el diámetro del piezoeléctrico. Rango de frecuencia y efecto apertura.

El elemento piezoeléctrico que se utiliza en los sensores tiene generalmente forma de disco con un diámetro y un espesor definido, siendo estas dimensiones las características que definen su función transferencia, para un dado material.

El espesor estará relacionado con la frecuencia fundamental de resonancia y con los sucesivos armónicos. De esta forma en determinadas frecuencias la respuesta eléctrica para una dada velocidad de la superficie será máxima condicionando la respuesta del piezoelemento. Estas frecuencias serán: $(2n+1)\lambda/2$ con $n=0,1,2,\dots$ donde λ es la longitud de onda en el piezoeléctrico.

Un mayor diámetro del piezoeléctrico está relacionado con una mejor sensibilidad, por tal motivo en general los sensores de uso industrial son de diámetros de entre 10 y 20 mm. En el caso de la detección de ondas longitudinales el tamaño del diámetro no afecta negativamente. Sin embargo cuando el sensor detecta ondas transversales, si estas tienen longitudes de onda comparables al diámetro del sensor aparece una consecuencia denominada “efecto apertura”, que está dado por el carácter finito del sensor en el cual distintos puntos del mismo estarán fuera de fase, produciendo efectos espurios [Stone (1977)]. Para una dada frecuencia este efecto se reduce al disminuir el diámetro del sensor.

1.4.1.2.3 Selección de Modos

El desplazamiento a medir tiene tres direcciones por lo que se puede descomponer en una dirección perpendicular a la superficie y dos en el plano de la misma. En general los sensores comerciales de EA están diseñados para responder en la componente normal. Aunque las ondas que se propaguen sean compresivas o de corte generalmente tienen una componente normal a la superficie que será detectada. También los piezoeléctricos pueden fabricarse para seleccionar solo las ondas transversales, por ejemplo cristales de cuarzo cortados en determinadas direcciones.

1.4.1.2.4 Diseño y construcción de sensores piezoeléctricos

El diagrama observado en la Fig. 1.8 representa la configuración de un sensor típico de EA basado en un elemento piezoeléctrico, siendo el más utilizado el PZT. En general el sensor está basado en un cilindro metálico de acero inoxidable que le provee aislamiento para las ondas electromagnéticas, rigidez física y la conexión de uno de los polos del piezoelemento, que se sitúa en su base por sobre un disco de separación. El otro polo del sensor va por un cable desde el piezoelemento hasta el centro de un conector. La conexión del piezoeléctrico puede ser de modo normal o diferencial, siendo este último muy útil para la reducción de ruido eléctrico.

Sobre el cristal se coloca una capa denominada “backing”, que puede ser por ejemplo una mezcla de epoxi y partículas de tungsteno, cuyo fin es atenuar las ondas que se propagan en la cara superior, opuesta a la probeta, por dispersión y absorción. Este “backing” puede ser diseñado para alterar también la dependencia en frecuencia del espesor del piezoeléctrico haciéndola más plana, o de mayor ancho de banda. [Ohtsu (2008b)]

1.4.1.2.5 Calibración de los sensores

Para la correcta cuantificación de los resultados de la EA los sensores de EA deberán estar calibrados. Para ello, varias organizaciones mundiales que generan normas y códigos tales como la International Organization for Standardization (ISO) o la American Society for Testing and Materials (ASTM) han hecho lo propio para el caso de los sensores de EA [ASTM (1997a)] [ASTM (1999)] [ASTM (2001)].

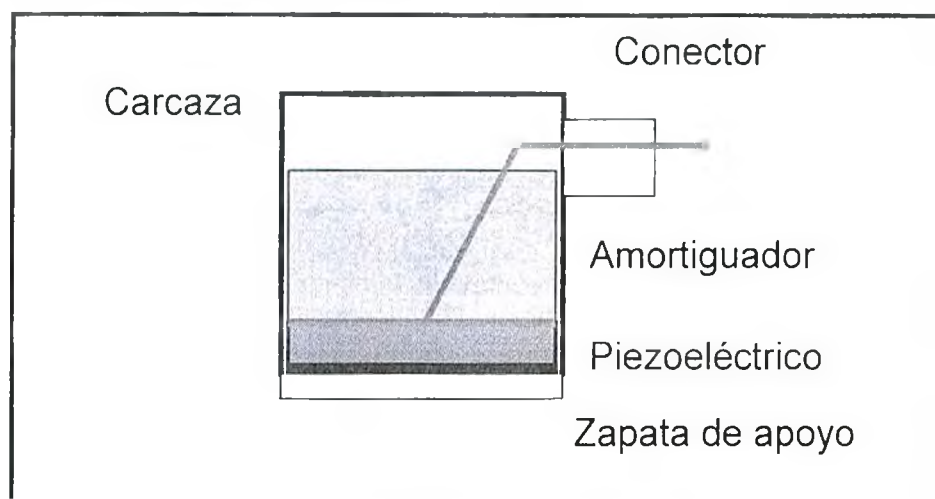


Fig. 1.8. Diagrama de un sensor de EA.

La calibración de sensores puede realizarse de maneras primaria y secundaria, es decir a partir de mediciones absolutas o de mediciones relativas a las absolutas. Para la calibración primaria el método más antiguo y más usado es aquel creado en el NIST de EEUU el cual ha sido recopilado en la norma ASTM E 1106 denominado calibración con una “fuerza tipo escalón” [Hsu y Breckenridge (1981)] [Eitzen y Wadley (1984)] [ASTM (2001)]. Ese procedimiento está basado en la rotura de un capilar de vidrio sobre un bloque de acero ambos normalizados, y la comparación de la señal medida por el sensor a calibrar con el desplazamiento de la superficie del bloque. Este es determinado de dos maneras, una la medición del mismo con un sensor capacitivo (de alta sensibilidad y banda muy ancha) tomada como patrón de desplazamiento [Breckenridge y Greenspan (1981)] [Hsu y Breckenridge (1981)], y también con un valor calculado teóricamente según los modelos de la teoría de elasticidad desarrollados en sismología [Pekeris (1951)] [Pekeris and Lifson (1957)]. De esa manera se puede obtener un patrón de la respuesta del sensor a ondas superficiales (Rayleigh) o a ondas tipo P, según la configuración del experimento de medición (calibración superficial o calibración a través del bloque). El material del bloque debe ser especificado y la relación entre su impedancia y la del sensor son determinantes para esta calibración. La sensibilidad del sensor patrón es de $12 \cdot 10^6$ V/m y su menor desplazamiento detectable es de $4 \cdot 10^{-12}$ m.

Otra calibración primaria es la “recíproca” [Hatano y Mori (1976)] [Breckenridge y otros (1982)] [Hatano (1998)], en la cual se utilizan las respuestas como emisor y receptor de los sensores a calibrar. La excitación en este método es eléctrica aunque es necesario conocer la función transferencia mecánica o función de Green para la transmisión de ondas de EA desde la fuente hasta el receptor, la cual es la representación en el dominio de la frecuencia de la solución por la teoría de elasticidad. Los rangos de medición de los patrones de calibración primaria en las condiciones de las normas son desde los 10 kHz y generalmente entre los 100 kHz y 1 MHz. La calibración secundaria, a partir de sensores calibrados de manera primaria, se obtiene por diversos procedimientos normalizados. Hay diferentes normas y procedimientos de calibración secundaria tales como las ASTM E 1781 y otras pruebas que pueden evaluar la reproducibilidad de la respuesta del sensor como las indicadas en la ASTM E 976, entre las cuales se define el método de Hsu Nielsen. Estos métodos son comparativos y relativos.

Theobald y otros (2005) proponen la calibración de sensores de EA a partir de la excitación de un bloque de vidrio por medio de un transductor, y la detección de las ondas elásticas propagadas por parte del sensor a calibrar y por un interferómetro laser. Luego la comparación de ambas mediciones permite determinar la sensibilidad del sensor a calibrar. En 2009 Theobald amplía el estudio anterior extendiendo la respuesta para ondas longitudinales y transversales, en este caso para un bloque de aluminio.

Otros trabajos como los de Clough (1987), Yan y Jones (2000), Theobald y otros (2001), Yan y otros (2002), invocando la trazabilidad de las mediciones de EA han apuntado a la calibración en

energía de la respuesta del sensor. Por ejemplo dejando caer pequeños objetos de masa conocida sobre una superficie, calculando la energía cinética en el choque y midiendo la señal eléctrica del sensor. También ha realizado estudios similares a partir de disparar pulsos de láser en probetas de aluminio de distintos tamaños. Un tercer método usado fue emitir con sensores fabricados con piezoeléctricos cónicos. Los detalles de estos experimentos están en las citas mencionadas.

Sin embargo, el tema de la calibración de los sensores no es sencillo, ya que existen varios puntos conflictivos. Un ejemplo que se puede mencionar es el hecho que el desplazamiento de un punto de la superficie de un material es tridimensional (vectorial) mientras la respuesta del sensor es escalar, o que el desplazamiento está alterado por la presencia del sensor, o la no puntualidad del sensor (área finita) que genera el efecto apertura para ondas no longitudinales. Estas dificultades son acotadas mediante aproximaciones y convenciones.

1.4.1.2.6 Complementos para aplicaciones en campo

La fijación de los sensores es un punto importante. En general en grandes estructuras de metales ferromagnéticos los sensores se fijan mediante dispositivos magnéticos. También pueden utilizarse adhesivos, bandas elásticas, y otras soluciones dependiendo del componente a ensayar. Otro complemento de los sensores son las guías de onda las cuales pueden ser útiles en casos en los cuales se deba separar el sensor del objeto estudiado, por ejemplo si está a altas temperaturas las cuales son perjudiciales para los piezoeléctricos.

1.4.1.2.7 Relación entre la frecuencia de los sensores y la atenuación del material

Se dará un ejemplo de la influencia de la frecuencia en las mediciones de EA. En ensayos industriales de EA en estructuras metálicas, para la detección de fisuras activas suelen utilizarse sensores de frecuencia de resonancia en el rango entre (100 – 300) kHz, asegurando así una propagación de la onda de algunos metros, pudiéndose de esta manera aplicar técnicas de detección y localización de fuentes de EA. Por el contrario si el ensayo se realiza en piezas de hormigón o roca (materiales muy heterogéneos) en los cuales la atenuación es mayor, para lograr un similar alcance de la onda (desde la fuente al detector) la frecuencia de los sensores necesariamente deberá ser menor, usándose típicamente 50 kHz para estos materiales, dado que como se ha visto la atenuación crece con la frecuencia.

1.4.2 Acoplante

Cuando se adhieren los sensores a un espécimen a examinar, en general metálico y más generalmente sólido, queda una capa de aire entre ambos componentes que conlleva un salto de impedancia acústica muy grande, el gap sensor-aire-probeta provocará que una parte importante de la energía que debería captarse por el sensor se refleje en la interfase probeta-aire y no sea detectada. Por tal motivo se coloca una sustancia que actúa de acoplante o adaptadora de la impedancia acústica entre el sensor y la superficie del espécimen. Esta sustancia deberá cumplir ciertas exigencias que son: por un lado permanecer en su función durante un lapso mucho mayor que el tiempo del ensayo, constituirse en una capa lo más delgada posible para evitar efectos indeseados en la señal, no producir alteración ni daño al espécimen, no alterarse en sus propiedades a la temperatura de trabajo, no emitir ruido p.ej. por fracturarse al moverse el espécimen si se trata de una capa frágil (acoplantes en general para captar ondas transversales). Entre las sustancias utilizadas para este fin podemos mencionar la grasa, el aceite, la glicerina, el agua, cemento dental, etc. Cada una de estas sustancias tendrá temperaturas de operación diferentes. La correcta aplicación del acoplante puede ser examinada mediante la detección de eventos de EA simulados por métodos electrónicos o mecánicos (Hsu-Nielsen) normalizados.

1.4.3 Preamplificadores

Las señales de EA proporcionadas al sistema electrónico por el sensor son en general de muy baja amplitud. Si la extensión del cable de interconexión al equipo es demasiado largo la señal sufrirá una atenuación que producirá la pérdida de la información por una baja relación señal

ruido. Por tal motivo, próximo al sensor debe colocarse un preamplificador encargado de realizar una primera amplificación de la señal de EA. Típicamente los preamplificadores tienen una ganancia fija de 40 dB, es decir una amplificación de 100 veces. Otros pueden modificar su ganancia en pasos, a valores de 20 dB, 40 dB o 60 dB. Dado que el preamplificador estará lejos del equipo de EA, este le proveerá alimentación mediante una tensión continua que por lo general es de 24 V, por el mismo cable coaxial por el que se recoge la señal de EA.

También la entrada del preamplificador debe estar preparada para eliminar tensiones altas, generadas por el cristal piezoeléctrico del sensor, cuando es involuntariamente golpeado. Es aconsejable que el preamplificador esté provisto de un filtro pasa altos y que el nivel de ruido sea de algunos pocos μV_{RMS} (con la entrada en cortocircuito) dentro del rango de frecuencias a usar. Con el objeto de disminuir el nivel de ruido y ganar en practicidad existen sensores con el preamplificador incluido. En ese caso, el nivel de ruido disminuye aproximadamente a la mitad, respecto a la configuración convencional. Generalmente los preamplificadores integrados comerciales poseen una ganancia fija de 40 dB.

1.4.4 Equipo de EA. Amplificador. Parametrizador. Digitalizador.

La etapa siguiente al preamplificador es lo que se suele denominar “equipo de EA”, el cual suele estar en una unidad física independiente. Por ejemplo en un gabinete para los de uso industrial, o en forma de una placa en una computadora para el caso de los equipos pequeños de laboratorio. Este componente toma la señal preacondicionada y la procesa hasta el punto de llegar a obtener datos precisos de la EA. Los equipos de EA suelen tener desde uno a varias decenas de canales dependiendo del ensayo a realizar. La cantidad dependerá del tamaño del componente, de la fuente, del material y de la sensibilidad requerida. Según su grado de sofisticación esta etapa desarrollará más o menos cantidad de tareas, con mayor o menor precisión.

Básicamente se pueden describir las siguientes etapas que normalmente tiene un equipo de EA:

- Alimentación de los preamplificadores.
- Amplificación.
- Filtrado en amplitud (umbral).
- Filtrado en frecuencia.
- Conversión analógica digital.
- Detección de fuentes de EA.
- Parametrización analógica.
- Parametrización digital.
- Adquisición de la señal.
- Tratamiento de los parámetros mediante algoritmos.
- Localización de fuentes.

La etapa cero de un equipo de EA es la alimentación de los preamplificadores de los sensores.

La primera etapa, la de amplificación, suele ser indispensable para el estudio de procesos de EA de muy baja amplitud, en los cuales los preamplificadores no son suficientes para lograr un voltaje aceptable para el procesamiento de la señal. Las características de un amplificador de EA deben permitir el manejo de señales en un amplio rango de frecuencias (desde algunas decenas de kHz hasta algunos MHz). Valores típicos de la amplificación de esta etapa pueden ir desde 6 dB hasta 60 dB.

Iniciando el procesamiento de la señal el primer punto a tener en cuenta es lo que se conoce como umbral o filtrado en amplitud. El operador debe fijar un nivel de tensión (o umbral), y luego las señales que lo sobrepasan son calificadas como señales de EA. Si el umbral fuera tan bajo como el ruido, se estaría contabilizando al ruido como señales de EA y por el contrario si se elevara mucho estas podrían perderse.

La siguiente etapa consiste en un conjunto de filtros analógicos pasa alto y pasa bajo, que permiten recortar el ancho de la banda. Esto puede servir por ejemplo para eliminar ruidos sintonizados fuera de las frecuencias de estudio de la señal.

Los equipos de EA previos a la era digital realizaban la parametrización, detección y localización de la señal de manera analógica. La mayoría de los equipos de EA que se comercializan en la actualidad digitalizan la señal para su posterior parametrización, adquisición y procesamiento. La conversión analógica-digital típicamente se realiza con una resolución en voltaje que va desde 8 hasta 18 bits y con tasas de muestreo temporal variables desde cientos de kHz hasta decenas de MHz, eligiéndose en función de las frecuencias a medir.

A partir de características de la señal tomada se produce la detección de la actividad de las fuentes de EA en el material examinado. Luego en el equipo se procesa la señal de manera tal que se puedan hallar los parámetros característicos de la misma. Estas particularidades dan mayor información sobre la fuente que su mera existencia. Según el equipo, están disponibles distintos parámetros, siendo los más usados los que se detallan en la próxima sección.

Cada vez que la onda elástica llegue a un sensor y tenga una amplitud mayor que el umbral se define que se ha registrado un “hit” o golpe en ese canal. El proceso físico de la emisión de las ondas elásticas es denominado evento de EA, por lo tanto un evento de EA podrá observarse como “hits” o golpes en cada uno de los canales del equipo. Estas serán las respectivas señales eléctricas correspondientes a las ondas de EA que han salido de la fuente de EA (p.ej.: fisura propagándose), viajado a través del material estudiado y golpeado cada uno de los sensores.

1.4.4.1 Adquisición de formas de onda (“waveforms”)

Además de la parametrización, algunos equipos permiten la adquisición de la señal, es decir la forma de onda (en inglés “waveform”). Esta se realiza generalmente una vez que la señal supera el umbral, entonces para cada canal del equipo, además de tomarse los parámetros de las señales, se guarda un registro digital de una porción de la señal denominada “waveform” o forma de onda. Estas ondas pueden almacenarse, dependiendo del modo de captura, como archivos correspondientes a cada hit. El tamaño de los archivos dependerá del equipo, y el tiempo muestreado será inversamente proporcional a su tasa de muestreo, si es por ejemplo de 5 millones de muestras por segundo y el archivo tiene 15000 puntos se adquirirán 3 milisegundos de señal. Generalmente este procedimiento necesita más recursos de hardware que la parametrización.

1.4.4.2 Adquisición de la señal completa o “Streaming”

Otro modo de adquisición es el modo de digitalización y almacenamiento continuo a tiempo real o “streaming”, en el cual la señal adquirida se envía directamente a disco rígido, permitiendo la medición de la señal completa (no solo los hits) desde el inicio hasta el fin del ensayo. En este caso generalmente se puede prescindir de un umbral. Estas señales guardan toda la información de la EA existente en el ensayo. Las limitaciones de esta forma de adquisición son la frecuencia de muestreo y el tamaño del sitio de almacenamiento que limitan el ancho de banda y la duración de la señal medida, respectivamente. Entre las ventajas de este método es la posibilidad de eliminar un factor de subjetividad que es el umbral. La desventaja de este método es la gran cantidad de información almacenada y su muy costoso procesamiento desde el punto de vista del manejo de los archivos de tamaños descomunales, con mayoría de información espuria.

1.4.5 Modelo de la EA a partir de la convolución

Las tres etapas mencionadas anteriormente, generación, propagación y detección, en las que se separó el fenómeno de EA, más la suposición de linealidad, permiten modelar el proceso a través de una serie de operaciones de convolución.

$$V(t) = T(t) * [G(t) * M(t)] \quad (1.67)$$

La variable $V(t)$ es la magnitud del potencial eléctrico (generado por la onda elástica) a la salida del sensor, $M(t)$ es una función representativa de la fuente de EA, $G(t)$ es la función de Green elastodinámica del medio y $T(t)$ es la respuesta del sistema de detección al impulso. En algunos casos particulares el análisis del proceso inverso permite caracterizar la fuente de EA midiendo los voltajes generados en los sensores

1.5 Señales de EA

Esta parte del trabajo tratará sobre el análisis que generalmente se realiza de las señales de EA. Según se trabaje con los parámetros o con la señal digitalizada es conveniente dividir la explicación en dos partes, por un lado el estudio de los parámetros y por otro, el análisis de las formas de onda, es decir la señal digitalizada.

1.5.1 Estudio de los parámetros

Como se ha visto anteriormente, en general se habla de dos tipos de señales de EA; una continua y una tipo explosión (o “burst”) que contiene una importante cantidad de componentes armónicos. En muchos casos no se justifica digitalizar y estudiar la onda de EA, y solo basta con parametrizarla, perdiendo información, pero ganando tiempo de procesamiento de los datos.

Los parámetros característicos de la EA están típicamente definidos para señales tipo explosión (Fig. 1.9) y algunos pueden extenderse a las señales continuas. En la descripción de los parámetros que se realiza a continuación se explicitará esa posibilidad y también la dependencia con el umbral. Definidos en la literatura [Stone y Dingwall (1978)] y en las normas internacionales como la ASTM 1316 [ASTM (1997b)] o la NM302 [IRAM (2005)], los más comunes de ellos son:

Tiempo de ocurrencia (“hit time”): El “tiempo de llegada” o de “ocurrencia” o de “arribo” de la señal es el tiempo al cual se considera que comienza el hit. Esto ocurre cuando la señal supera el umbral, por lo cual dependerá de su valor.

Amplitud máxima o “amplitud”: Es el valor máximo de la amplitud de la señal de EA. Este valor está relacionado con la magnitud de la fuente y propiedades del material. En general se expresa en dB_{EA} dado que la variación en mV es de varios órdenes. Ha sido uno de los primeros parámetros utilizados para estudiar los fenómenos de EA [Ono y otros (1978)] [IRAM (2005)] [Stone y Dingwall (1978)]. También este parámetro es uno de los pocos útiles en la descripción de señales de tipo continuo. No depende del umbral (si lo supera).

La definición de los dB de EA, llamados dB_{EA} es particular para este método, y está referida a una señal de $1\mu\text{V}$ en el sensor de EA. Un dB_{EA} se define como:

$$\text{dB}_{EA} = 20 \log \left(\frac{V_s}{1\mu\text{V}} \right) \quad (1.68)$$

donde V_s es el voltaje medido a la salida del sensor.

Duración: La duración es el tiempo transcurrido desde que la señal cruza por primera vez el umbral hasta que lo hace por última vez. Depende de la magnitud de la fuente, del tipo y forma del espécimen, de las características del sensor utilizado y del valor del umbral. También depende de la reverberancia del material

Tiempo de subida (“rise time”): Es el tiempo desde que la señal cruza el umbral hasta que alcanza su amplitud máxima. Está condicionado por la dispersión de la onda en su viaje entre la fuente y el sensor. Depende del umbral. Da una idea del tiempo de actividad de la fuente [Clough (1987)].

Número de Cuentas (“ring down counting”): Es la cantidad de veces que la señal cruza el umbral. Históricamente fue uno de los primeros parámetros de EA por su facilidad de

implementación electrónica. Depende del umbral y está relacionado con la amplitud. En un trabajo de Brindley y otros (1973) se realizó un exhaustivo análisis de este parámetro.

Energía MARSE: Es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificada (“Measured Area under Rectified Signal Envelope”). Esta parametrización no depende del umbral pero si de la amplitud y la duración de la señal. [Pollock (2003)] [PAC (2004)] la energía MARSE es ampliamente utilizada en la implementación de la EA como método de END. Más adelante se discute las ventajas de su utilización.

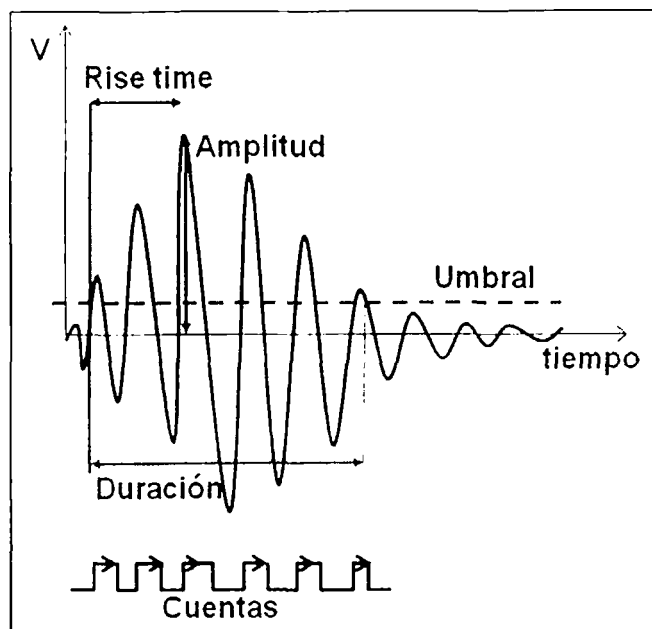


Fig. 1.9. Parámetros que caracterizan a un evento de EA tipo explosión.

Valor cuadrático medio o RMS (“Root Mean Square”): Dada la aleatoriedad de la ocurrencia de la EA, para describir una emisión no periódica, con un amplio contenido de frecuencias, no se puede recurrir a una función matemática determinista, sino que se debe utilizar algún parámetro que pueda relacionarse con la energía contenida en la señal. Este es por ejemplo el valor RMS de la señal de EA, que se calcula mediante la ecuación:

$$RMS = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t)]^2 dt \right)} \quad (1.69)$$

Donde V es el voltaje medido. Está relacionada con la energía media. Sirve para analizar las señales de EA de tipo continua.

Por definición del RMS, la energía contenida en la señal puede estimarse como:

$$\Delta E \propto (RMS)^2 \Delta t \quad (1.70)$$

Donde ΔE es la energía involucrada en el tiempo Δt

Otras ventajas de utilizar el RMS son:

- El suavizado de la señal de EA permitiendo encontrar alguna función analítica relacionada.
- La cancelación de la dependencia de la sensibilidad del resultado de la medición respecto del nivel del umbral,
- La reducción de la sensibilidad a los pequeños cambios en la ganancia del sistema electrónico o en el acoplamiento del transductor.

Energía eléctrica (o absoluta): se define como

$$E_e = \frac{1}{R} \int [V(t)]^2 dt \quad (1.71)$$

con V voltaje a la salida del sensor y R una resistencia de referencia.

Los parámetros referidos al voltaje energía o potencia de la señal en general son valores relativos y no absolutos, ya que no se han tenido en cuenta en la medición ni las pérdidas en el transductor ni la atenuación del material. Distintos autores han hecho las consideraciones necesarias para lograr mediciones cuantitativas. Por ejemplo Hatano (1975) ha medido la potencia emitida durante la deformación de probetas de aluminio, dando valores del orden de los pW (picowatts).

En la literatura aun no está completamente establecida la relación entre la energía generada por la fuente, transmitida por el material y recibida por el sensor. Algunos trabajos como el de Clough (1987) en el que se estudió pulsos elásticos generados en distintos materiales con láser, se propone que para ciertas condiciones la energía de la onda elástica se corresponde linealmente con la energía eléctrica del sensor, según la integral de la Ec. 1.71. Esto se cumpliría para ciertos casos de bajas energías involucradas. Otros autores como Baranov (2007) proponen que en algunos casos la correspondencia de la energía elástica, es con la amplitud de la tensión medida por el sensor y no con la amplitud al cuadrado. Tal vez este sea uno de los fundamentos para la vasta utilización de la energía MARSE definida por alguno de los fabricantes de equipos de EA, y de amplia utilización en la literatura. En muchos trabajos se toma como energía esta definición del área bajo la envolvente de la señal de EA.

Además de los parámetros previamente mencionados existen otros alternativos que pueden construirse como combinaciones de los anteriores, como por ejemplo la frecuencia media (FM), o la potencia media (PM).

Frecuencia media (FM): este parámetro secundario se define como el cociente entre el número de cuentas y la duración de cada hit. La frecuencia media da una idea de la cantidad de cruces de la señal por el umbral por unidad de tiempo (ciclos por segundo), lo que puede relacionarse primitivamente con una frecuencia asociada a la onda de EA, no en un sentido estricto sino como una aproximación. Este parámetro es utilizado en la literatura [Ohtsu (2006)].

Potencia media (PM): Este parámetro que en realidad debería denominarse potencia MARSE media, fue creado en este trabajo de tesis, con el fin de independizar el parámetro energía MARSE de la duración del hit, para poder utilizarlo indistintamente tanto en señales continuas como en señales tipo explosión (con inicio y fin). De esta manera, la PM se define como el cociente entre la energía MARSE y la duración del hit [Gómez y otros (2007)] [Gómez y otros (2009)].

Representación de los parámetros

Una vez que los parámetros son medidos, se almacenan en el equipo de EA como archivos de datos, de los cuales en general se pueden extraer las listas de los parámetros para cada hit del ensayo como archivos “.txt” que luego pueden analizarse con algoritmos de programas de procesamiento matemático. En la mayoría de los equipos, los parámetros medidos también pueden graficarse mientras se van registrando o luego de la medición.

Representaciones bidimensionales de los parámetros

Combinando pares de parámetros se suelen construir mapas bidimensionales en los cuales se logra identificar, a partir de la clasificación en zonas, la actividad de distintos tipos de fuentes de EA según sus distintas características físicas. Esta separación puede usarse por ejemplo para filtrar tipos de señales o ruido, o para determinar el comportamiento de los procesos emisores.

1.5.2 Localización zonal y puntual

Otra herramienta importante que brinda la EA, es la posibilidad de localizar las fuentes de emisión producidas por discontinuidades en el material a partir de las diferencias de tiempo de arribo de las ondas a cada uno de los sensores [Kurz y otros (2008)]. Esta metodología es de gran utilidad en aplicaciones industriales, por lo que se ha convertido en uno de los métodos de END más importantes para el estudio de grandes componentes bajo carga (p.ej.: búsqueda de fisuras activas en tanques).

Para el caso más frecuente de su utilización, que es la localización de fisuras, la emisión es tipo “burst” o explosión, por lo cual el instante de emisión de la onda de EA suele estar correctamente bien definido, así como su instante de detección. No ocurre lo mismo con otros tipos de fuentes de EA como las pérdidas en tuberías, o en la fricción, donde la EA tiene carácter continuo, es decir no puede detectarse un comienzo o un final de la señal.

Para el caso de las señales tipo explosión se suelen determinar de manera sencilla los tiempos de arribo a los sensores, y con estos datos se aplicarán algoritmos de localización para determinar la ubicación de la fuente. En estos casos, en general se utilizan dos tipos de algoritmos, que corresponden a las localizaciones “zonal” y “puntual”. El método más sencillo se basa en determinar la secuencia del orden de arribo de cada hit (para cada canal) con lo cual se puede hallar la zona donde se encuentra localizada la fuente de EA, este se denomina “localización zonal”. En la Fig. 1.10 se observa un ejemplo de localización zonal con siete sensores, tomados de a pares en cada zona triangular. Por otra parte también se puede determinar con mucha precisión la posición exacta de la fuente de EA que produce señales tipo explosión. Esto se hace a partir de las diferencias de tiempo de arribo, utilizando las ecuaciones de propagación de las ondas y la geometría de la estructura examinada. Lo que debe conocerse para este último método denominado es la velocidad de propagación de las ondas elásticas, las cuales pueden ser medidas in situ fácilmente antes del ensayo de localización.

Para ubicar fuentes de EA continua, como por ejemplo en pérdidas en tuberías, es ilógico utilizar el método de las diferencias de tiempo de arribo, ya que este no existe en el sentido dado a las señales tipo explosión. Luego, deben utilizarse algoritmos matemáticos que posibiliten hallar las diferencias de tiempo entre las ondas medidas en distintos puntos conocidos del espécimen. Uno de estos es el llamado “método de correlación cruzada” [Franks (1975)].

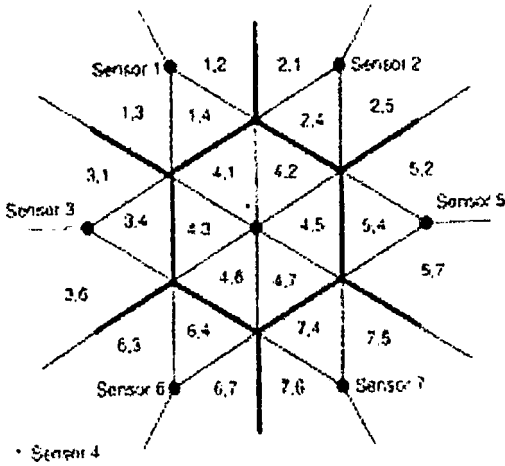


Fig.1.10. Localización zonal con siete sensores, contabilizando de a pares.

1.5.3 EA como series temporales

Algunos de los parámetros como por ejemplo el tiempo de arribo (o “hit time”) muestran las características estocásticas del proceso de EA. En la bibliografía hay trabajos que estudian a la EA como series temporales [Gómez y otros (2004)]. De esta manera se puede extraer

información por ejemplo de la auto-organización o la fractalidad de los procesos estudiados que generan la EA (fractura, avalancha de dislocaciones, etc.).

La secuencia irregular en el tiempo de aparición de los eventos puede analizarse como un proceso estocástico discreto que podría ser sin memoria o con memoria dependiendo de la longitud de correlación. Grabec (1980) concluyó que la teoría cinética de los materiales predice que probetas similares bajo las mismas condiciones de carga fallarán estocásticamente y de esta manera la EA aparecerá de manera de series de señales tipo explosión, estocásticamente independientes, con una tasa de emisión que dependerá de la tensión aplicada y con una forma similar para cada emisión.

Para definir este tipo de comportamiento se ha analizado la posibilidad de una ley potencial de la serie temporal definida por la ocurrencia de los eventos. Se ha utilizado como herramienta el factor de Fano (Fano, 1947), el cual describe la correlación de una secuencia de eventos. De existir una ley potencial indicaría una invariancia en la escala de tiempo reflejando que el proceso que produce la EA tiene un cierto tipo de memoria que relaciona valores actuales de la propiedad medida con valores anteriores [Lowen y otros (1995)] [Thurner y otros (1997)] [Lowen y otros (2001)].

Hay evidencias en la literatura que indican que los procesos involucrados en la EA tales como las avalanchas de dislocaciones o la fractura tienen un comportamiento del tipo de ley potencial. Weiss y otros (2001) y Miguel y otros (2001) relacionan la dinámica de avalanchas de dislocaciones con parámetros de la EA tales como la amplitud y la energía a través de una ley potencial. Koslowski y otros (2004) proponen un comportamiento auto-organizado de la distribución espacial de las dislocaciones. Zapperi y otros (1997) estudian mediante EA fenómenos de avalanchas de microfracturas en materiales sometidos a tensiones externas, a través de una ley potencial. Rundle y otros (2003) se refieren a mecanismos de la fractura frágil relacionados con la energía de la EA también a través de una ley potencial.

1.5.4 Estudio de las formas de onda

Como se ha mencionado anteriormente, una posibilidad de estudio de la EA puede realizarse a partir del análisis de las formas de onda. Esto significa explorar un fragmento de la señal de EA que en general es adquirida a partir de que la onda eléctrica supere un umbral prefijado en el equipo con el que se realizan las mediciones. Si bien en el pasado se han utilizado métodos analógicos de adquisición, en esta sección solo se hará referencia a estudios de la señal a partir de su conversión a formato digital. De esta manera para la adquisición de la forma de onda dependiendo de los análisis que se pretendan realizar se recomienda que se satisfaga el criterio de Nyquist, es decir que se tomen más de dos puntos por ciclo. Una vez que la onda eléctrica genera una respuesta del sensor que supera el umbral esta se adquiere y se almacena en una PC. Nuevamente en este estudio se puede discriminar entre los tipos de EA continua o tipo explosión. En general las señales de característica continua suelen variar poco su amplitud y por lo tanto el final de la adquisición no será por extinguirse la señal correspondiente a un determinado hit como ocurre en las señales tipo explosión sino que la señal se medirá hasta un tiempo de finalización impuesto por el operador del ensayo, o por el tamaño del buffer de almacenamiento, o por la finalización de la actividad de la fuente de EA continua. Las señales pueden ser estudiadas en el dominio temporal o en el dominio de frecuencias.

1.5.4.1 Estudio de las formas de onda en el dominio temporal

En la adquisición de las formas de onda se mide la amplitud en función del tiempo a una tasa de muestreo definida. De esta manera la señal puede nuevamente ser inspeccionada en el dominio temporal estudiando algún parámetro diferente a los definidos por los equipos comerciales. La información más importante de la señal esta determinada por el valor de la amplitud de la señal generada por el sensor, la cual está relacionada con la energía de los procesos que actúan como fuentes de EA. La distribución de la amplitud dará idea de la dinámica del proceso estudiado, es

decir de la distribución de la energía de las fuentes. Dada la forma de onda, se puede obtener información importante del promedio de las amplitudes, del promedio de las amplitudes al cuadrado y de la dispersión de la amplitud. Estos conceptos resumidos en Baranov (2007) fueron propuestos también de manera alternativa por Gómez y otros (2007a), a partir de la definición de la PM y la variancia de la PM, donde la PM es equivalente al promedio de las amplitudes de un hit.

$$PM = \frac{\text{EnergíaMARSE}}{\text{Duración}} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \cdot \Delta t}{N \cdot \Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} = \bar{V} \quad (1.72)$$

Donde N es el número de muestras de la señal, Δt es el tiempo de una muestra, V_i es la amplitud de una muestra y $\bar{V}$ es la amplitud promedio de la forma de onda de un hit. La definición de la PM permite calcular la $\bar{V}$ a partir de los parámetros de la EA sin la necesidad de realizar un procesamiento alternativo de los datos. Igualmente el promedio de las amplitudes al cuadrado puede efectuarse sin recurrir a las formas de onda haciendo el cuadrado del parámetro RMS. Dunegan y Green (1971) y Spanner (1974) hacen una lista de los factores que tienden a incrementar la amplitud relativa de la EA citando a los siguientes:

- Mayor tensión.
- Mayor tasa de deformación.
- Menor temperatura.
- Anisotropía.
- Heterogeneidad.
- Secciones más anchas.
- Clivaje.
- Material conteniendo discontinuidades.
- Transformaciones martensíticas.
- Propagación de fisuras.
- Tamaño de grano grande.
- Maclado inducido mecánicamente.

Para el estudio de procesos de fricción con EA, Baranov (2007) suma los siguientes factores que incrementan la amplitud de la señales de EA a los enumerados por Spanner:

- Anisotropía de la superficie
- Mayor dureza
- Inhomogeneidad de las propiedades de las superficies
- Ausencia de textura
- Baja ductilidad
- Defectos en la capa superficial
- Mayor velocidad de deslizamiento
- Condiciones de fricción no estacionaria
- Desgaste abrasivo
- Fricción en seco
- Presencia de surfactantes
- Presencia de un entorno corrosivo

1.5.4.2 Estudio de las formas de onda en el dominio de la frecuencia y en el dominio tiempo frecuencia. Análisis espectral

Además de los parámetros mencionados, calculados o medidos por el equipo de EA, y de las señales en el tiempo, mucha información de los mecanismos de las fuentes de EA puede obtenerse del estudio de las formas de onda en el dominio de la frecuencia. El proceso de

emisión y la energía emitida como ondas elásticas pueden estudiarse a partir del análisis del espectro de frecuencias de las señales. El espectro de una señal, o forma de onda de EA, depende de los mismos parámetros que la señal temporal, es decir la combinación de dipolos, el comportamiento temporal de la fuente y la distancia de la fuente al detector [Scruby y otros (1983)]. Entre los primeros trabajos de relevancia en los cuales se realizó el estudio en frecuencia de las formas de onda se puede citar a Egle y Tatro (1967), Hatano (1975) y Fleischmann (1975).

Hatano (1975) estudió el proceso de deformación plástica de probetas de aluminio y observó la variación de la densidad de potencia espectral en las distintas etapas del proceso. Descomponiendo la energía en función de la frecuencia pueden identificarse por ejemplo los distintos tipos de mecanismos de emisión. También se realiza un estudio similar en Fleischmann y otros (1975). En el trabajo de Egle y otros (1981) se pudieron separar los componentes de la EA a partir del espectro de la energía de las señales diferenciando entre mecanismos de dislocaciones y de fractura de inclusiones. En el análisis espectral en el dominio de la frecuencia, para señales estacionarias o pseudo-estacionarias, la herramienta más utilizada en general es la transformada rápida de Fourier (FFT). Hay vasta literatura en la cual se puede encontrar una buena descripción de la metodología y de los fundamentos del tema [National semiconductor (1980)] [Cooley y Tukey (1965)].

En el dominio tiempo-frecuencia, para señales no estacionarias se suele aplicar la transformada de Fourier de tiempo corto (o STFT), y en los últimos años se ha generalizado la utilización de una nueva descomposición de la señal a partir de la Transformada Onditas (TO) o “wavelets” [Addison (2002)] [Daubechies (1992)] [D’Attellis (1995)]. Estas onditas permiten (al igual que la STFT) calcular y graficar la potencia de una señal en función de la frecuencia y el tiempo. La descomposición en onditas, en lugar de hacerse en función de ondas armónicas como en Fourier, se hace a partir de unas funciones denominadas onditas madres, tales como las de Gabor, Haar, Daubechies, Morlet y otras, que deben cumplir ciertas condiciones particulares para formar una base de descomposición. En la actualidad hay innumerables trabajos en la literatura que utilizan las onditas (“wavelets”) para estudiar las señales de EA descomponiéndolas en diagramas tiempo-frecuencia (o escala) en los cuales se puede estudiar por ejemplo la evolución de diferentes mecanismos físicos identificables por sus frecuencias características como: tipos de fracturas en materiales [Suzuki y otros (1996)], desgaste de herramientas de corte [Gómez y otros (2007b)] o en la evaluación de la adherencia de recubrimientos delgados [Piotrkowski (2005)] [Piotrkowski (2009)]. En la Fig. 1.11 se muestra una señal continua de EA y su espectro de potencia calculado por FFT, mientras que en la Fig. 1.12 se observa una señal tipo explosión y su espectro de frecuencias con onditas. Estas últimas son no estacionarias, mientras que las continuas podrían ser consideradas “cuasi-estacionarias”. La estacionariedad de las señales se puede determinar con estadística de segundo orden a través de demostrar una invariancia en los momentos de la señal [Franks (1975)].

1.5.5 Patrones de radiación de las fuentes

Conociendo los patrones de radiación de distintos tipos de fuente (como los mostrados en la Fig. 1.5) se pueden comparar con los patrones medidos a caracterizar y determinar qué tipo de fuente produjo las señales estudiadas. Según Scruby es posible reconocer fácilmente fuentes de corte o de deslizamiento por la alternancia de la polaridad de las ondas. Por otro lado si todas las ondas arribadas tienen la misma amplitud se puede pensar que la fuente es un centro de expansión o dilatación.

1.5.6 Inversión de la función de Green o deconvolución de la señal.

Este método consiste en ir hacia atrás en el sistema de propagación de ondas desde el conjunto de formas de onda hacia la fuente. Ono (2000) lo propone como uno de los métodos con mayor

proyección a futuro. La inversión completa puede llevarse a cabo solo en piezas de geometrías simples. Si la posición de la fuente es conocida se puede trabajar con uno o más canales. Esta metodología, si bien es uno de los mejores métodos ya que no se basa en suposiciones, todavía tiene ciertos problemas en el sentido de la inestabilidad y la acumulación de errores cuando se trabaja con señales ruidosas. Esto fue verificado por Scruby (2001).

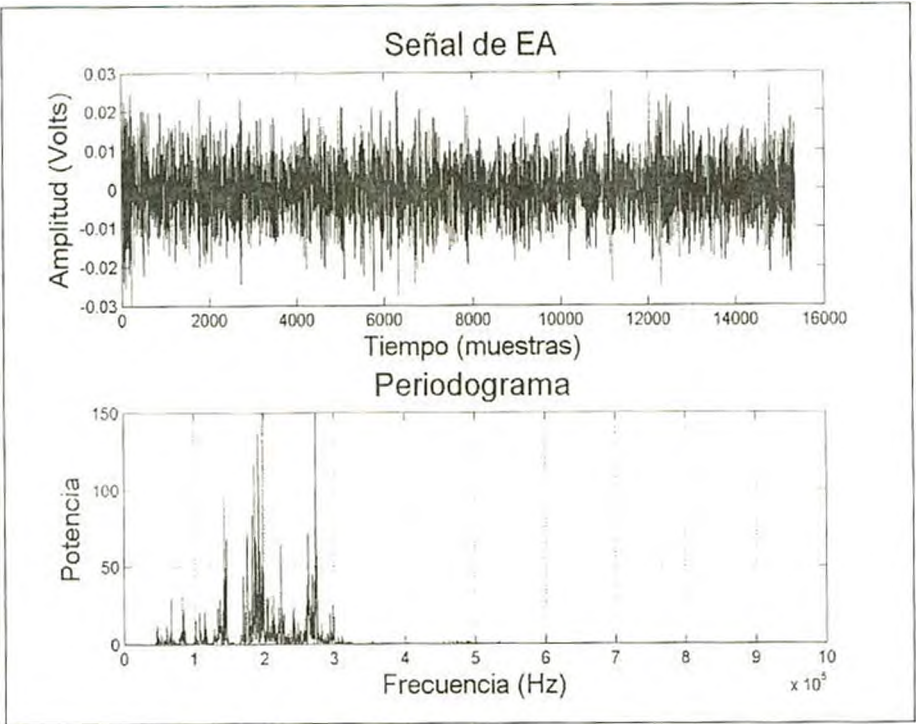


Fig. 1.11. Señal de EA y periodograma por FFT

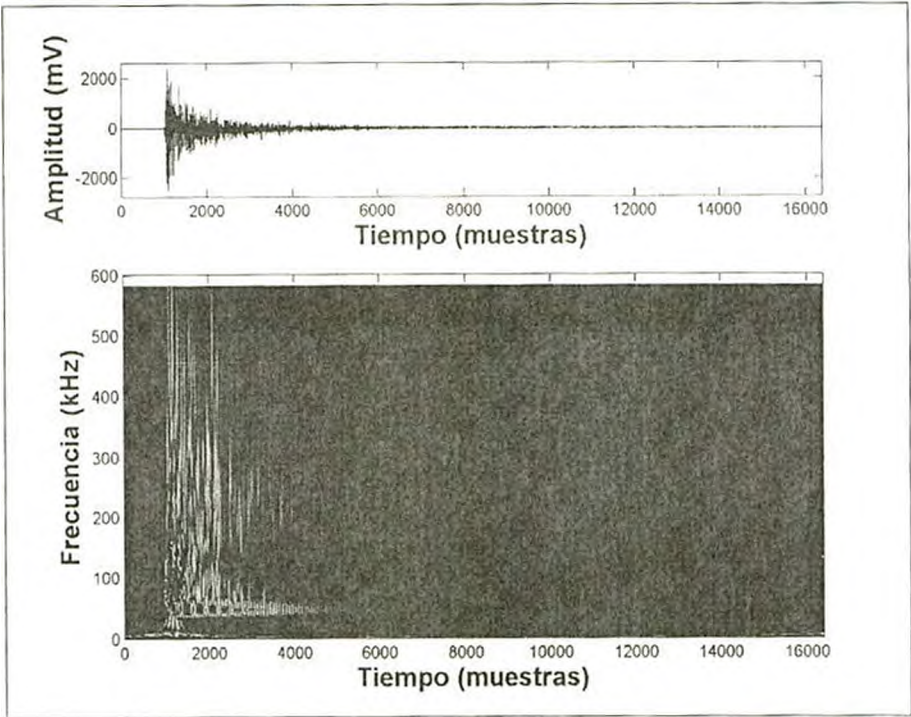


Fig. 1.12. Señal de EA y espectro tiempo-frecuencia de una señal tipo explosión. Los colores corresponden a la amplitud (azul mínimo, rojo máximo).

1.6 Bibliografía del Capítulo 1

- Achenbach, J.D., "Wave Propagation in Elastic Solids", North-Holland (1973)
- Addison P.S., "The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance", Institute of Physics Publishing, Bristol, (2002)
- Ahn B.W. and S.H. Lee, "Characterization and acoustic emission monitoring of AFM nanomachining", *J. Micromech. Microeng.*, 19, 045028-045034 (2009)
- Aki y Richards, "Quantitative seismology", University Science Books (2002)
- Arieli A., R.P. Wells, M.A. Hamstad and A.K. Mukherjee, "The use of acoustic emission techniques to monitor fracture processes in high strength precipitation hardened aluminum alloys", *Mechanics of Materials*, 2, 1-7 (1983)
- ASTM E 1316 – 97b, Book of Standards, "Standard Terminology for Nondestructive Testing", ASTM International, W. Conshohocken, PA, USA (1997b)
- ASTM E 1106 - 86, Book of Standards, "Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors", ASTM International, W. Conshohocken, PA, USA (1997a)
- ASTM E 976 - 00, Book of Standards, "Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response", ASTM International, W. Conshohocken, PA, USA (2001)
- ASTM E 1781 - 98, Book of Standards, "Standard Practice for Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors", ASTM International, W. Conshohocken, PA, USA (1999)
- Baram J. and M. Rosen, "Effect of Grain Size on the Acoustic Emission Generated During the Plastic Deformation of Aluminum", *Materials Science and Engineering*, 45, 255-262 (1980)
- Baranov V.M., E.M. Kudryavtsev, G.A. Sarychev, "Modeling of the parameters of acoustic emission under sliding friction of solids", *Wear*, 202, 125-133(1997)
- Baranov V., E. Kudryavtsev, G. Sarychev and V. Schavelin "Acoustic emission in friction", Tribology and interface engineering series, B.J. Briscoe (Ed.), Springer (2007)
- Barry J., G. Byrne and D. Lennon, "Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, 1055-1070 (2001)
- Belyi V., O. Kholodilov and A.I. Sviridyonok, "Acoustic spectrometry as used for the evaluation of Tribological systems", *Wear*, 69, 309-319(1981)
- Benabdallah H., "Friction wear and acoustic emissions of some plastics sliding against Si₃N₄", *Wear*, 264, 152-156 (2008)
- Breckenridge F.R., "Acoustic emission transducer calibration by the seismic surface pulse", *Journal of Acoustic Emission*, 1, 87-102 (1982)
- Breckenridge F.R. and M. Greenspan, "Surface wave displacement: absolute measurements using a capacitive transducer", *J. Acoust. Soc. Am.*, 1177-1185 (1981)
- Breckenridge F.R., T. Watanabe and H. Hatano, "Calibration of AE transducers: comparison of two methods", *Progress in AE*, 448-458 (1982)
- Brindley B.J., J. Holt and I.G. Palmer, "Acoustic emission - 3: The use of ring-down counting", *Non-Destructive Testing*, 6, 299-306 (1973)
- Carpenter and Higgins, "The identification of sources of acoustic emission operative during deformation", The Third AE Symposium, 288-304 (1991)
- Carpenter H., C.R. Heiple, D.L. Armentrout, F.M. Kustas and J.S. Schwartzberg, "Acoustic Emission Produced by Sliding Friction and Its Relationship to AE from Machining.", *Journal of Acoustic Emission*, 10, 97-101 (1992)
- Carpinteri, G. Lacidogna and N. Pugno, "Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring", *Engineering Fracture Mechanics*, 74, 273-289 (2007)

- Clough R. B., "Mobile dislocation density and velocity in plastically deformed aluminum at room temperature", *Scripta Metallurgica*, 6, 293-298 (1972)
- Clough R.B., "The energetics of Acoustic Emission Source Characterization", *Mat. Eval.*, 45, 556-563 (1987)
- Cooley J.W. and J.W. Tukey "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", *Math. Comp.*, 19, 297-301 (1965)
- Corral A., "Scaling and universality in the dynamics of seismic occurrence and beyond", in: "Acoustic Emission and Critical Phenomena", Carpinteri & Lacidogna (Eds.), Taylor & Francis Group, London, 225-244 (2008)
- D'Attellis C.E., M.T. Anaya, M.I. Cavallaro y F. Villaverde, "Introducción a las onditas", Nueva librería, (1995)
- Daubechies I., "Ten lectures on wavelets", SIAM (1992)
- Diniz A.E., J.J. Liu and D. A. Dornfeld, "Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning", *Wear*, 152, 395-407 (1992)
- Drouillard T., "A History of Acoustic Emission", *J. of Acoustic Emission*, 14, 1-34 (1996)
- Dunegan H.L. and A.T. Green, "Factors affecting acoustic emission response from materials", *Mat. Res. and Std.*, 11, 1-4 (1971)
- Dunegan L. and C.A. Tatro, "Passive pressure transducer utilizing acoustic emission", *Review of Scientific Instruments*, 38, 1145-1147 (1967)
- Egle D. M. and C. A. Tatro, "Analysis of Acoustic-Emission Strain Waves", *Journal of the Acoustical Society of America*, 41, 321-327 (1967)
- Egle D.M., "A stochastic model for transient acoustic emission signals", *J. Acoust. Soc. Am.*, 65, 1198-1203 (1979)
- Egle D.M., C.A. Tatro and A.E. Brown, "Frequency spectra of acoustic Emission from Nodular Cast Iron", *Mat. Eval.*, 39, 1037-1044 (1981)
- Egle D.M., "Wave propagation" ", in: "Nondestructive Testing Handbook - Acoustic Emission Testing", Vol. 5, 2nd ed., Paul Mc Intire (Ed.), ASNT, USA, 92-120 (1985)
- Eitzen D.G. and H.N.G. Wadley, "Acoustic Emission: establishing the fundamentals", *Journal of research of the NBS*, 89, 75-97 (1984)
- Enoki M. and T. Kishi, "Theory and Analysis of Deformation Moment Tensor Due to Microcracking", *International Journal of Fracture*, 38, 295-310 (1988)
- Erlenkamper S., "Time and Amplitude of Acoustic Emission Signals in Fracture Mechanism Experiments", *Proc. Deutsche Gessellschaft für Metallkunde eV*, 165-188 (1979)
- Eshelby J.D., "The Interaction of Kinks and Elastic Waves", *Proc R Soc.*, A266, 222-246 (1962)
- Fan Y., F. Gu and A. Ball, "Modeling acoustic emissions generated by sliding friction", *Wear*, 268, 811-815 (2010)
- Fano U., "Ionization Yield of Radiations. II. The Fluctuations of the Number of Ions", *Phys. Rev.*, 72, 26-29 (1947)
- Ferrer C., F. Salas, M. Pascual and J. Orozco, "Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples", *Tribology International*, 43, 1-6 (2010)
- Fleischmann P., D. Rouby, F. Lakestani and J. C. Baboux, "A spectrum analysis of acoustic emission", *Non-Destructive Testing*, 8, 241-244 (1975)
- Franks L.E., "Teoría de la señal", Reverte, Barcelona, Cap.7, 218-220 (1975)
- Frydman R., R. Pascual and R.M. Volpi, "Acoustic emission due to dislocations and grain boundaries", *Scripta Metallurgica*, 9, 1267-1270 (1975)
- Gillis P.P., "Dislocation Motions and Acoustic Emissions", Acoustic Emission, ASTM STP 505, American Society for Testing and Materials, 20-29 (1972)
- Gillis P.P. and M.A. Hamstad, "Some Fundamental Aspects of the Theory of Acoustic Emission", *Materials Science and Engineering*, 14, 103-108 (1974)

- Gómez, M.P., "Caracterización de materiales mediante técnicas de ultrasonido", Tesis de Licenciatura en Cs. Física, FCEyN, UBA (2000).
- Gómez M.P., "Caracterización de niveles de hidrogeno en aleaciones de base circonio de interés nuclear por técnicas de ultrasonido", Tesis de Maestría, IT Sabato, UNSAM CNEA (2003)
- Gómez M.P., J.I. Mieza, J. Ruzzante y C. D'Attellis, "Caracterización de señales de Emisión Acústica mediante su análisis temporal como procesos estocásticos", *Actas de la XI RPIC*, 697-702 (2005a)
- Gómez M.P., A.D. Banchik, M.I. López Pumarega and J.E. Ruzzante, "Ultrasonic attenuation in zircaloy-4", *Rev. of Prog. in QNDE*, 24B, 1239 (2005b)
- Gómez M.P., C.E. D'Attellis y J.E. Ruzzante, "Estimación del Estado de la herramienta en taladrado mediante el análisis de la emisión acústica", *Actas del 5to. Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica*, E-GLEA 5, 7-16 (2007a)
- Gómez M.P., R. Piotrkowski, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Estimation of the Tool Condition by Applying the Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals", *Rev of Prog in QNDE*, 894, 635-641 (2007b)
- Gómez M.P., A.M. Hey, J.E. Ruzzante, C.E. D'Attellis, "Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission", *Physics Procedia*, 3, 819-825 (2010).
- Gonzalez de la Rosa J., A. Gallego, R. Piotrkowski, E. Castro and A. Moreno-Muñoz, "Termites detection via spectral kurtosis and wavelet de-noising of acoustic emission signals", *J. Acoustic Emission*, 26, 142-151 (2008)
- Grabec I., "Relation between development of defects in materials and acoustic", *Ultrasonics*, 9-12 (1980)
- Green Jr. R.E., "Non-contact ultrasonic techniques", *Ultrasonics*, 42, 9-16(2004)
- Greenspan M., "The NBS conical transducer: Analysis", *J. Acoust. Soc. Am.*, 81, 173- 183(1986)
- Greve D.W., I.J. Oppenheim, W. Wu and A.P. Wright, "Development of a MEMS Acoustic Emission Sensor System", *Proc of SPIE*, 6529, 652912 1-7 (2007)
- Grosse C. and L. Linzer, "Signal-Based AE Analysis", in: "Acoustic Emission Testing", C. Grosse and M Othsu (Eds.), Springer, 53-100 (2008)
- Hardy H.R., "Acoustic Emission and Microseismic Activity" Vol. 1, A.A. Balkema publishers (2003)
- Harker A.H., "Elastic Waves in Solids, With Applications to Nondestructive Testing of Pipelines", A. Hilger in association with British Gas, 1988 (Bristol and Philadelphia)
- Hatano H., "Quantitative measurements of acoustic emission related to its microscopic mechanisms", *J. Acoust. Soc. Am.*, 57, 639-645 (1975)
- Hatano H., "Reciprocity calibration of acoustic emission transducers in Rayleigh-wave and longitudinal-wave sound fields", *IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics and Freq Control*, 45, 1221-1228 (1998)
- Hatano H. and E. Mori, "Acoustic-emission transducer and its absolute calibration", *J. Acoust. Soc. Am.*, 59, 344-349 (1976)
- Heiple C.R., and S.H. Carpenter, "Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and Alloys-A Review: Part I", *Journal of Acoustic Emission*, 6, 177-204 (1987a)
- Heiple C.R. and S.H. Carpenter, "Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and Alloys-A Review: Part II", *Journal of Acoustic Emission*, 6, 215-237 (1987b)
- Higgins F.P. and S.H. Carpenter, "Sources of acoustic emission generated during the tensile deformation of pure iron", *Acta Metallurgica*, 26, 133-139 (1978)
- Hisakado T. and T. Warashina, "Relationship between friction and wear properties and acoustic emission characteristic: iron pin on hardened bearing steel disk", *Wear*, 216, 1-7(1997)
- Howells E. and E.T. Norton, "Detection of partial discharges in transformers using acoustic emission techniques", *IEEE Trans.*, 97, 1538-1549 (1978)

- Hsu N.N. and F.R. Breckenridge, "Characterization and calibration of acoustic emission sensors", *Mat Eval.*, 39, 60-68 (1981)
- Hsu S. and K. Ono, "Acoustic emission behavior of Nickel during tensile deformation", *J. of Acoustic Emission*, 1, 183-190 (1982)
- IRAM, "Norma IRAM-MERCOSUR NM 302 – Terminología de la Emisión Acústica", IRAM (2005)
- James D. and S. Carpenter, "Relationship Between Acoustic Emission and Dislocation Kinetics in Crystalline Solids", *J. of Applied Phys.*, 42, 4685-4697 (1971)
- Janoschek E., H.P. Keller and P. Runow, "Determination of surface work crack growth applying a new acoustic emission criterion based on measurements on compact specimens: Acoustic Emission", J. Eisenblatter (Ed.), 227-234, DGM Informationsgesellschaft, Verlag (1988)
- Jiaa C.L. and D. Dornfeld, "Experimental studies of sliding friction and wear via acoustic emission signal analysis", *Wear*, 139, 403-424 (1990)
- Jomdecha C., A. Prateepasen and P. Kaewtrakulpong, "Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types", *NDT&E International*, 40, 584-593(2007)
- Kim H.C. and T. Kishi, "Acoustic Emission in plastic Deformation- Acoustic Emission Energy Release During Plastic Deformation of Polycrystalline Aluminium", *4th AE Symp.*, Tokyo (1978)
- Kim H.C. and H.K. Park, "Laser interferometry system for measuring displacement amplitude of acoustic emission signals", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 17, 673-675 (1984)
- Kishinoue F., "An experiment on the progression of fracture (a preliminary report)" (translated by K. Ono), *J. of Acoust. Emission*, 9, 177-180 (1990)
- Kline R.A, C. H. Palmer and R.E. Green, Jr., "A comparison of optically and piezoelectrically sensed acoustic emission signals", *J. Acoust. Am.*, 64, 1633-1640 (1978)
- Koslowski M., R. LeSar and R. Thomson, "Avalanches and Scaling in Plastic Deformation", *Phys. Rev. Lett.*, 93, 125502-1-4 (2004)
- Kurz J.H., S. Köppel, L. Linzer, B. Schechinger and C.U. Grosse, "Source Localization", In: "Acoustic Emission Testing - Basics for research Application in Civil Engineering", C.U. Grosse and M. Ohtsu (Eds.), Springer, 101-148 (2008)
- Lee Y.C. and Z.B. Lin, "Miniature piezoelectric conical transducer: Fabrication evaluation and application", *Ultrasonics*, 44, e693-e697 (2006)
- Lingard S. and K.K. NG, "An investigation of acoustic emission in sliding friction and wear of metals", *Wear*, 130, 367-379 (1989)
- Lowen, S.B and M. Teich, "Estimation and Simulation of Fractal Stochastic Point Processes", *Fractals*, 3, 183 (1995).
- Lowen, S.B., T. Ozaki, E. Kaplan, B. Saleh and M. Teich, "Fractal features of dark, maintained, and driven neural discharges in the cat visual system", *Methods*, 24, 377-394 (2001)
- Mascaro B., J. Prior, L.K. Shark, J. Selfe, P. Cole and J. Goodacre, "Exploratory study of a non-invasive method based on acoustic emission for assessing the dynamic integrity of knee joints", *Medical Engineering & Physics*, 31, 1013-1022 (2009)
- Mba D. and L.D. Hall, "The transmission of acoustic emission across large-scale turbine rotors", *NDT&E International*, 35, 529-539 (2002)
- Mc Intosh J.S., D.A. Hutchins, D.R. Billson, T.J. Robertson, R.A. Noble and A.D. Jones, "The characterization of capacitive micromachined ultrasonic transducers in air", *Ultrasonics*, 40, 477-483 (2002)
- Merkulov L., "Investigation of ultrasonic scattering in metals", *Soviet Phys.- Tech. Phys* (English transl.), 1, 59-69 (1956)
- Merkulov L., *Soviet Phys.- Tech. Phys* (English transl.), 2, 1282-1286 (1957)
- Miguel M.C., A. Vespignani, S. Zapperi, J. Weiss and J.R. Grasso, "Complexity in dislocation dynamics: model", *Mater. Sci. Eng.*, A309-310, 324-327 (2001)

- Mintzer S., R. Pascual, R.M. Volpi, "Acoustic emission and grain size in plastic deformation of metals", *Scripta Metallurgica*, 12, 531-53 (1978)
- Mirabile M., "Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture", *NDT*, 8, 77-85 (1975)
- National Semiconductor, "Power spectra estimation", Application Note 255, 1-27 (1980)
- Natsik V.D. and K.A. Chishko, "Dynamics and emission of sound of a Franck-Read dislocation source", *Sov. Phys. Solid State*, 17, 214-215 (1975)
- Ohtsu M., "Acoustic Emission Source Kinematics Based on the Moving Dislocation Theory", *Journal of Acoustic Emission*, 2, 151-158 (1983)
- Ohtsu M., "Quantitative AE techniques Standardized for concrete structures", *Adv. Mat Res.*, 183-192 (2006)
- Ohtsu M., "History and Fundamentals" in "Acoustic Emission Testing", C. Grosse and M. Ohtsu (Eds.), Springer, 11-18 (2008a)
- Ohtsu M., "Sensors and Instruments" in "Acoustic Emission Testing", C. Grosse and M. Ohtsu (Eds.), Springer, 19-40 (2008b).
- Ohtsu M. and K. Ono, "A generalized theory of acoustic emission and Green's function in a half space", *J. Acoust. Emission*, 3, 27-40, (1984)
- Ohtsu M., Y. Tomoda and T. Suzuki, "Acoustic emission analysis of concrete for corrosion, damage and cracking mechanism" In: "Acoustic Emission and Critical Phenomena", Carpinteri & Lacidogna (Eds.), Taylor & Francis Group, London 87-102 (2008)
- Ono K., "The origin of continuous emission", *J. Acoust. Emission*, 23, 206-214, (2005)
- Ono K., "New goals for acoustic emission in materials research" in "Acoustic Emission Beyond the Millennium", T. Kishi, M. Ohtsu, S. Yuyama (Eds.), Elsevier, 57-76 (2000)
- Ono K., "Structural integrity evaluation by means of acoustic emission" In: "Acoustic Emission and Critical Phenomena", Carpinteri & Lacidogna (Eds.), Taylor & Francis Group, London, 13-28 (2008)
- Ono K., R. Landy and C. Ouchi, "On the Amplitude Distribution of burst Emission due to MnS Inclusions in HSLA Steels", Proc. The Fourth AE Symposium, High Pressure Institute of Japan, Tokyo, 4-33/4-45 (1978)
- Ono K. and M. Shibata, "MAE - New Method for Nondestructive Stress Measurement", *NDT International*, 5, 227-234 (1981)
- PAC, "PCI-2 Based AE system User Manual Rev. 2", Physical Acoustic Corporation, Princeton, NJ (2004)
- Palmer C.H. and R.E. Green Jr, "Optical detection of acoustic emission waves", *Applied Optics*, 16, 2333-2334 (1977)
- Palmer I.G. and P.T. Heald, "The application of acoustic emission measurements to fracture mechanics", *Mat. Sci. and Eng.*, 11, 181-184 (1973)
- Papadakis E., "Ultrasonic Attenuation Caused by Scattering in Polycrystalline Metals", *J. Acoust. Soc. Am.*, 37, 711-717 (1965)
- Papadakis E., "Physical Acoustic", Chapter 15, 269-328, Ed. P. Mason, Academic Press (1972)
- Pascual R., "Acoustic emission and dislocation multiplication during serrated flow of an aluminum alloy", *Scripta Metallurgica*, 8, 1461-1466 (1974)
- Pekeris, C. L., "The seismic surface pulse", *Geophysics*, 41, 469-480 (1955a)
- Pekeris, C. L., "The seismic buried pulse", *Geophysics*, 41, 629-639 (1955b)
- Pekeris, C. L. and H. Lifson, "Motion of the surface of a uniform elastic half space produced by a buried pulse", *J. Acoust Soc. Am.*, 29, 1233-1238 (1957)
- Piotrkowski R., A. Gallego, E. Castro, M.T. Garcia Hernandez and J.E. Ruzzante, "Ti and Cr nitride coating/steel adherence assessed by acoustic emission wavelet analysis", *NDT&E International*, 30, 260-267 (2005)

- Piotrkowski R., E. Castro and A. Gallego, "Wavelet power, entropy and bispectrum applied to AE signals for damage identification and evaluation of corroded galvanized steel", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23, 432-445 (2009)
- Pollock A., Acoustic Emission 2 - "Acoustic Emission Amplitudes", *Non-Destructive Testing*, 6, 264-269 (1973)
- Pollock A.A., "Acoustic emission inspection", PAC 1-14 "Acoustic emission Inspection", PAC internal report, TR 103-96-12/89, 29-40 (2003)
- Pollock A., "Some observations on acoustic emission/stress/time relationships", In: "Acoustic Emission and Critical Phenomena", Carpinteri & Lacidogna (Eds.), Taylor & Francis Group, London (2008)
- Proctor T.H., "An improved piezoelectric acoustic emission transducer", *J. Acoust. Soc. Am.*, 71, 1163-1168 (1982)
- Reinhardt H.W., C.U. Grosse and J.H. Kurz, "Localization and mode determination of fracture events by acoustic emission" In: "Acoustic Emission and Critical Phenomena", Carpinteri & Lacidogna (Eds.), Taylor & Francis Group, London, 41-66 (2008)
- Rigney D.A. and J.P. Hirth, "Plastic deformation and sliding friction of metals", *Wear*, 53, 345-370 (1979)
- Rundle, J.B., D.L. Turcotte, R. Shcherbakov, W. Klein and C. Sammis, "Statistical Physics Approach To Understanding The Multiscale Dynamics Of Earthquake Fault Systems", *Rev. Geophys.*, 41, 1019-1048 (2003)
- Schaarwachter W. and H. Ebener, "Acoustic emission: a probe into dislocation dynamics in plasticity", *Acta Metall. Mater.*, 38, 195-205 (1990)
- Scruby C.B., "Quantitative acoustic emission techniques", *Nondestr. Test.* (Chicago), 8, 141-210 (1985)
- Scruby C.B., "Instrument science and technology, An introduction to acoustic emission", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 20, 946-953 (1987)
- Scruby C.B., "Quantitative acoustic emission techniques", Sound Consultancy I (2001)
- Scruby C.B., J.C. Collingwood and H.N.G. Wadley, "A new technique for the measurement of acoustic emission transients and their relationship to crack propagation", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 11, 2359-2370 (1978)
- Scruby C.B. and H.N.G. Wadley, "A calibrated capacitance transducer for the detection of acoustic emission", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 11, 1487-1494 (1978)
- Scruby C.B., H. Wadley, and J.E. Sinclair, "The origin of acoustic emission during deformation of aluminium and aluminium-magnesium alloy", *Philos. Mag. A*, 44, 249-274 (1981)
- Scruby C.B., H.N.G. Wadley and J.J. Hill, "Dynamic elastic displacements at the surface of an elastic half space due to defect sources", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 16, 1069-1083 (1983)
- Shiotani T., "Contribution of AE monitoring to the new era of sustainable civil structures", In: "Acoustic Emission and Critical Phenomena", Carpinteri & Lacidogna (Eds.), Taylor & Francis Group, London, 127-153 (2008)
- Spanner J.C., "Acoustic emission Techniques and applications", Intex Publishing Company, Evanston, Illinois (1974)
- Stone D.E. and P.F. Dingwall, "Acoustic emission parameters and their interpretation", *NDT International*, 10, 51-62 (1977)
- Suzuki H., T. Kinjo, Y. Hayashi, M. Takemoto, and K. Ono, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals", *J. of Acoustic Emission*, 14, 69-84 (1996)
- Swindlehurst W., "Acoustic emission 1 - Introduction", *Non-Destructive Testing*, 6, 152-158 (1973)
- Tandon K.N and K. Tangri, "Acoustic emissions during deformation of polycrystalline Silicon Iron", *Materials Science and Engineering*, 20, 47-54 (1975)

- Theobald P.D., "Optical calibration for both out-of-plane and in-plane displacement sensitivity of acoustic emission sensors", *Ultrasonics*, 49, 623-627 (2009)
- Theobald P., R.T. Rakowski, T. Yan, D. Jarvis, S. Dowson and B.E. Jones, "Reference Source for the Calibration of Acoustic Emission Measurement", *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 412-416 (2001)
- Theobald P.D., T.J. Esward, S.P. Dowson and R.C. Preston, "Acoustic emission transducers development of a facility for traceable out-of-plane displacement calibration", *Ultrasonics*, 43, 343-350 (2005)
- Turner, S., S.B. Lowen, M.C. Feurstein, C. Heneghan, H. Feichtinger and M. Teich, "Analysis, Synthesis, and Estimation of Fractal-Rate Stochastic Point Processes", *Fractals*, 5, 565-595 (1997)
- Truell R., C. Elbaum y B. Chick, "Ultrasonic Methods in Solid State Physics", Academic Press, New York, (1969)
- Turcotte D.L., J.B. Rundle, M. Yoder, S.G. Abaimov and W. Klein "Nucleation and critical phenomena, damage, and characteristic earthquakes" In: "Acoustic Emission and Critical Phenomena", Carpinteri & Lacidogna (Eds.), Taylor & Francis Group, London, 187-204 (2008)
- Viehrig H.W., K. Popp and R. Rintamaa, "Measurement of Dynamic Elastic-Plastic Fracture Toughness Parameters Using Various Methods", *Int. J. Pres. Ves. Piping*, 55, 233-241 (1993)
- Wadley H. and C. Scruby, "Effect of ageing at 170° C on Acoustic emission during deformation of Al-4% Cu", *Metal Science*, 285-289 (1978)
- Wadley H., C.B. Scruby and J.H. Speake, "Acoustic emission for physical examination", *Int. Met. Rev.*, 2, 41-64 (1980)
- Wadley H.N.G and J.A. Simmons, "Microscopic origins of acoustic emission", in: *Nondestructive Testing Handbook Acoustic Emission Testing*, Vol. 5, 2nd. ed., Paul Mc Intire (Ed.), ASNT, USA (1985)
- Wang Q. and F. Chu, "Experimental determination of the rubbing location by means of acoustic emission and wavelet transform", *Journal of Sound and Vibration*, 248, 91-103 (2001)
- Webborn T.J.C. and R.D. Rawlings, "Acoustic emission from structural steels and Fe-C alloys", *Met. Sci.*, 15, 533-540 (1981)
- Weiss J., J.R. Grasso, M.C. Miguel, A. Vespignani and S. Zapperi, "Complexity in dislocation dynamics: experiments", *Mater. Sci. Eng.*, A309-310, 360-364 (2001)
- Yan T. and B.E. Jones, "Traceability of acoustic emission measurements using energy calibration methods", *Meas. Sci. Technol.*, 11, L9-L12 (2000)
- Yan T., P. Theobald, B.E. Jones, "A self-calibrating piezoelectric transducer with integral sensor for in situ energy calibration of acoustic emission", *NDT & E International*, 35, 459-464 (2002)
- Zapperi S., A. Vespignani and H.E. Stanley, "Plasticity and avalanche behaviour in microfracturing phenomena", *Nature*, 388, 658-660 (1997)

Capítulo 2

Conceptos básicos del proceso de corte de metales

La idea de este capítulo es la incorporación de conceptos y terminología relativos al corte de metales, que servirán de base para la comprensión de los experimentos y mediciones realizados en esta tesis.

En un primer paso se define el maquinado por arranque de viruta, en particular para una herramienta simple con forma de cuña, y se desarrolla el concepto de corte ortogonal, avanzando de manera resumida sobre los distintos modelos siguiendo una línea temporal desde los modelos más sencillos de línea de corte hasta los que involucran una zona de corte. También se comenta la extensión de los modelos para el corte oblicuo que es el caso más general que representa a la mayoría de procesos industriales de maquinado. A continuación se describe la acción de la fricción en la cara de la herramienta, los tipos de viruta, la energía del corte y la fuerza de avance. Luego se hace una resumida descripción de la idea de duración y desgaste de las herramientas que será tratada nuevamente en el siguiente capítulo, y los factores que repercuten en esta, tales como el ángulo de corte, los materiales utilizados en las herramientas, la maquinabilidad de los materiales utilizados en las piezas y el uso de fluidos de corte.

Por último se describe el proceso de taladrado. En primer lugar, la nomenclatura utilizada en la literatura y en esta tesis, para poder describir luego, de una manera resumida, la mecánica del corte.

2.1 Maquinado de piezas por arranque de viruta

2.1.1. Introducción

El proceso de maquinado es aquel que permite llevar a una pieza a las dimensiones y el acabado superficial deseados mediante el arranque de fragmentos del material denominados viruta. El objetivo es lograr una pieza terminada con pequeñas tolerancias y una alta calidad superficial. Se define el corte como el arranque de la viruta por medio de un instrumento que permite la aplicación de una fuerza a través de su filo sobre el material que se desea eliminar. Hay normas internacionales que clasifican los distintos procedimientos de corte.

La disposición de los filos en las herramientas puede ser de manera geométrica o no. En el primer caso podríamos citar como ejemplos el torneado, el taladrado, el fresado, el cepillado, etc. donde los filos tienen una geometría determinada. El segundo caso podría ejemplificarse con el amolado donde los filos están aleatoriamente distribuidos.

Para el primer caso, el proceso básico de arranque de viruta es muy similar en todos los procedimientos de corte ejemplificados. Por tal motivo se estudiará la zona de corte en un esquema que representa al torneado pero puede ser extendido a los demás. Esta zona es la de interacción entre la herramienta y el material a cortar. Debido a las características del material a cortar la herramienta deberá tener un filo de ángulo grande. El material se va cortando en sucesivas capas.

2.1.2 Corte de metales con una herramienta en forma de cuña

Se describe a continuación el modelo general de la herramienta de corte con forma de cuña determinada por dos planos, uno denominado “cara”, “superficie de desprendimiento” o “plano de ataque”, y el otro “flanco de la herramienta” o “superficie de incidencia”, quedando definido el filo rectilíneo por la intersección de ambas superficies.

El comienzo del estudio sistemático del corte de metales se remonta a finales del siglo XIX, pero los aportes más significativos en el tema han sido realizados en las décadas de mediados del siglo XX, siendo de gran importancia en el desarrollo de la teoría del corte los trabajos de Piispanen (1937), Ernst (1938), Merchant (1944), Shaw (1950), Zorev (1966), Oxley (1961), que van presentando una evolución en la determinación teórica de modelos para representar este proceso.

En el corte la herramienta genera una superficie plana, paralela al plano original del material a ser cortado. El filo de la herramienta irá avanzando sobre el material con dos velocidades características. La velocidad “de corte” es aquella que se mide entre la herramienta y el material, y se corresponde con el desplazamiento paralelo a la superficie maquinada en función del tiempo. La otra velocidad es la “de avance” en la dirección perpendicular a dicha superficie. La orientación relativa entre el filo y la dirección de desplazamiento definirá el tipo de corte, en función de esta orientación se especificará si el corte es ortogonal u oblicuo.

Corte ortogonal y oblicuo

En el corte ortogonal el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección del movimiento relativo entre la pieza y la herramienta. Este caso se puede representar en dos dimensiones. Cuando el filo y el plano de flujo de la viruta no son perpendiculares a la dirección de movimiento relativo entre la pieza y la herramienta el corte se denomina oblicuo. (Merchant) En la Fig. 2.1 se muestran ambos casos. Este modelo es una simplificación de los casos reales.

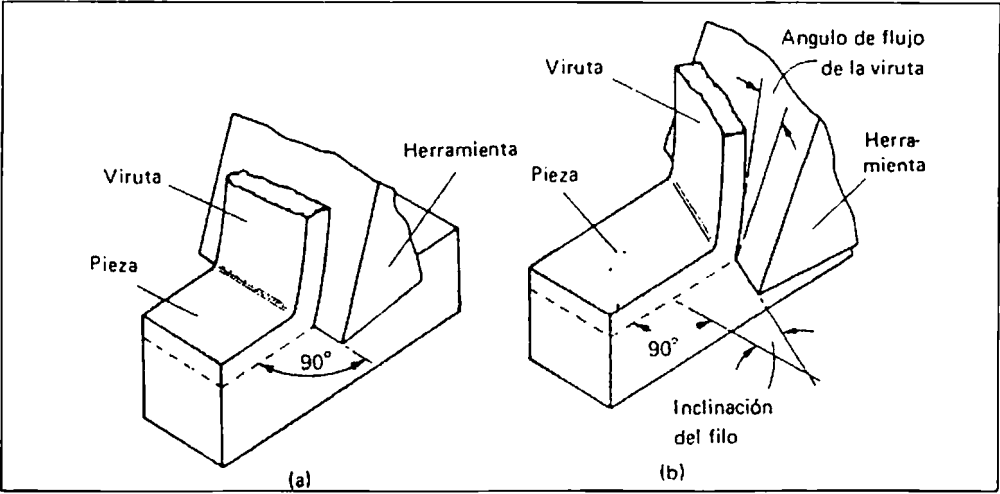


Fig.2.1. Tipos de corte. a. ortogonal. b. oblicuo.

2.2 Corte ortogonal. Modelo bidimensional

En la Fig. 2.2 se observa la zona de corte para el caso ortogonal, que puede representarse en un esquema bidimensional. Esta teoría fue consecuencia de la evolución de experimentos e ideas de fines del siglo XIX que fueron extendidas posteriormente por Piispanen (1937) y Ernst y Merchant (1941). El filo de la herramienta produce la separación de una fracción del material, la viruta. Esta comienza en la denominada “zona primaria de deformación” que está confinada en las proximidades del plano simple, denominado “de corte”, que se extiende desde el filo hasta la superficie de la pieza, precisamente en la línea que divide la viruta con el material sin cortar. El ángulo formado entre el plano de corte y la superficie del material es de gran importancia en el estudio del corte y se denomina ángulo de corte (φ).

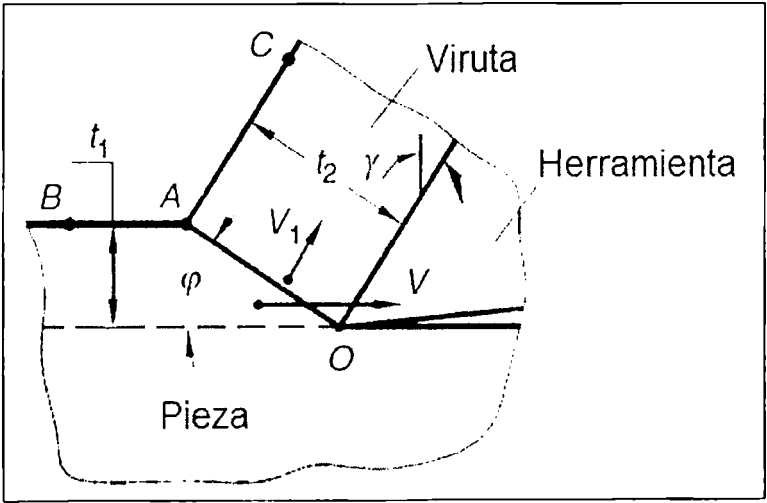


Fig. 2.2. Zona de corte para el caso ortogonal. [Astakhov (2006)]

Hay otros dos ángulos importantes en la descripción del corte. Uno de los parámetros más significativos del corte es el ángulo “de ataque” o “de desprendimiento” o según la norma ISO “de inclinación normal efectiva” (γ), que describe la pendiente de la cara de la herramienta respecto de la perpendicular a la superficie de corte generada. El otro es el ángulo “de incidencia efectiva” o “normal efectivo” (α) formado entre el flanco de la herramienta y la superficie generada en la pieza. Este ángulo puede afectar el desgaste de la herramienta.

Merchant definió también otras dos zonas de interés en el proceso de corte que son: la “zona de deformación secundaria” producida por el contacto entre la cara de la herramienta y la viruta, y la “zona terciaria” entre el flanco y la superficie ya maquinada.

2.2.1 Análisis de la zona de deformación primaria. Modelos para el ángulo de corte

2.2.1.1 Teoría del corte plano y de la línea de deslizamiento ideal

La profundidad de cada capa de material removida se denomina espesor de viruta no deformada denominada t_1 (acorde a la literatura se nota con la letra t de “thickness” o espesor). El espesor de la viruta deformada que aparece más allá del ángulo de corte se denomina t_2 . En este modelo se supone que la viruta es continua.

La relación entre φ , γ , t_1 y t_2 se deriva de la geometría, dando la siguiente expresión:

$$\tan \varphi = \frac{(t_1/t_2)\cos\gamma}{1 - (t_1/t_2)\sin\gamma} \quad (2.1)$$

Piispanen imaginó el modelo de la formación de la viruta, en el proceso de corte ortogonal, por medio de una analogía con una pila de cartas, en la cual estas se desplazan sucesivamente en una pequeña cantidad respecto de sus vecinas cuando se aplica una fuerza, es decir cuando el corte progresa (Fig. 2.3). Entonces, los planos cristalinos que son representados por las cartas tendrán direcciones de deformación que no coincidirán con la dirección de corte. Si pensáramos la red cristalina constituida de círculos (en el modelo bidimensional) estos se convertirán en elipses en la dirección de deformación de la red cristalina. De esta manera se define el ángulo de deformación de la red, que puede notarse con la letra griega φ .

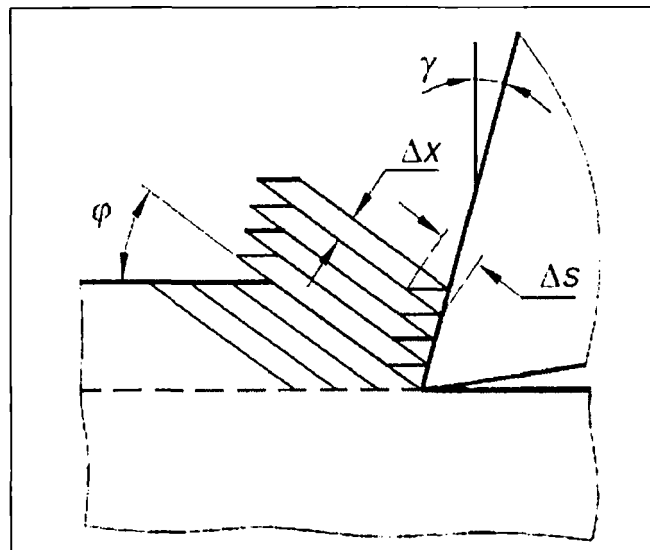


Fig. 2.3. Deslizamiento de planos (modelo de cartas) según Piispanen. [Astakhov (2006)]

Fuerzas que actúan sobre el corte

Los modelos del corte de Piispanen (1937) y Merchant (1944) coinciden en las representaciones de las fuerzas involucradas para la generación de la viruta continua, que luego Merchant sintetiza en un esquema o diagrama condensado de fuerzas. Esta representación muestra las relaciones entre las fuerzas del conjunto herramienta-viruta-material. Como se observa en la Fig. 2.4, la resultante R sobre la herramienta puede descomponerse en función de F y N , y por otro lado como F_C y F_T . Se supone que la fuerza R se transmite al material a través de la zona de contacto entre la viruta y la herramienta.

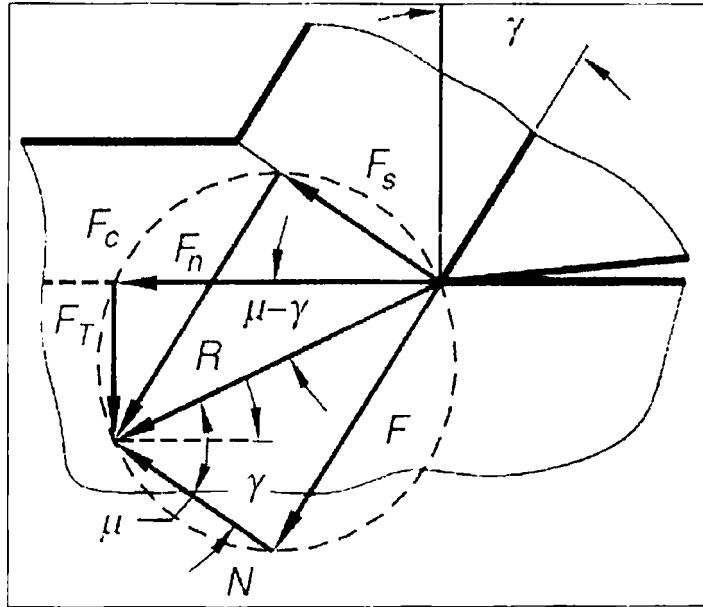


Fig. 2.4. Relaciones entre las fuerzas del conjunto herramienta-viruta-material. [Astakhov (2006)]

De la información contenida en ese esquema se pueden extraer las siguientes relaciones:

$$F = N \tan \mu \quad (2.2)$$

$$F = F_t \cos \gamma + F_c \sin \gamma \quad (2.3)$$

$$F = F_c \cos \varphi - F_t \sin \varphi \quad (2.4)$$

$$S_n = \frac{F_s}{A_s} = (F_c \sin \varphi \cos \varphi - F_t \sin^2 \varphi) / A_0 \quad (2.5)$$

$$S_n = \frac{F_n}{A_s} = S_s \tan(\varphi + \mu - \gamma) \quad (2.6)$$

$$W_c = W_f + W_s = \frac{F}{A_c} + S_s \varepsilon \quad (2.7)$$

A_s : es el área del plano de cizalladura.

A_0 : es el área de la viruta sin deformar.

S_s : es la resistencia a la cizalladura del material en el plano de cizalladura.

S_n : es el esfuerzo normal que actúa sobre el plano de cizalladura.

Ernst y Merchant (1941) buscaron una ecuación para el ángulo de corte φ suponiendo que este deberá ser tal que minimice el trabajo de corte W_c , acorde al principio de mínima energía. Dado que la F_c es la única responsable del trabajo total hecho en el corte por unidad de distancia recorrida por la herramienta, entonces para un dado ángulo $(\mu - \gamma)$, el ángulo φ asumirá aquel valor que hace que F_c sea mínima [Merchant (1945b)].

$$F_c = R \cos(\varphi + \mu - \gamma) \quad (2.8)$$

$$F_s = S_s A_s = \frac{S_s A_0}{\sin \varphi} \quad (2.9)$$

$$F_c = R \cos(\mu - \gamma) \quad (2.10)$$

$$F_c = \frac{F_s \cos(\mu - \gamma)}{\cos(\varphi + \mu - \gamma)} \quad (2.11)$$

$$F_T = \frac{F_s \sin(\mu - \gamma)}{\cos(\varphi + \mu - \gamma)} \quad (2.12)$$

De esa manera, el φ que minimiza a la F_C estará dado por:

$$\boxed{2\varphi + \mu - \gamma = \pi/2} \quad (2.13)$$

Estos resultados cuantitativamente tuvieron éxitos parciales ya que mostraron un buen ajuste en materiales plásticos, pero no en los aceros, los cuales eran el objetivo de la teoría. Por tal motivo se agregaron nuevas consideraciones para intentar salvar el problema, proponiendo que la resistencia a la cizalladura aumenta con el esfuerzo normal (demostrado en policristalinos) que actúa sobre el plano de cizalladura.

$$S_s = S_0 + kS_n \quad (2.14)$$

Llegándose a la ecuación:

$$F_C = \frac{S_0 A_0 \cos(\mu - \gamma)}{\sin \varphi \cos(\varphi + \mu - \gamma) [1 - k \tan(\varphi + \mu - \gamma)]} \quad (2.15)$$

τ : es el ángulo medio de fricción entre la viruta y la herramienta.

k : es una constante.

S_0 : es el S_s con $S = 0$

También esto podría escribirse como:

$$\boxed{2\varphi = \cot^{-1} K + \mu - \gamma} \quad (2.16)$$

donde la constante K es la pendiente de la curva de la resistencia a la cizalladura versus la tensión normal compresiva que actúa en el plano de corte. Lamentablemente el valor de K requerido para satisfacer los datos del corte no ha sido confirmado de manera experimental y el modelo extendido de Merchant no ajustaba bien con datos experimentales.

Prosiguiendo la línea de Merchant (1945), Lee y Schaffer (1951) proponen otra teoría para predecir el ángulo de cizalladura planteando un modelo teórico basado en la plasticidad que se presenta en la zona de corte, suponiendo flujo plástico plano en un material idealmente plástico, el cual se asume que no es endurecido por trabajado mecánico. Lee y Schaffer hacen la suposición que esto es una buena aproximación para el acero a altos niveles de deformación como ocurre en el maquinado.

Otras suposiciones del modelo son: por un lado que la deformación ocurre en la línea de deslizamiento AB y en una zona plástica triangular que existe arriba de la línea AB , con líneas de deslizamiento paralelas y normales a AB (Fig. 2.5), y por otro que la viruta generada es continua.

Para el caso más general se llega a la relación:

$$\varphi + \mu - \gamma = \pi/4 \quad (2.17)$$

Luego en este modelo ellos incluyen un fenómeno denominado filo recrecido, llegando a que el ángulo de corte será:

$$\varphi = \pi/4 + \mu - \gamma + \theta \quad (2.18)$$

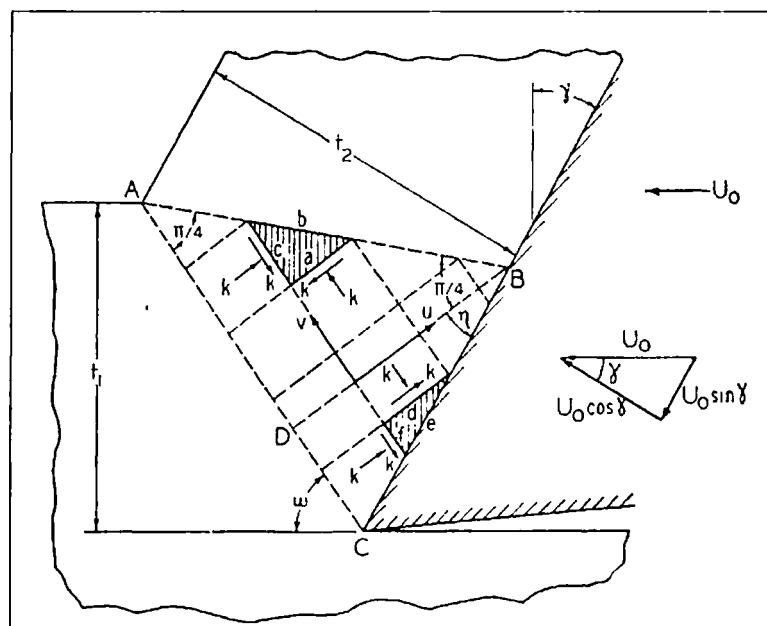


Fig. 2.5. Líneas de deslizamiento paralelas y perpendiculares al plano de corte. [Lee and Schaffer (1951)]

Donde θ es el tamaño del filo recrecido. Pero la evidencia experimental mostró que este modelo tampoco lograba describir cuantitativamente con éxito el ángulo de corte. Una ecuación similar fue publicada por Shaw, Cook y Finnie (1953) en la cual en lugar del tamaño del filo recrecido se tomó la desviación del plano de corte de la dirección de máxima tensión de cizalladura. La ventaja que tenía esta corrección era que podía tomar valores positivos y negativos dando más posibilidad a su correspondencia cuantitativa con resultados experimentales que tampoco cumplió. Igualmente, todos estos modelos, y en particular el de Piispanen-Merchant han sido muy útiles en la descripción cualitativa del proceso de corte ortogonal y se han usado vastamente en la literatura por su simplicidad. Además coinciden en que la fricción en la cara de la herramienta influye considerablemente en el proceso de corte, mientras que su validez se reduce a altas velocidades de corte. Una visión más amplia está dada por la teoría de la zona de corte expuesta a continuación.

Estas teorías pueden extenderse para el caso de viruta discontinua. Field y Merchant (1949) han extendido el análisis del maquinado con viruta continua al de metales frágiles y también para dúctiles a baja velocidad sin lubricación. Para esto también se han basado en el principio de energía mínima, con similares resultados.

2.2.1.2 Teoría de la zona de corte

Mucha evidencia experimental [Cook y otros (1954)] [Palmer y Oxley (1958)] [Zorev (1966)] [Astakhov (2006)] ha mostrado que la formación de la viruta no se limita como suponían Merchant, Piispanen o Ernst a un plano de corte, sino que se produce en una zona finita en los alrededores de este. De hecho, en la literatura de los años 60's [Zorev (1966)] y hasta la actualidad [Astakhov (2006)], se establecen claramente una justificación de las fallas del mencionado modelo.

La teoría de la zona de corte tiene en cuenta los efectos del flujo de tensión variable y de la velocidad de deformación, para explicar cualitativamente los efectos del cambio de la velocidad, del espesor de la viruta y de la formación de viruta discontinua. El origen de este modelo se remonta a 1896 cuando Briks propone que no es correcto pensar en un único plano de corte sino en una zona, idea que quedó congelada por 60 años. Zorev (1966) toma el modelo de Briks y lo modifica corrigiendo importantes errores conceptuales del mismo, y considerando la zona de deformación como la superposición de dos procesos independientes: deformación y fricción. Enahoro y Welsh (1965) dan meritos también a Okushima y Hitomi que en 1961 publican un trabajo en el que proponen el concepto de región de flujo entre la región rígida de la pieza y la región plástica de la viruta. Estas ideas se fusionan con la teoría propuesta por Oxley y

colaboradores [Palmer y Oxley (1958)] [Oxley (1961)] considerando el endurecimiento por deformación como parte de los mecanismos, suponiendo la validez del modelo aun a bajas velocidades de corte. Oxley cuestionó el método “de parada rápida” para la observación de la viruta en el cual se detenía el corte de manera abrupta, congelando el proceso de formación de la viruta, para luego observar las superficies de deformación con un microscopio. Un ejemplo es la Fig. 2.6, extraída de un trabajo de Roth (1977). Según Oxley ese método alteraba el corte estacionario y no representaba la totalidad del fenómeno. Por esta razón, lo reemplazó por el análisis de la evolución del corte, las trayectorias y velocidades de partículas de la viruta, observadas mediante técnicas de filmación. Con esos datos se lograron dibujar las líneas de flujo plástico para la formación de viruta y a partir de allí plantear un modelo para la zona plástica. En las Fig. 2.6 y 2.7 puede observarse la zona plástica de forma cuasi triangular con su vértice en las cercanías del filo, y delimitada por las líneas AB y CD. En la Fig. 2.7, extraída de Oxley (1961), también se muestra como la viruta se curva en la zona plástica, para continuar de manera plana y sin plasticidad al avanzar en el plano de ataque o cara de la herramienta. Además se observa la comparación entre la dirección de la fuerza resultante de la teoría de la línea de deslizamiento ideal, discutida en la sección anterior, con los resultados experimentales, las cuales no concuerdan, mostrando la falla de esa teoría. También se observa la resultante calculada con el modelo de Oxley, que contempla el endurecimiento por deformación, y que si concuerda con la resultante experimental. Palmer y Oxley encontraron que la forma de la zona de corte y la posición de la resultante de la fuerza de corte solo podrían ser explicadas si el flujo de la tensión de cizalladura fuera variable, y no constante como suponía el modelo ideal. Oxley describió una zona de corte formada por elementos que consistían en las líneas de corte, las cuales en el modelo ideal representaban una tensión hidrostática normal constante a lo largo de ese plano, mientras que en el modelo con endurecimiento podían representarse con la siguiente ecuación:

$$\Delta p = \frac{\Delta k}{\Delta S_1} \cdot \Delta S_2 \quad (2.19)$$

Δp : es el cambio de la tensión hidrostática a través de un elemento.

Δk : el cambio del flujo de la tensión de cizalladura.

ΔS_1 : es el ancho del elemento.

ΔS_2 : es el largo del elemento.

En el corte se encuentra que la viruta es más dura que el material de la pieza y por consiguiente la tensión normal a lo largo de la zona de corte tendrá su valor más alto en la superficie libre exterior y será menos compresiva en dirección a la punta de la herramienta.

Se puede considerar también la ecuación para calcular la tensión hidrostática en el punto A:

$$p_A = k \left\{ 1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right) \right\} \quad (2.20)$$

Con la (Ec. 2.20) puede calcularse la variación de la tensión hidrostática a lo largo de la zona de corte. Luego el endurecimiento del material estará relacionado con la pendiente de la curva tensión deformación del material de la pieza.

El tamaño de la zona plástica se incrementa cuando aumenta el ángulo de ataque de la herramienta. También la pendiente de la zona plástica con respecto a la dirección de corte se incrementa cuando el ángulo de ataque aumenta, según lo muestran micrografías en Bitans y Brown (1965). Esto puede observarse definiendo un ángulo de corte equivalente, haciendo una analogía al modelo propuesto por Piispanen y Merchant, en el cual ese ángulo estaba bien definido por el plano de corte (Fig. 2.8).

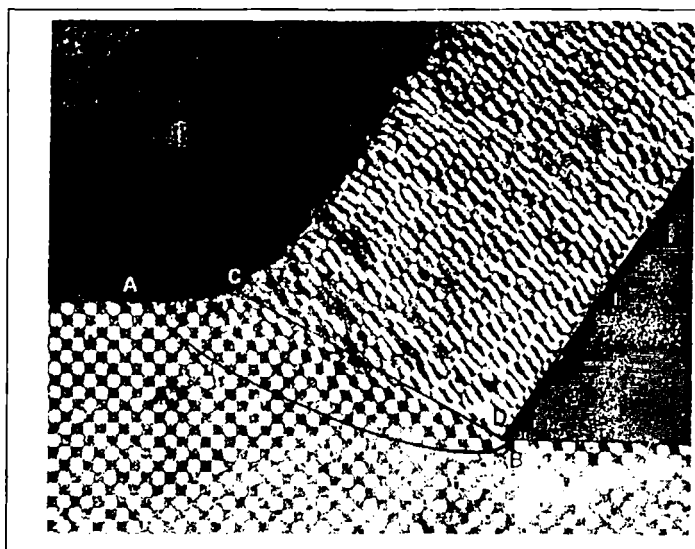


Fig. 2.6. Deformación de la viruta y la zona de corte. [Roth (1977)]

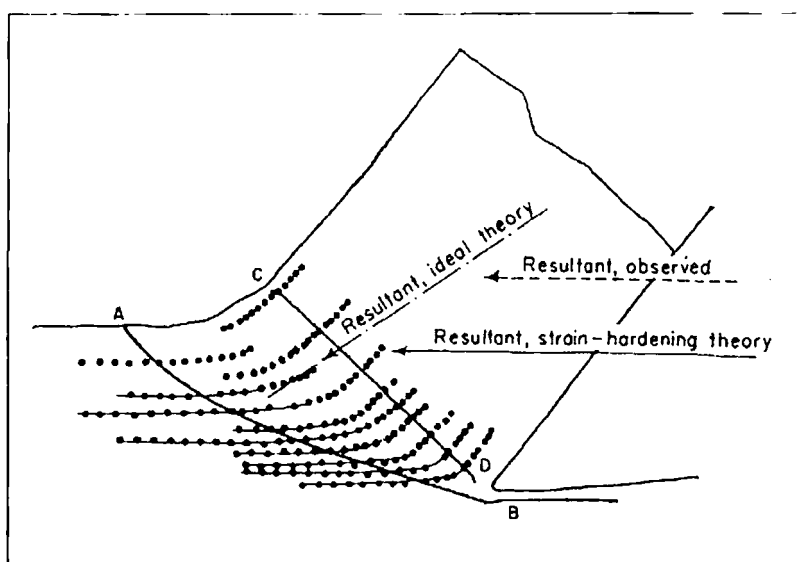


Fig. 2.7. Líneas de flujo plástico y fuerza resultante para distintas teorías y observada experimentalmente. [Oxley (1961)]

Enahoro y Welsh (1965) a través de esta teoría de la zona de corte relacionaron el cociente m/k con la maquinabilidad del material, donde m representa la pendiente de la curva tensión deformación a una tasa de deformación promedio, mientras que k es la tensión de fluencia en la línea AB. Para valores pequeños del cociente, se produce la formación de viruta fina, y por el contrario, grandes tensiones de compresión en la punta de la herramienta, sugieren una alta probabilidad de fractura de la viruta. La viruta fina puede relacionarse con tensiones de corte bajas lo que permitirá mayor duración de la herramienta y menor fisuración en la zona de la punta de la herramienta produciendo superficies mejor terminadas. Para valores grandes del cociente se produce el efecto contrario es decir viruta gruesa y discontinua y mala calidad superficial.

Bitans y Brown (1965) realizaron un estudio de la deformación en el corte ortogonal en piezas de cera para poder realizar cortes profundos y visualizar la región de deformación plástica, corroborando una correspondencia entre las fuerzas calculadas por el modelo de Oxley y las medidas experimentalmente.

La supremacía del modelo de Oxley frente a los de Merchant y Lee y Schaffer se visualiza en un trabajo experimental de Armarego (1966) que muestra el ajuste de resultados experimentales con los distintos modelos.

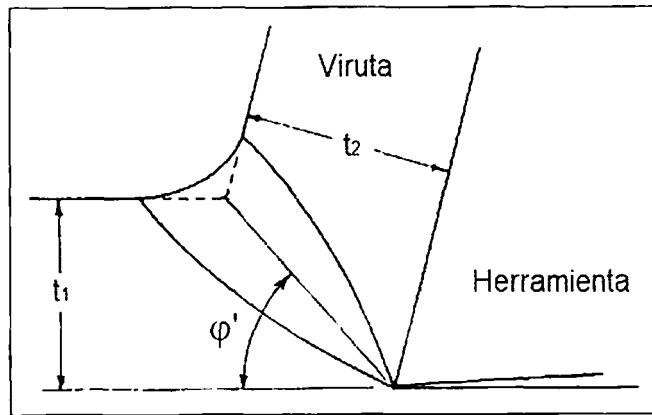


Fig. 2.8. Ángulo de corte equivalente. [Bitans y Brown (1965)]

Roth (1977) analiza el efecto de tasas positivas y negativas del endurecimiento por deformación (tensiones hidrostáticas en el filo de tensión y de compresión respectivamente), generada por distribuciones de tensiones para corte a baja velocidad. Dado que Oxley y Enahoro han relacionado tensiones tensiles en zonas cercanas al filo con la discontinuidad de la viruta, de esta manera podría esperarse que un incremento en el endurecimiento por deformación pudiera incrementar la tendencia a la formación de viruta discontinua. Respecto de la deformación plástica, Astakhov (2003) concluye que cuanto menor sea, mejor será el proceso de corte.

Oxley (1988) ha aplicado los modelos propuestos a la optimización de procesos de maquinado, presentando el cálculo con el cual pueden hacerse predicciones de factores de maquinabilidad tales como fuerzas de corte, tasas de desgaste de la herramienta, rango del filo recreado, y las combinaciones de velocidades de corte y alimentación, las cuales causan deformación plástica o fractura del filo. Este trabajo se desarrolló para el caso de corte ortogonal y se extendió para el corte oblicuo. Adibi-Sedeh y colaboradores (2003) propusieron una extensión del modelo de Oxley realizado en aceros, a otros materiales tales como aleaciones de aluminio y cobre, también con resultados exitosos.

2.2.1.3 Extensión de los modelos para el corte oblicuo

Si bien el corte ortogonal es más sencillo de modelar, el corte oblicuo representa al mayor número de casos de maquinado, y ha sido estudiado por muchos autores.

El estudio del corte oblicuo es de gran complejidad y no puede reducirse al problema bidimensional, debiéndose estudiarse en tres dimensiones. Entre los primeros trabajos importantes de corte oblicuo se puede citar a Merchant (1944), Stabler (1951) y Shaw, Cook y Smith (1952). El último trabajo citado hace una recopilación de los anteriores y propone la aplicación a tres casos concretos, torno, fresado y taladrado, en una visión muy acotada y reducida de esos ejemplos.

Tanto Oxley (1988) como Lin (1978) han estudiado el corte oblicuo a partir de métodos aproximados basados en modelo ortogonal. De esta manera, se asume que el flujo en el plano normal al filo de corte podría ser tratado como deformación plana por medio de la teoría de maquinado ortogonal, siendo usada para predecir la geometría de la viruta y las fuerzas asociadas referidas a este plano. Para relacionar esos valores aproximados a los tridimensionales, se asumió que la fuerza resultante friccional en la cara de la herramienta actuaba en la dirección del flujo de la viruta, y que la fuerza resultante de corte en la zona de formación de viruta actuaba en la dirección de la velocidad de corte resultante. De esa manera se obtuvieron ecuaciones para el ángulo de flujo de la viruta y para las tres componentes de la fuerza de corte. Se observó una buena correspondencia entre los resultados obtenidos por este método y los resultados experimentales. Resultados más sencillos fueron planteados por Armarego y Brown utilizando una aproximación semi-empírica y la regla empírica para el flujo de la viruta, dada por Stabler. Para modelos más complejos de corte oblicuo se puede citar a Venuvinod y Jin (1996) que analizaron el corte de un filo oblicuo simple con un modelo tridimensional de fuerza de corte, y luego Venuvinod (1996) repitió lo mismo para dos filos oblicuos.

2.2.2 Zona de deformación secundaria. Fricción en el corte.

La fricción en la cara de la herramienta afecta a la geometría del proceso de corte. Analizando como se manifiesta entre dos superficies, se ha determinado experimentalmente hace siglos que depende de un coeficiente y de la fuerza normal a las superficies, siendo independiente del área de las superficies y de la velocidad de deslizamiento.

Esto se puede explicar si se observa microscópicamente la topología de las superficies, que aunque aparenten regularidad están formadas por picos y valles. El contacto será entre las irregularidades de mayor altura de ambas superficies, que en el caso de aplicar fuerzas normales al plano aumentarán el área real de contacto entre ambas dificultando el deslizamiento.

El coeficiente de fricción puede escribirse como:

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} = \frac{\tau_f}{\sigma_y} \tag{2.21}$$

Dadas las elevadas temperaturas y tensiones involucradas entre viruta y herramienta, durante el corte de metales el coeficiente medio de fricción entre viruta y herramienta en general no se mantiene constante, y depende de factores como el ángulo de corte, la velocidad de corte, etc. Bajo esas condiciones el área real de contacto tiende al área aparente, y la fuerza de fricción ya deja de depender de la normal. Entonces el cizallamiento deja de ocurrir en las superficies y lo hace en el interior del material más blando. Este fenómeno se denomina fricción adhesiva o pegajosa. En la zona de contacto viruta-herramienta cercana al filo, las tensiones normales son muy altas produciéndose la adhesión. La distancia desde el filo en la cual se observa este fenómeno se denomina l_{st} . Más allá de esta distancia la fricción será por deslizamiento. La fricción adhesiva produce una mayor resistencia al paso de la viruta y por lo tanto un aumento de la fuerza necesaria para realizar el corte. En algunos casos el material adherido se va acumulando hasta formar un filo “recrecido” o falso filo (ver Fig. 2.10), el cual depende de la velocidad de corte siendo más pronunciado el efecto a bajas velocidades.

En la superficie de contacto entre la herramienta y el material se produce un importante gradiente de velocidades desde supuestamente cero hasta la velocidad de salida de la viruta (típicamente metros/min).

A través del modelo de distribución de tensiones sobre la cara de la herramienta presentado por Zorev (1966) llega a que el ángulo medio de fricción depende principalmente de la tensión normal media en la cara de la herramienta. Esto permite explicar los efectos del cambio del ángulo de inclinación α sobre el ángulo de fricción τ .

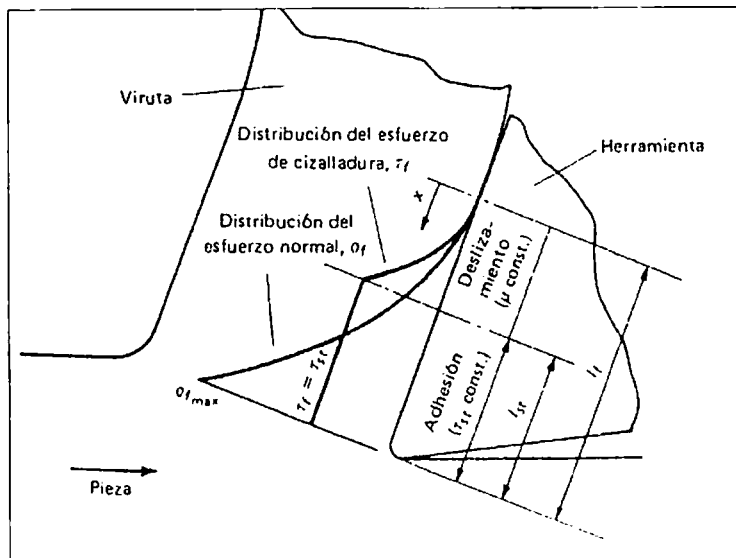


Fig. 2.9. Zonas de fricción en el corte. [Boothroyd (1989)]

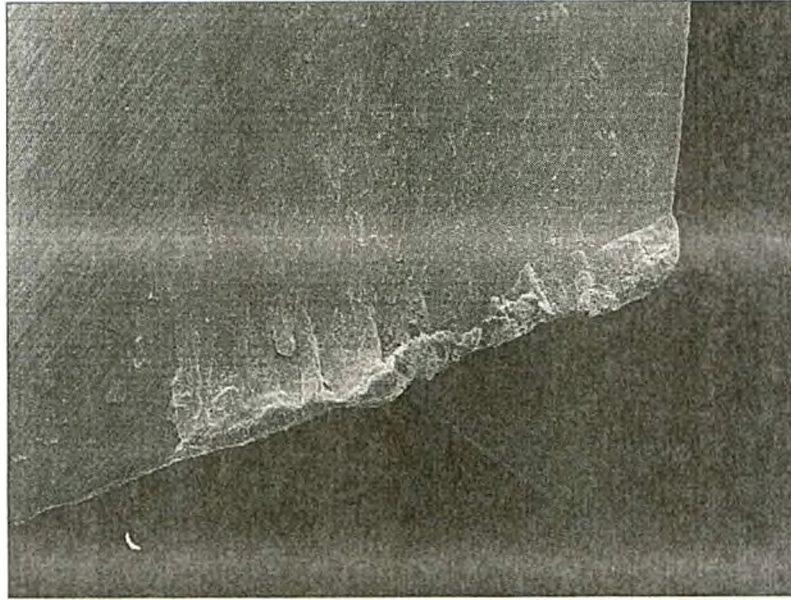


Fig. 2.10. Filo recrecido.

2.2.3 Tipos de viruta

El tipo de viruta depende del material mecanizado y de las condiciones de corte. En 1938 Ernst definió tres tipos básicos de viruta, denominando a la viruta discontinua como “tipo 1”, a la continua como “tipo 2” y a la continua con recrecimiento de filo como “tipo 3”. (Ver Fig. 2.11) En la mayoría de los trabajos de herramientas de corte se estudia la viruta tipo 2.

Para la optimización de los procesos de maquinado la determinación del tipo de viruta es muy importante. A continuación se caracterizarán las posibles morfologías. [Enahoro y Welsh (1965)]

Viruta discontinua (Tipo 1)

En el proceso de corte el material es sometido a grandes deformaciones en la zona primaria, en donde se inicia la formación de la viruta. Si el material es frágil, en esta región se producirá la rotura de pequeños fragmentos o segmentos que dependerá del tipo de material, y de la velocidad de corte. A bajas velocidades de corte aun para materiales dúctiles la viruta puede ser discontinua. La rotura intermitente se produce como un proceso estocástico que influye en la terminación de la superficie cortada que tendrá un aspecto irregular.

Viruta continua (Tipo 2)

El metal se deforma plásticamente para dar una viruta en forma de cinta continua. Esta viruta se obtiene en el corte de materiales dúctiles en condiciones favorables de corte y con lubricación. En estos casos la terminación de la superficie es suave. Ernst concluyó que este tipo de viruta era producida por corte a través de una zona delgada la cual puede ser aproximada a un plano simple expendiéndose desde el filo de la herramienta hasta la superficie del material como se vio en secciones anteriores.

Viruta continua con filo recrecido (Tipo 3)

Como se vio anteriormente bajo ciertas condiciones se produce la adhesión de material muy deformado a la herramienta, produciéndose el filo recrecido. Entonces durante el corte de viruta continua el filo recrecido cambiara la morfología del filo produciendo viruta irregular pero continua. También el material del recrecido se suele separar y formar parte de la viruta o de la superficie mecanizada, perjudicando la calidad de la terminación de la misma.

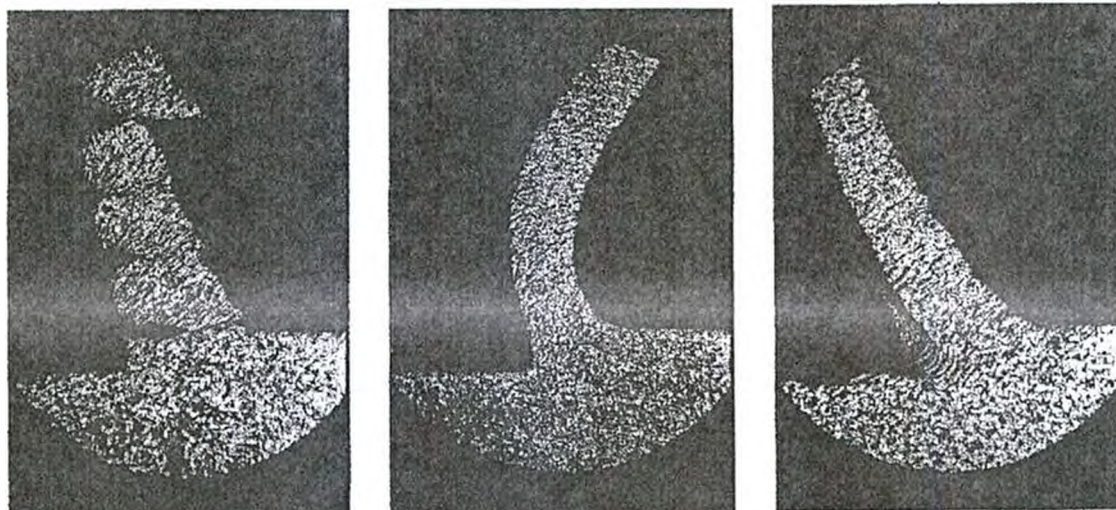


Fig. 2.11. Ejemplos de tipos de viruta producida en corte ortogonal. a. viruta fragmentada. b. viruta continua. c. viruta continua con filo recrecido. [Merchant (1945)]

Más allá de las morfologías indicadas existen otras clasificaciones más modernas ya que dentro de cada grupo mencionado existen distintos tipos propias. Por ejemplo Cook y otros (1954) han clasificado la viruta discontinua en dos tipos: aquellas que solo muestran la discontinuidad en el microscopio y aquellas visiblemente discontinuas, donde el material forma segmentos separados.

2.2.4 Energía del corte

La energía por unidad de tiempo consumida durante el corte está determinada por el producto de la velocidad de corte por la fuerza de corte:

$$P = F_c \cdot v_c \quad (2.22)$$

Tanto el consumo de energía como la cantidad de metal removido por unidad de tiempo son proporcionales con la velocidad de corte.

La *energía específica de corte* es la energía consumida por unidad de volumen:

$$P = \frac{P_m}{V} = \frac{F_c}{A_c} \quad (2.23)$$

Donde F_c es la fuerza de corte y A_c es el área de la sección de la viruta sin cortar.

Tanto la velocidad de corte como el avance, el ángulo de ataque y otros parámetros pueden afectar a la energía específica de corte, que a velocidades de corte y avance altas tiende a un valor constante (por ejemplo en acero suave del orden de los GN/m²) [Boothroyd (1989)]. En Astakhov (2006) se muestra la significativa divergencia entre el valor teórico y el experimental.

2.2.5 Fuerza de penetración y efecto de tamaño

La fuerza de penetración es una fuerza que actúa sobre el filo y la zona de contacto entre el flanco y la superficie generada. Esta fuerza no contribuye a la remoción de viruta.

Una visión realista del filo lo representa por una superficie cilíndrica que une el flanco con la cara de la herramienta.

Mientras la herramienta avanza en el material la fuerza sobre el filo dependerá del espesor de la capa de viruta a remover, siendo proporcionalmente más significativa (en relación a la fuerza de corte) cuanto mayor sea el espesor mencionado. Según Boothroyd (1989) para cada caso en particular la fuerza de penetración se puede suponer constante, y su contribución a la fuerza total de corte aumentará a medida que el espesor de la viruta disminuya. Esto causa el denominado efecto de tamaño que es el aumento de la energía específica de corte al disminuir el espesor de la viruta no deformada. Remover virutas muy delgadas requiere mucha potencia. Hay en la

literatura otros autores que proponen otras explicaciones al efecto de tamaño, por ejemplo en Shaw (2003).

2.3. Duración y desgaste de las herramientas de corte

La vida de la herramienta es el período económico de utilización de la misma, y no tiene una equivalencia directa con el desgaste, aunque ambas están estrechamente relacionadas entre sí [Subramanian y Cook (1977)]. En realidad, la medida del desgaste es la que determina si una herramienta ha llegado al final de su etapa útil. En la industria, la vida de una herramienta tiene una gran dispersión de valores, lo que hace que la estimación del momento de reemplazo sea muy difícil de calcular, por medio de criterios conservativos que hacen que el cambio sea prematuro respecto de los valores de mayor duración de la misma herramienta.

La herramienta de corte puede llegar al fin de su vida útil por dos causas principales: desgaste progresivo de la herramienta y fallas mecánicas.

A su vez el desgaste progresivo puede clasificarse en cuatro categorías:

- Desgaste adhesivo asociado con la deformación del plano de corte.
- Desgaste abrasivo resultante de la acción de corte de partículas duras.
- Desgaste por difusión ocurriendo a altas temperaturas.
- Desgaste fractura por fatiga que produce rotura del filo.

El desgaste por adhesión está relacionado con la fricción adhesiva, en la cual al separarse la soldadura que se forma entre el filo y la viruta del material cortado, a veces suele llevarse fragmentos del material de la herramienta, pasando a la viruta.

En el caso de la abrasión, partículas endurecidas localizadas en la viruta pasan sobre la cara de la herramienta dañándola arrancándole fragmentos mecánicamente, p.ej. filo recrecido arrancado en la viruta.

El desgaste por difusión está relacionado con el aumento de la temperatura durante el maquinado que al llegar a valores altos favorece la difusión de átomos de la red cristalina del material de la herramienta hacia el material maquinado. Este proceso aumenta exponencialmente con la temperatura, debilitando la estructura superficial de la herramienta. El desgaste tipo fractura tal como la rotura de pequeños pedazos del filo de la herramienta causado por la fatiga es producido cuando actúa una carga cíclica a la que está sometida durante el trabajo de corte. Las bases de este último fenómeno fue analizado por Challen y Oxley (1986) para fatiga de bajo número de ciclos.

2.3.1 Duración de la herramienta

Se define como el tiempo de corte requerido para alcanzar la duración de la herramienta. La velocidad de corte es el factor que más afecta el tiempo de vida de la herramienta. Hace cien años Taylor planteó una relación cuantitativa entre la duración y la velocidad de corte que hasta la actualidad sigue siendo vigente (Ec. 2.24).

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{t_r}{t} \right)^n \quad (2.24)$$

Donde v es la velocidad de corte, t es la duración de la herramienta, v_r y t_r son la velocidad de referencia para la cual se conoce la duración de la herramienta.

2.3.2 Efecto del ángulo de corte de la herramienta

El ángulo de corte está relacionado con la fuerza de corte, la energía de corte y la temperatura alcanzada durante el mismo. Si estas son grandes, el desgaste de la herramienta será mayor. A mayor ángulo de corte mejoran esas condiciones, pero comienza a afectar otro factor que es la

resistencia mecánica de la herramienta, debilitándose. Dado que al aumentar el ángulo un efecto crece y el otro disminuye, habrá un punto óptimo de inclinación que mejora la duración de la herramienta.

2.3.3 Materiales de las herramientas

Otro aporte de Taylor fue la utilización del denominado acero rápido para alargar la duración de las herramientas de corte que tuvo amplio éxito en el corte de metales, ya que el aumento de la resistencia al desgaste produjo un aumento en la cantidad de material cortado por unidad de tiempo. Luego con el paso del tiempo y por requerimientos industriales fueron apareciendo nuevos materiales para herramientas como: metal duro (carburos), Cermets, Cerámicos, diamante policristalino, etc. La selección de estos dependerá del material a maquinar y de las condiciones de corte, teniendo algunos mayor resistencia a las altas temperaturas, otros mayor tenacidad y dureza, etc. lo que determinará valores límites de las velocidades a las que podrán ser utilizados tales materiales.

2.3.4 Materiales a maquinar- Maquinabilidad

Cuando se desea cortar un material se podría pretender tener información del mismo que permitiera decidir que tipo de herramienta utilizar, y qué parámetros de corte. Para esto se define el término “maquinabilidad”. Esta definición no es trivial ya que el criterio dependerá de la finalidad del mecanizado en consideración:

- 1- Menor desgaste de la herramienta.
- 2- Mejor acabado superficial.
- 3- Utilización de menor potencia.

En operaciones de acabado serán importantes 1 y 2, mientras que en desbaste 1 y 3, por eso el criterio no es del todo objetivo.

Respecto del desgaste de la herramienta y su relación con la maquinabilidad existen distintos métodos de ensayo, algunos de estos recomendados por los entes de normalización internacionales como ISO, habiendo métodos más realistas que otros respecto de la condición de corte a la cual será utilizada. Los métodos pueden ser el de un abrupto desgaste acelerado, producido por refrentado en torno, o también pueden hacerse pequeñas cantidades de desgaste durante el corte en periodos cortos y estudiarse la evolución del flanco de la herramienta. Otra forma es esmerilando una zona del flanco de manera artificial y midiendo las variaciones en la magnitud de esa zona de desgaste en una pequeña mecanización.

También las medidas de la fricción entre la herramienta y la viruta, o de las temperaturas de corte, pueden servir como indicativo del desgaste de la herramienta. En el próximo capítulo serán detallados distintos métodos indirectos alternativos que permiten la medición del desgaste de las herramientas de corte.

La maquinabilidad depende fuertemente de las variables características del maquinado, tales como velocidad de corte ángulo de corte, profundidad de corte, velocidad de avance, etc.

Por lo tanto la maquinabilidad depende de la interacción entre las características del material, de la máquina y de la herramienta, así como del lubricante utilizado. [Anteri (2002)]

Respecto de los factores que afectan directamente la maquinabilidad de los metales no es simple abordar esta clasificación. Así como una dureza elevada implica baja maquinabilidad por la alta abrasión y la alta potencia involucrada, lo mismo ocurre con materiales con alta ductilidad que causan una zona de fricción adhesiva o alta pureza, por tal motivo

Sin embargo se conocen ciertos aditivos que agregados a una matriz de dureza y ductilidad intermedia incrementan la maquinabilidad del material base. Estos son por ejemplo: S, Pb, Te, Bi, Se. En general estos materiales forman una segunda fase globular o van al borde de grano, y cumplen una múltiple función que es por un lado actuar como concentradores de tensiones y por otro proveer internamente una función de lubricante incorporado, entre otras funciones aun no

totalmente determinadas. Hay en la bibliografía estudios de la maquinabilidad para distintos materiales, por ejemplo Cakir y otros (2008).

2.3.5 Fluidos de corte

Se utilizan para mejorar las condiciones del corte. En general se presentan en estado líquido, cumpliendo dos funciones muy importantes que son refrigerar y lubricar la zona del corte, actuando sobre la herramienta y el material maquinado. Las características solicitadas al fluido a utilizar estarán determinadas por el proceso de corte, la herramienta y el material. En algunos casos la función refrigerante es la más importante y en otros la lubricante o ambas. En general son aceites minerales que pueden ser solubles en agua siendo buenos refrigerantes o no solubles puros o con aditivos que son buenos como lubricantes.

La acción de los refrigerantes proporciona una reducción de la temperatura del filo y de la dilatación térmica en la pieza maquinada, y una manipulación más sencilla de la pieza maquinada. El desgaste de la herramienta depende sensiblemente de los cambios de temperatura en las superficies de desgaste beneficiados por el refrigerante.

Respecto de los lubricantes, la finalidad de estos es reducir la fricción en la cara de la herramienta, con el fin de bajar la potencia involucrada en el corte y por ende la temperatura, para incrementar la vida de la herramienta y mejorar el acabado superficial de la pieza, relacionado con el filo recrecido, el cual está relacionado a la vez con la fricción cara-viruta.

La acción lubricante de los fluidos de corte suele ser de tipo químico mediante la formación de una película en la interfase herramienta-viruta, que en seco sería una gran zona de deformación secundaria muchas veces con filo recrecido estable. Requisitos de los lubricantes químicos son el tamaño de las moléculas que lo constituyen, la reactividad apropiada y la baja estabilidad que le permite descomponerse durante el corte. Al aumentar la velocidad de corte la eficiencia de los lubricantes decae.

2.4 Proceso de Taladrado

Si bien el taladrado es muy antiguo, la idea de mechas helicoidales de dos filos se remonta a mediados del siglo XIX, tomando un gran impulso con la invención de Taylor del acero rápido a principios de siglo XX. En los últimos 150 años se ha estudiado el proceso de corte de las mechas, el cual involucra una dificultad sustancial debido a su geometría. Entre los primeros trabajos que fundaron las bases del estudio del taladrado se pueden citar los de Norris, Bird y Fairfield, Boston, Gilbert y Oxford Sr., Opitz y Jansen, que representan una etapa de planteo de los primeros problemas para el cálculo de la mecánica de ese proceso, que permitió la optimización de las herramientas de corte. A mediados del siglo XX luego de los trabajos sobre la mecánica del corte de metales que presentaron Ernst, Merchant, Piispanen, Shaw y otros, como se ha visto anteriormente, se propagaron los modelos de corte ortogonal y oblicuo al corte en taladrado que combina ambos.

2.4.1 Descripción de una mecha helicoidal convencional. Nomenclatura

En la literatura se denomina mecha helicoidal convencional a aquella herramienta cilíndrica metálica en la que en uno de sus extremos posee dos filos principales de corte o “labios” de la mecha, y un tercer filo central de menor tamaño denominado cincel (“chisel” en inglés). Además la mecha consta de dos canales simétricos desde los filos hasta la zona de sujeción denominados estrías o flautas (“flute” en inglés) cuyo objetivo es la salida de la viruta. En la Fig. 2.12 se observa un esquema de la mecha.

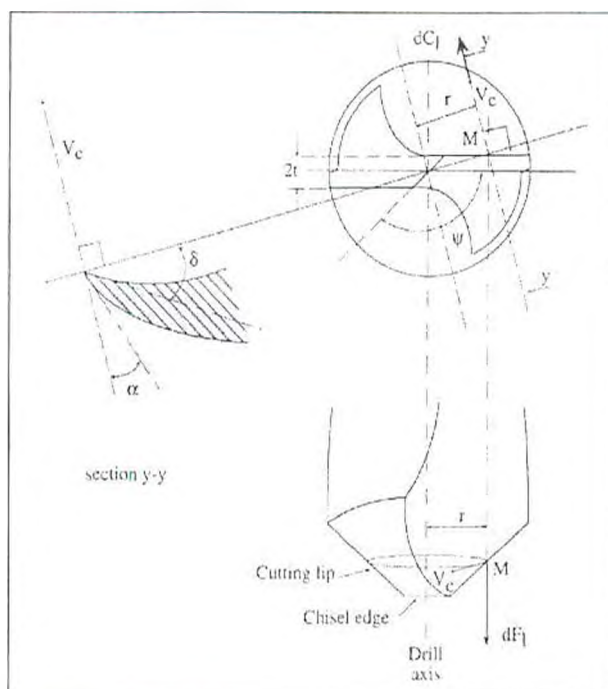


Fig. 2.12. Esquema de la punta de la mecha. [Elhachimi y otros (1999)]

Al igual que en el caso de la herramienta simple utilizada en el corte ortogonal, aquí se definen de manera similar los ángulos de ataque (γ), de incidencia (α), de corte (ϕ), con sus variantes dadas por los sistemas de referencia utilizados. Pero dada la complejidad geométrica de la mecha y del proceso de taladrado estos ángulos se redefinen convenientemente a distintas variedades dadas por el sistema de referencia sobre el cual se toman. Además aparecen otros ángulos nuevos, determinados por la geometría de la mecha tales como el ángulo de las estrías, el ángulo del cincel, y otros.

Para la descripción de las distintas etapas de un proceso de maquinado se debe describir la geometría y nomenclatura de las herramientas de corte. Esta es una tarea complicada para el corte ortogonal, y más aún para el oblicuo que es el más general de todos los casos. En la descripción del corte oblicuo, aparecen dos ángulos respecto del corte ortogonal, uno denominado “de inclinación del filo” y el otro “ángulo de flujo de la viruta”. Cuando la viruta no cambia su ancho durante su formación, ambos ángulos se igualan (ley de Stabler). Luego, los sistemas de nomenclatura deberán incluir una definición del ángulo de inclinación del filo, y además considerar el afilado de la herramienta en el sentido de describir ángulos que puedan ser medidos y utilizados en la elaboración de las teorías, y por otro logrados con el dispositivo de afilado (medidos con facilidad y precisión en la operación de afilado). [Boothroyd (1985)]

Distintos sistemas de nomenclatura han sido utilizados a lo largo del tiempo. Desde los comienzos con el sistema británico de máxima inclinación (finales del siglo XIX), el sistema de la asociación americana de normas (ASA) y el sistema alemán (DIN) hasta llegar a la más actualizada norma ISO.

La norma internacional ISO/DIS 3002 especifica la nomenclatura para las herramientas de corte. Esta instituye que es necesario establecer un sistema de referencia de planos tal que los ángulos de la herramienta de corte puedan ser definidos. Esta norma propone dos sistemas de ángulos planos: uno denominado “herramienta en la mano” y otro llamado “herramienta en uso”. El primero, que se define en relación con la base de la herramienta, es concerniente al afilado de la herramienta. Mientras que el segundo, definido en relación con la dirección de corte resultante y la dirección del movimiento de avance, se utiliza en la operación de maquinado. La descripción tanto de los sistemas de planos como de los ángulos con los que se define el corte para este sistema está muy bien desarrollada por Boothroyd (1985). Existe también un trabajo de Watson y Williams (1977) en el cual se especifica la geometría de corte tanto para herramientas de punta

simple como para mechas helicoidales utilizando el sistema ISO. En ambas referencias se muestra la forma de pasar de un sistema al otro. Cuando se definen los ángulos del sistema “en mano” éstos terminan con la palabra “herramienta”, mientras que para el sistema “en uso” los ángulos utilizan a la palabra "efectivo". En la Tabla I se muestra la nomenclatura para los ángulos según el sistema ISO.

Tabla II.I- Nomenclatura y definiciones de los ángulos del corte según el sistema ISO

Ángulo		definido entre	y	Medida en el plano
Inclinación normal de la herramienta	γ_n	A_γ	P_r	P_n
Inclinación normal efectiva	γ_{ne}	A_γ	P_{re}	$P_n=P_{nc}$
Ángulo normal de la herramienta	α_n	A_α	P_s	P_n
Ángulo normal efectivo	α_{ne}	A_α	P_{se}	$P_n=P_{nc}$
Ángulo del filo principal de la herramienta	κ_r	P_s	P_f	P_r
Ángulo efectivo del filo principal	κ_{re}	P_{se}	P_{fe}	P_{re}
Ángulo de inclinación del filo de la herramienta	λ_s	S	P_r	P_s
Ángulo efectivo de inclinación del filo de la herramienta	λ_{se}	S	P_{re}	P_{se}
Ángulo de la punta de la herramienta	ϵ_r	P_s	P'_s	P_r
Ángulo normal del filo	$\beta_n = \beta_{nc}$	A_γ	A_α	$P_n=P_{nc}$

Tabla II.II. Otros ángulos definidos para el taladrado

Ángulo de la hélice	δ
Ángulo de la punta	$2p$
Distancia entre filos	$2t$
Inclinación del cincel	ψ

La variedad de ángulos involucrados en el corte con la mecha fueron descriptos por Oxford (1951) y por muchos autores siguientes, con distintos sistemas de referencia y nomenclaturas

2.4.2 Mecánica del Proceso de Taladrado

En 1936 Boston y Gilbert propusieron un modelo empírico para calcular torque y avance para el taladrado de diferentes materiales siendo por ejemplo para el acero la relación

$$T = CS^{0.78} D^{1.8}$$

(2.25)

$$P = KS^{0.78} D$$

(2.26)

Donde T es el torque, P es la fuerza de avance, S es la alimentación, D es el diámetro, y C y K son constantes.

Contemporáneo al trabajo mencionado, se producía la evolución de los modelos básicos de corte ortogonal [Piispanen (1937)], que luego se propagaron al corte oblicuo [Merchant, Shaw y otros (1952)], con el cual se comenzó a estudiar la mecánica del taladrado. Oxford Jr. (1953) analizó la formación de viruta usando técnicas de frenado rápido, relacionando el ángulo de flujo de la viruta con el ángulo de ataque efectivo de los filos de la mecha, y con el diseño general de la herramienta. Ese trabajo se destaca por el análisis de la formación de viruta por los filos de corte, el estudio del ángulo efectivo de ataque, y por la descripción de la región del material afectada

por la acción del cincel. Posteriormente Shaw y Oxford (1957) analizaron el torque y la fuerza de avance en taladrado.

Bhattacharyya y colaboradores [Pal et al. (1965)] proponen el desarrollo de un método teórico para calcular el torque en el taladrado de materiales dúctiles, a partir del material, su geometría y las condiciones de corte. Para evitar la complicación que se presenta en el estudio del corte del cincel (“chisel”) los autores realizaron sus modelos y experimentos taladrando con un agujero guía de mayor diámetro que el cincel. Pal y Bhattacharyya realizaron una analogía entre los filos de la mecha y el filo de un inserto para el torneado. Varios años antes Finkelburg (1949) ya había realizado una representación similar. Venkataraman (1968) toma esa idea y busca una correspondencia entre una mecha y una herramienta para torneado, comparando también las virutas obtenidas para ambos casos. Utilizando la mencionada analogía, simulándola a partir de la herramienta para torneado se pueden buscar condiciones de corte óptimas para el caso del taladrado.

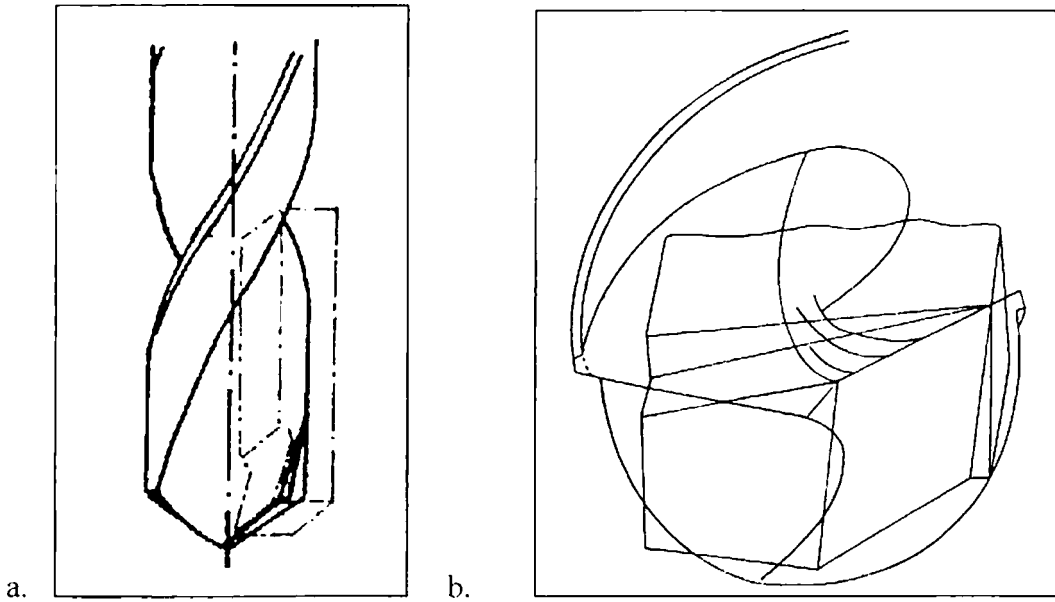


Fig. 2.14. Mecha superpuesta a un inserto típico para torneado. a. Modelo de Finkelburg (1949). b. Modelo de Pal (1965).

Básicamente la mecha consiste de dos filos de corte y el cincel. Los filos de corte cortan el material, produciendo un gran torque y también una fuerza contra el avance relacionada con el ángulo de la punta (de alrededor del 50% según Oxford (1953)). El cincel extrude el material de la pieza por lo que su efecto es principalmente sobre el avance y no sobre el torque, siendo responsable del otro 50% de la oposición al avance. Dada la complejidad del análisis de la parte del cincel el trabajo de Pal se restringe al caso de taladrado con agujero guía de diámetro mayor que el cincel. Para el cálculo del torque se analiza la cupla de rotación dada por la fuerza de corte (en el eje z).

Utilizando la Ec. (2.15) para la fuerza de corte, pasada al caso del corte oblicuo, se llega a que esta es función del ancho del corte (relacionado con el tamaño del filo), de la velocidad de avance, de la tensión de corte, del ángulo de ataque efectivo y del coeficiente de espesor de la viruta. Pudiéndose expresarse como:

$$F_c = w.H.\tau_s.[A - B\gamma_e + \zeta] = \frac{DS}{4}\tau_s.[A - B\gamma_e + \zeta] \quad (2.27)$$

Donde D es el diámetro de la mecha y S la velocidad de avance y ζ es el coeficiente de reducción de la viruta. Para los cálculos siguientes Pal (1965) asume $A=1.25$, $B=0.22$.

Adoptando la relación entre tensión y deformación de Abuladze:

$$\tau_s = 0.74\sigma_u 6^{0.6\Delta} \quad (2.28)$$

donde σ_u es la máxima tensión aplicable y Δ es el porcentaje de elongación.

Por otro lado el coeficiente de reducción de la viruta se puede escribir como:

$$\zeta = \frac{14}{r_m^{0.7} S^{0.112}} \quad (2.29)$$

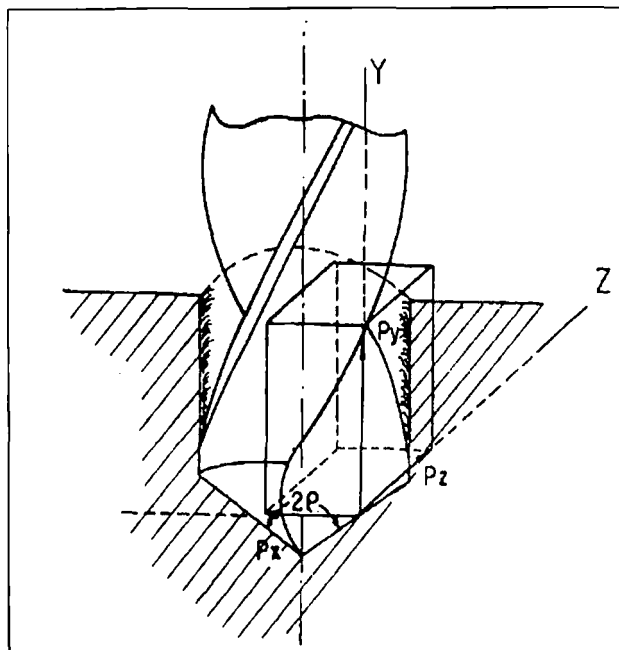


Fig. 2.15. Componentes de fuerzas en el filo de la mecha. [Pal (1965)]

El torque producido por el corte es:

$$T_c = P_z \cdot \text{momento} \quad (2.30)$$

Mientras que el producido por las fuerzas friccionales:

$$T_f = F \cdot l \cdot \text{momento} \quad (2.31)$$

Siendo entonces el torque total:

$$T = T_c + T_f \quad (2.32)$$

Entonces se llega a que el torque para el modelo de Pal es:

$$T = (r_2^2 - r_1^2) \left\{ 0.74 \sigma_u 6^{0.64} S \left(0.585 + \frac{7}{r_m^{0.7} S^{0.112}} \right) + \frac{F}{\sin \rho} \right\} - 0.0109 \sigma_u \times 6^{0.64} S (r_2^3 - r_1^3) \quad (2.33)$$

Donde r_1 es el radio del agujero guía y r_2 el radio externo de la mecha

Los resultados experimentales de Pal mostraron una buena concordancia con el cálculo teórico excepto cuando el agujero piloto disminuía su diámetro hasta incluir la acción del cincel. Este resultado era esperado ya que el proceso del cincel es extrusivo, y no contribuye al torque.

Armarego y Cheng (1972a, 1972b) estudian el taladrado con dos tipos de mechas, unas convencionales y las otras con la cara de ataque plana, basándose en un modelo de zona de corte delgada. Lo interesante de este trabajo es que confirma la tendencia mostrada por Pal que el torque aumenta con la fuerza de avance aplicada a la mecha, siendo en este trabajo representada por una relación lineal, verificada para las mechas convencionales y las modificadas. En este modelo no se tiene en cuenta la acción del cincel

Subramanian (1977) plantea que la geometría de la mecha tiene efectos muy complicados sobre las fuerzas actuantes. El ángulo de ataque y la velocidad de corte varían ambos en función del radio de la mecha. La componente normal del ángulo de ataque tiene valores negativos en el

centro de la mecha lo que requiere grandes fuerzas de avance, cambiando de negativo a positivo a lo largo del filo, lo que afecta principalmente al torque.

Watson (1985a, 1985b, 1985c, 1985d) desarrolló en cuatro artículos un modelo de taladrado para el filo de corte y para el filo del cincel, el cual luego se compara con resultados experimentales. Estos trabajos han tenido un buen impacto en la literatura posterior, siendo una de las ideas centrales el dividir el filo en elementos constitutivos, en ingles llamados “Elementary Cutting Tool” (ECT), los cuales sumados dan el efecto total de la acción del filo. Para la parte del filo de corte Watson expone las mejoras de su modelo frente al de Bhattacharyya (1963), aunque no puede comparar resultados ya que trabajan con materiales diferentes. La incorporación de la tasa de deformación y la temperatura en el modelo son algunas de estas. Por otra parte ambos trabajos incluyen las fuerzas friccionales en el torque.

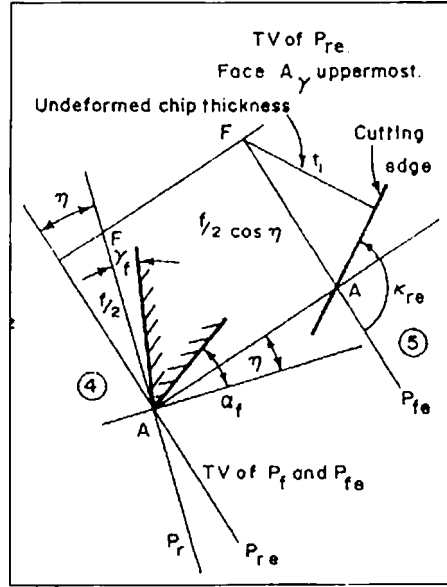


Fig. 2.16. Esquema del filo de la mecha. [Watson (1985)]

Siendo la contribución al torque δTQ de cada elemento de corte representado por:

$$\delta TQ = \frac{\rho D}{2} \left\{ (F'_c \cos \lambda_w + F_f \sin \lambda_w) \cos \eta - ((F'_c \sin \lambda_w + F_f \cos \lambda_w) \cos \kappa_{re} + F'_T \sin \kappa_{re}) \sin \eta \right\} \quad (2.34)$$

El torque total es:

$$TQ = 2 \sum \delta TQ \quad (2.35)$$

Pero ese modelo de Watson tampoco concordaba correctamente con los valores experimentales. Por esa razón en el segundo trabajo se reformula el modelo, sumando el efecto de la integridad de la viruta, lo cual mejora la efectividad del modelo. En este caso la contribución de la fuerza de fricción en la cara de avance y paralela al filo de corte es:

$$F_f = \sin \lambda_n \tan \eta_{cc} \sqrt{F'_c{}^2 + F'_T{}^2} \quad (2.36)$$

η_{cc} es el ángulo de flujo de la viruta y F'_c y F'_T son las fuerzas en el plano normal equivalentes a F_c y F_T .

Con esta corrección se siguió verificando que el torque y la fuerza de avance crecen con la velocidad de avance, mientras que no varían con el aumento de la velocidad de rotación, pero con una mucha mejor correlación entre los datos teóricos y los experimentales.

Luego se consideró el efecto del filo del cincel sumando un modelo para esa región del corte, basado en el corte oblicuo, la extrusión y un proceso similar al desgaste [Challen y Oxley (1979)], y se compararon resultados de este modelo con experimentos de taladrado sin agujero guía, con buenos resultados.

Elhachimi y otros (1999a, 1999b), usando la geometría de una mecha convencional, elaboran un nuevo modelo para predecir la fuerza de avance y el torque en taladrado de alta velocidad, determinando la distribución continua de fuerza y torque en el cincel y en los filos. En este modelo no utilizan resultados experimentales previos. El cálculo se basa en el modelo de la zona de corte de Oxley para corte ortogonal para el cincel y oblicuo para los filos, considerando el filo completo y no elementos del mismo. Las variables son las características geométricas de la mecha, las condiciones de corte y las propiedades del material maquinado.

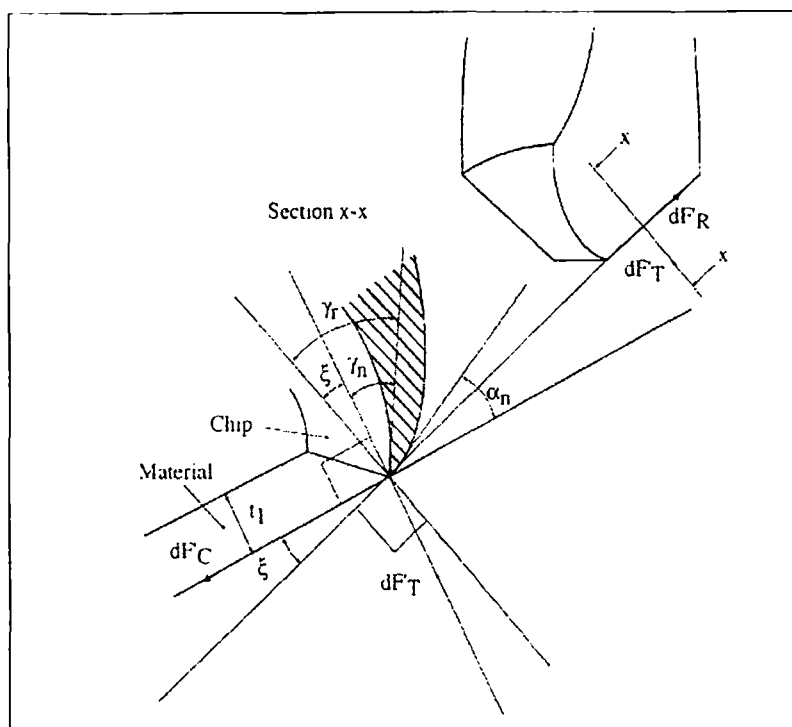


Fig. 2.13. Ángulos de los fillos principales. Modelo de Elhachimi (1999a).

Para el corte de los filos principales los elementos diferenciales de fuerza del modelo de Elhachimi son:

$$dF_s = \frac{k_{AB} t_1 dl}{\sin \phi_s} \quad (2.37)$$

Tanto k_{AB} como ϕ_n son calculados por el modelo de Oxley (1988).

$$dF_s = k_{AB} \frac{f \cos \xi}{2 \sin \phi_n} \frac{r}{(r^2 - t^2)^{1/2}} dr \quad (2.38)$$

$$\text{Con } \xi = \arctan(\tan \omega \cos p) \quad (2.39)$$

$$\omega: \arcsen(t/r) \tag{2.40}$$

$$dF'_c = dF_s \frac{\cos(\phi_n - \gamma_n)}{\cos \theta_n} \quad (2.41)$$

La definición del ángulo θ_n representa a: $\theta_n = \phi_n - \gamma_n + \lambda_n$ (2.42)

$$dF'_\gamma = dF_s \frac{\sin(\phi_n - \gamma_n)}{\cos \theta_n} \quad (2.43)$$

$$dF'_R = (dF'^2_C + dF'^2_Y)^{1/2} \sin \lambda_n \tan \eta_c \quad (2.44)$$

Luego la fuerza de avance y el torque total son la suma de las respectivas componentes del filo principal y del cincel.

En Elhachimi (1999b) se presentan mediciones experimentales que coinciden con las de Armarego, Watson, Rubenstein y otros autores, en el sentido del comportamiento cualitativo ya que la distinta bibliografía se refiere a diferentes materiales estudiados. Con estos resultados evaluaron las predicciones formuladas por el modelo previamente citado, observando una buena correspondencia entre ambos. De esta manera se corroboró la dependencia entre la fuerza de avance y el torque con la velocidad de avance de la mecha, mientras que ambas son prácticamente insensibles a la variación de la velocidad de rotación.

Zhang y otros (2001) utilizaron el modelo de Elhachimi y otros (1999a) y extendió su uso al caso del taladrado vibratorio de materiales compuestos con buenos resultados.

Yang y otros (2002) proponen un modelo computacional para intentar resolver problemas prácticos como el chatter y la rotura de la herramienta. También separan los mecanismos de corte, uno en los dos filos y otro en el cincel y plantean que el cincel, que extruda la pieza, contribuye a la fuerza de avance más que al torque. Para el caso de los filos, aunque predomina la fuerza que produce el torque, también aparece una contribución al avance. La viruta se forma en los filos y se mueve guiada por el helicoides de la mecha, la cual no contribuye al corte.

Es sabido que las fuerzas en el taladrado aumentan con la profundidad del agujero. Estas fuerzas y en especial el torque deben ser evitados para no romper la mecha. En general este incremento es atribuido a la viruta friccionando en la pared del agujero. Ke y otros (2006) demuestran que existe un mecanismo adicional que es que al aumentar la profundidad del agujero también lo hará la resistencia al flujo de la viruta, que repercute en las fuerzas sobre el filo de la herramienta, y que está relacionado con un engrosamiento de la viruta en la periferia de la mecha (más que en el centro). Esto también aumenta la fuerza de avance. En definitiva el trabajo de Ke concluye que tanto el espesor de la viruta como la fuerza de corte se incrementan cuando hay fuerzas que impiden o dificultan el fluir de la viruta. Luego, en el taladrado profundo, la fricción de la viruta y su ensanchamiento contribuyen al aumento de la fuerza de corte. En el trabajo de Ke se estudia la variación de la sección de corte de la viruta tipo cuerda, y se desarrolla un modelo para predecir el cambio de las fuerzas de corte con el engrosamiento de la viruta. Ese modelo está basado en la idea de Watson (1985a) de los ECT. La correspondencia entre las mediciones experimentales y las predicciones están dentro del orden con un error del 30% para el torque y menor al 10% para la fuerza de avance. Este modelo no tiene en cuenta el cincel, y para eso las mediciones experimentales se realizaron con agujeros guía.

2.4.3 Vibración de la mecha

Los tipos más frecuentes de vibración en una mecha son las vibraciones de baja frecuencia, relacionadas con agujeros lobulares y las vibraciones de alta frecuencia (o “chatter”) [Pirtini y Lazoglu (2005)]. El primero de los casos es uno de los problemas más comunes en el taladrado, esto puede ocurrir aun en ausencia de “chatter” a velocidades de corte muy bajas. Esta vibración de baja frecuencia es muy importante por que afecta directamente a la calidad del agujero [Bayly y otros (2002)]. También el movimiento relativo de la mecha por las vibraciones puede causar variaciones en el torque y el avance, produciendo efectos sobre el proceso de taladrado, por ejemplo un aumento en la vibración durante el ingreso puede causar una localización deficiente de la punta de la mecha, generando por ejemplo una rebaba alrededor del agujero [Rincón y Ulsoy (1994)].

2.4.4 Generación de rebaba

La rebaba (“burr”) es una indeseable proyección del material que resulta del proceso de corte. Por tal motivo es importante evitarla o reducirla durante el maquinado. En una investigación Pande y Relekar (1986) estudian la forma de reducir la formación de la rebaba en el taladrado, buscando como afectan las condiciones del proceso de corte. La fuerza de avance, la dureza del material así como la longitud y el diámetro del agujero tienen efecto sobre la formación de rebaba.

2.4.5 Acción del cincel. Agujero guía.

Dado que el filo del cincel es virtualmente una línea recta perpendicular al eje de la mecha, la mecha convencional no tiene punta consecuentemente la mecha no tiene acción de autocentrado y tiene una tendencia a moverse de un lado a otro. Esto causa que el agujero comience en una posición distinta que la deseada. De esa manera aparecen efectos como la boca de campana que produce un agrandamiento e irregularidad en la boca del agujero taladrado. Esta razón es la base de la utilización del agujero guía, de diámetro mayor al del cincel que permite el centrado de la mecha en la etapa inicial del corte [Haggerty (1961)]. También, puede decirse del cincel, que la acción de corte del mismo es muy pobre por dos razones. Por un lado el cincel tiene un ángulo de ataque negativo muy grande, y por otro la velocidad de corte de la mecha cerca del centro de muy baja. La consecuencia es que el cincel forma muy poca viruta. Oxford (1955) dividió la acción del cincel en dos zonas, una central de velocidad despreciable, y otra en los bordes del mismo. En la primera, la acción más importante es la compresión del material de la pieza, produciéndose un proceso de extrusión del material en el centro del agujero, denominado también de indentación. La fuerza de avance cuando la mecha va ingresando en el material es muy grande por lo que se genera una gran cantidad de calor. En la segunda zona (o zona secundaria) del cincel se produce un proceso que para la mayoría de los autores es de corte ortogonal en el cual se genera una delgada viruta. [Watson (1985a, 1985c)] [Elhachimi y otros (1999)] [Yang y otros (2002)]

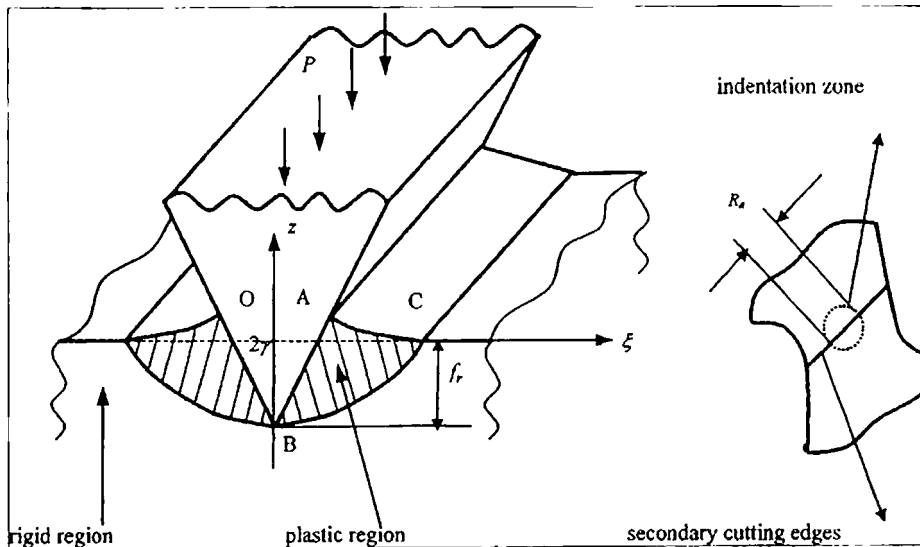


Fig. 2.16. Zona de indentación en el centro del cincel y filos de corte secundarios. [Gong (2005)]

2.4.6 Formación de Viruta en el taladrado

En la literatura, en general el análisis de la formación de viruta está realizado para el torneado, en el cual la viruta una vez cortada sale libremente. Pero en el taladrado el proceso es diferente ya que la salida de la viruta estará condicionada por la relación entre la pared del agujero y la flauta de la mecha, por lo que aparecerán fuerzas que afectaran a su formación. Hay trabajos más

cercanos en el tiempo como los previamente mencionados de Watson (1985b) o Ke y otros (2006) en los que se tiene en cuenta en menor o mayor medida este fenómeno.

La importancia del análisis de la formación de virutas es que si estas tienen gran tamaño son perjudiciales para el proceso de corte, en particular en el caso del taladrado, ya que la viruta se puede enroscar en las sucesivas vueltas a la herramienta produciendo múltiples perjuicios. Por ese motivo también se han desarrollado desde hace muchos años variados métodos que permitan romper la viruta a medida que esta se va produciendo.

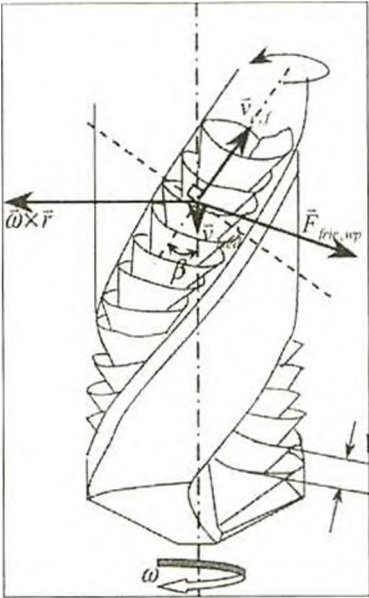


Fig.2.17. Generación de viruta continua espiralada que sale por las estrías. [Ke et al (2005)]

En Haggerty (1961) se pueden observar, en una discusión realizada por Kinman, fotografías de la generación de viruta con mechas convencionales. En ese trabajo se analiza el efecto de la geometría de la punta y de la simetría dimensional en desempeño de las mechas. Haggerty compara mechas convencionales con otras con punta espiralada. Luego Kinnman analiza el caso de mechas convencionales con distinto ángulo de cincel concluyendo que 130 grados es el ángulo de mejor desempeño, coincidiendo con el generalmente utilizado en las mechas comerciales. En las Fig. 2.18 y 2.19 se observa la formación de viruta con mechas convencionales sin y con diferencia de altura entre los filos.

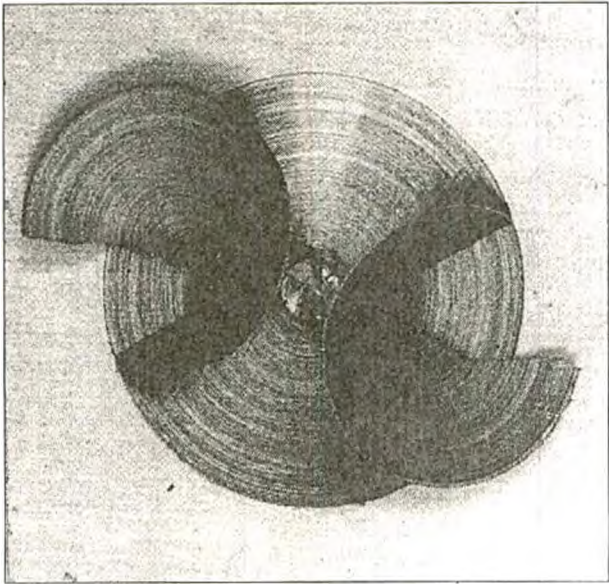


Fig.2.18. Formación de la viruta con una mecha convencional sin diferencia de altura entre los filos. [Haggerty (1961)]

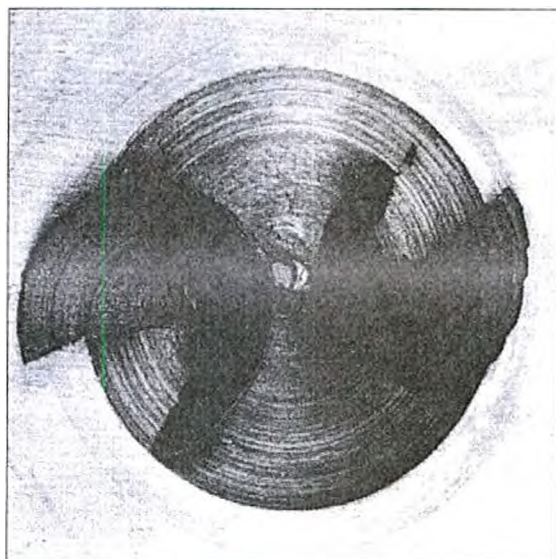


Fig.2.19. Formación de la viruta con una mecha convencional con diferencia de altura entre los filos.
[Haggerty (1961)]

Haggerty propone que la diferencia de altura en los filos genera un deterioro más rápido de la mecha, mostrando resultados que lo corroboran.

2.4.7 Forma de la viruta

En Ke y otros (2005) se analiza la formación de viruta continua durante el taladrado. Una vez producida, la viruta continua puede tener forma de espiral o de cuerda. Según el modelo de Watson (1985) el proceso de corte se produce como la suma de pequeños segmentos con parámetros de corte y geometría homogéneos. De aquí se puede relacionar la viruta y su forma con parámetros del corte. Se ha propuesto que torque aplicado en la misma dirección que la rotación de la viruta podría romperla fácilmente. El torque producido por la fricción opuesta a la rotación causa la rotura, por tal motivo la primera viruta suele ser más larga que la siguiente. También la viruta siguiente se verá interferida por los trozos de viruta que van quedando lo que provoca su rotura. La formación de la viruta no termina en el filo sino que continúa con su deformación en la flauta y en la pared del agujero. La dirección del flujo de la viruta está restringido por la diferencia de la velocidad de corte a lo largo del filo que es máxima en el extremo opuesto y por ese motivo el helicoide es cónica.

La interacción entre la viruta y las estrías de la mecha es un efecto que combina la geometría de la punta y el ángulo del helicoide de la mecha. Esto provocará que las virutas tengan distintas formas y longitudes. Podrán tener forma helicoidal o tipo cuerda dependiendo de la dirección natural de flujo con la que la viruta sale del filo. Cuanto más libre se mueva, la viruta más larga será. Por otro lado el diámetro de la hélice de conos estará dado por la mayor circunferencia que se ajuste al diámetro de las estrías (Fig. 2.20). La viruta tipo cuerda tendrá menor diferencia de velocidad de flujo desde el filo que las helicoidales, por tal motivo no forman conos sino cintas. Ke y otros (2006) tomando el modelo de Watson (1985a) de herramienta de corte elemental, y basándose en las ecuaciones del modelo de corte de Ernst y Merchant estudiaron la influencia de la acción de la viruta sobre la flauta y la pared del agujero sobre el torque y la fuerza de avance que se miden durante el corte de agujeros profundos, observándose un aumento de ambos a medida que la viruta recibe una oposición a su salida principalmente por mecanismos de fricción.

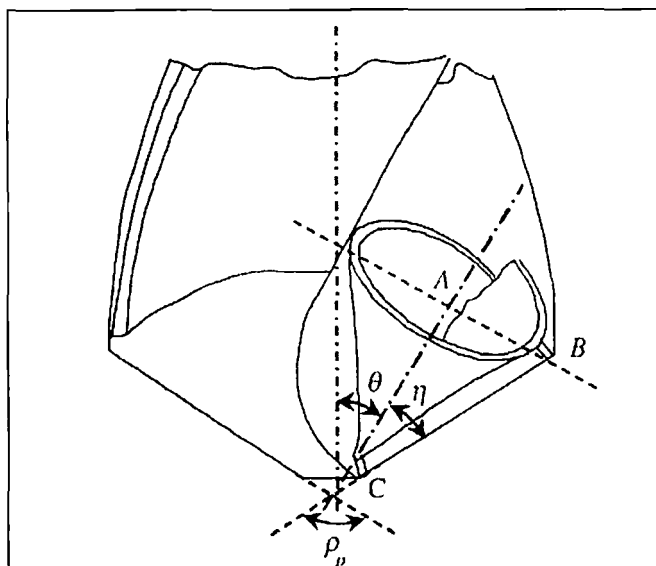


Fig. 2.20. Modelo del corte de viruta helicoidal. [Ke (2005)]

2.4.8 Dinámica de la penetración de la mecha

Un proceso de taladrado típico puede representarse por cuatro fases o etapas: la primera fase corresponde a la mecha rotando libremente antes de hacer contacto con el material. La segunda fase denominada de resbalamiento (“skidding”) comienza cuando la mecha entra en contacto con el material. Este fenómeno aleatorio está manejado por la superficie de la pieza y por el cincel de corte de la herramienta. El resbalamiento ocurre durante unas pocas revoluciones y luego la mecha se estabiliza en una nueva posición, en general deflectada y comienza a penetrar en la pieza. El movimiento en la tercera etapa se denomina Movimiento errático de la punta de la mecha (“wandering”) ocurre cuando luego de resbalar la mecha se estabiliza y llega a un diámetro del agujero igual al de la mecha. Esta etapa está acompañada por el movimiento errático de la mecha el cual actúa como el mayor contribuyente a la formación del agujero. La cuarta etapa comienza luego que la punta de la mecha penetró totalmente en el agujero, y las esquinas externas y los costados de la mecha comienzan a rozar en la pared del agujero. En esa etapa, tanto la posición como la forma del agujero ya han sido determinadas y es muy difícil cambiarlas. Para la comprensión del proceso de taladrado es muy importante el estudio de fenómenos como el movimiento errático de la mecha en la tercera etapa del taladrado. Con tal fin, Wijeyewickrema y otros (1995) han propuesto un modelo de elementos finitos que ajusta correctamente con resultados experimentales. Gong y otros (2005), han analizado la dinámica de la penetración de la mecha a través de un modelo mecánico de las fuerzas dinámicas utilizando los conceptos de espesor y área dinámicos de la viruta.

Por otro lado hay factores que influyen en la penetración de la mecha en el material que inducen variaciones en el tamaño de los agujeros y en la calidad superficial. Algunos de estos factores pueden ser la diferencia de altura entre los filos (labios) de la mecha, la forma de la punta, y el ancho del filo del cincel [Lorenz (1970)]. Estos efectos fueron estudiados por Endo y otros (2007) en el maquinado de agujeros de diámetros pequeños relacionando la precisión de los agujeros con la rigidez (al doblado de la mecha y con el tipo de punta de la mecha).

2.4.9 Factores que afectan a la duración de la mecha

La vida de una mecha, en sus sucesivas utilizaciones, depende de su historia “térmica” o de la temperatura de sus cortes previos, de la estrategia de corte, de la geometría de la punta, de la precisión de la geometría. También depende de la naturaleza de la operación: agujero ciego, agujeros pasantes en distintas superficies, ángulos de entrada, aplicación de lubricación, etc.

Subramanian y Cook (1977) proponen que en taladrado, para condiciones de corte determinadas, la vida de la herramienta es función de la dureza del material de la pieza. También muestran que el torque, la fuerza de avance y la potencia eléctrica de la máquina están relacionadas con la dureza del material y con el desgaste de la herramienta. Para esto miden torque, fuerza de avance y potencia eléctrica en función del desgaste de la mecha, para estudiar la influencia de la dureza del material sobre el desgaste de la herramienta. Realizan la predicción del torque y la fuerza de avance, modelándolas en función del desgaste del flanco de la mecha (y de la dureza del material maquinado). Para esto utilizan un modelo simplificado basado en el corte ortogonal. Ellos concluyen que la presencia aleatoria de algunas piezas de dureza grande puede influenciar mucho más a la herramienta que muchas piezas de poca dureza. Esto podría explicar la gran dispersión de la vida de la herramienta observadas en condiciones industriales.

Chen y Liao (2003) estudiaron los mecanismos de corte en el Inconel 718, de excelentes propiedades mecánicas pero de muy difícil taladrado, llegando a la conclusión que la fuerza de fricción es el factor más importante que gobierna la falla de la herramienta. Para minimizar el efecto utilizaron un lubricante con nano partículas, triplicando la vida de la herramienta.

2.5 Bibliografía del Capítulo 2

- Adibi-Sedeh A., V. Madhavan, B. Bahr, "Extension of Oxley analysis of machining to use different material models", *Trans ASME*, 125, 656-666 (2003)
- Al-Hamdan A., "Effect of misalignment on the cutting force signature in drilling", *Journal of Materials Processing Technology*, 124, 83-91 (2002)
- Anteri G. O., "Materiales metálicos. Conceptos básicos sobre maquinabilidad", Universidad Nac. de Gral. San Martín (2002)
- Armarego E.J.A., "A note on the shear angle relation in orthogonal cutting", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 6, 139-141 (1966)
- Armarego E. J. A., and C. Y. Cheng, "Drilling with rake face and conventional twist drills. i: Theoretical investigation", *Int. J. Mach. Tool Des and Res.*, 12, 17-35 (1972)
- Armarego E. J. A., and C. Y. Cheng, "Drilling with rake face and conventional twist drills. II: Experimental investigation", *Int. J. Mach. Tool Des and Res.* 12, 37-54 (1972)
- Astakhov V., "The assessment of plastic deformation in metal cutting", *Journal of Materials Processing Technology*, 146, 193-202 (2004)
- Astakhov V., "Tribology and Interface" Engineering Series, 52 Editor: B.J. Briscoe, Tribology of Metal Cutting, Elsevier, Amsterdam (2006)
- Bitans K. and R.H. Brown, "An Investigation of the Deformation in Orthogonal Cutting", *Int. J. Mach. Tool. Des. Res.*, 5, 155-165 (1965)
- Boothroyd, W.A. Knight, "Fundamentals of Machining and Machine Tools", Second Edition. Marcel Dekker, New York, (1989)
- Cakir M., Y. Isik, "Investigating the machinability of austempered ductile irons having different austempering temperatures and times", *Materials and Design*, 29, 937-942 (2008)
- Challen J.M. and P. Oxley, "An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models", *Wear*, 53, 229-243 (1979)
- Challen J.M. and P. Oxley, "Prediction of Archard's wear coefficient for metallic sliding friction assuming a low cycle fatigue wear mechanism", *Wear*, 111, 275-288 (1986)
- Chen Y. and Y. Liao, "Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 269-273 (2003)
- Childs T.H.C, K. Maekawa, T. Obikawa, and Y.Yamane, "Metal Machining. Theory and Application", Arnold, London, (2000)
- Cook N. H., M. C. Shaw and I Finnie, "Discontinuous Chip Formation", *Trans. ASME*, 76, 153-162 (1954)
- Dimla Snr. D.E., "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 1073-1098 (2000)
- Elhachimi M., S. Torbaty and P. Joyot, "Mechanical modelling of high speed drilling. 1: predicting torque and thrust", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 553-568 (1999a)
- Elhachimi M., S. Torbaty and P. Joyot, "Mechanical modelling of high speed drilling. 2: predicted and experimental results", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 569-581 (1999b)
- Enahoro H. and M.J. Welsh, "The Relevance of the Mechanics of Metal Cutting to Machinability", Proceeding of Machinability, Iron and Steel Institute, 19-24 (1965)
- Endo H., T. Murahashi and E. Marui, "Accuracy estimation of drilled holes with small diameter and influence of drill parameter on the machining accuracy when drilling in mild steel sheet", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 175-181 (2007)
- Ernst H., "Physics of the metal cutting", *Trans. Amer. Soc. Metals*, 20, 1-34 (1938)
- Ernst H. and M. Merchant, "Chip formation, friction and high quality machined surfaces", *Surface Treatment of Metals* ASM, 20, New York (1941)

- Field M. and M. Merchant, "The mechanics of the formation of the discontinuous chip in metal cutting", *Trans. ASME*, 71, 421-430 (1949)
- Gong Y., C. Lin and K. Ehmann, "Dynamics of Initial Penetration in Drilling: Part 1- Mechanistic Model for Dynamic Forces", *Transactions of the ASME*, 127, 280-288 (2005)
- Haggerty W.A., Effect of point geometry and dimensional symmetry on drill performance, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1, 41-58 (1961)
- Ke K., J. Ni. and D. Stephenson, "Continuous chip formation in drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1652-1658 (2005)
- Ke K., J. Ni. and D. Stephenson, "Chip thickening in deep hole drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1500-1507 (2006)
- Lee E.H. and B.W. Schaffer, "The theory of plasticity Applied to a Problem of Machining", *J. Appl. Mech.*, 18, 405-413 (1951)
- Lin G.C., "Prediction of cutting forces and chip geometry in oblique machining from flow stress properties and cutting conditions", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 18, 117-130 (1978)
- Lorenz G., "A study on the effect of drill sharpening and sizability of workpiece material on the process variability in drilling", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 10, 133-141 (1970)
- Merchant M.E., "Basic mechanics of the metal cutting process", *Journal of Applied Mechanics*, A168-A175 (1954)
- Merchant M.E., "Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip", *Journal of Applied Physics*, 16, 267-275 (1945a)
- Merchant M.E., "Mechanics of the metal cutting process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting", *Journal of Applied Physics*, 16, 318-324 (1945b)
- Merchant M.E., "Recent progress in metal removal research at Cincinnati", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 1, 79-88 (1961)
- Oxford Jr. C.J., "On the drilling of metals I Basic Mechanic of the Process ", *Transactions of the ASME*, 77, 103-114 (1955)
- Oxley P.L.B., "Mechanics of metal cutting", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 1, 89-97 (1961)
- Oxley P.L.B., "Modelling machining processes with a view to their optimization and to the adaptive control of metal cutting machine tools", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 4, 103-119 (1988)
- Pal A. K., A. Bhattacharyya and G.C. Sen, "Investigation of the torque in drilling ductile materials", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 4, 205-221 (1965)
- Palmer W.B. y P.L.B. Oxley, "Mechanics of metal cutting", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 173, 557-580 (1959)
- Pande S.S., H.P. Relekar, "Investigations on reducing burr formation in drilling", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 26, 339-348 (1986)
- Piispanen V., "Theory of formation of Metal Chips, *Journal of Applied Mechanics*, 19, 876-881 (1948)
- Pirtini M. and I. Lazoglu, Forces and hole quality in drilling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1271-1281 (2005)
- Sadowy M., "Cutting Forces and cutting power in orthogonal cutting of steel aluminum brass and plastic, an attempt of an integrated approach", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 5, 81-118 (1965)
- Shaw M.C., "The size effect in metal cutting", *Sadhana*, 28, 875-896 (2003)
- Shaw M.C., N.H. Cook and P.A. Smith, "The Mechanics of Three Dimensional Cutting Operations", *Trans. ASME*, 74, 1055-1064 (1952)
- Shaw M. C., "A quantized theory of strain hardening as applied to the cutting of metals", *Journal of Applied Physics*, 21, 599-606 (1950)
- Shaw M.C., N. H. Cook y I. Finnie "The Shear Angle Relationship in Metal Cutting", *Trans. ASME*, 75, 73-288 (1953)

- Shaw M.C. and C.J. Oxford, "On the drilling of metals 2 - the torque and thrust in drilling", *Trans ASME*, 79, 139-148 (1957)
- Stabler G.V., "The fundamental Geometry of Cutting Tool", *Proc. Inst. Mech Eng.*, 165, 14-21 (1951)
- Subramanian K., and N.H. Cook, "Sensing of drill wear and prediction of drill life", *ASME Journal of Engineering for Industry*, 103, 295-301 (1977)
- Roth R.N., "The effect of positive and negative strain hardening rates on stress distributions in orthogonal machining", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 17, 39-46 (1977)
- Venkataraman R., J.H. Lambie, F. Koenigsberger, Analysis and performance testing of a dynamometer for use in drilling and allied processes, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 5, 233-261(1965)
- Venkataraman R., "Principles and applications of tool simulation in the metal cutting process", *J. Mach. Tool Des. Res.*, 8, 97-106 (1968)
- Venuvinod P., "Three-dimensional cutting force analysis based on the lower boundary of the shear zone. Part 2: Two edge oblique cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36, 325-338 (1996)
- Venuvinod P. and W. Jin, "Three-dimensional cutting force analysis based on the lower boundary of the shear zone. Part 1: single edge oblique cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36, 307-323 (1996)
- Watson A.R., "Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. I. initial cutting lip model", *J. Mach. Tool Des. Res.*, 25, 347-365 (1985a)
- Watson A.R., "Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. II. Revising cutting lip model", *J. Mach. Tool Des. Res.*, 25, 367-376 (1985b)
- Watson A.R., "Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. III. drilling model for chisel edge", *J. Mach. Tool Des. Res.*, 25, 377-392 (1985c)
- Watson A.R., "Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. IV. Drilling test to determine chisel edge contribution to torque and thrust", *J. Mach. Tool Des. Res.*, 25, 393-404 (1985d)
- Watson A.R. and R.A. Williams, "Specification of the cutting geometry of single point tools and twist drills using the ISO system", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 17, 103-116 (1977)
- Wijeyewickrema A., L. Keer and K. Ehmann, "Drill wandering motion: experiment and analysis", *Int. J. Mech. Sci.*, 37, 495-509 (1995)
- Yang J., V. Jaganathan and R. Du, "A new dynamic model for drilling and reaming processes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 299-311 (2002)
- Zhang L.B., L.J. Wang, X.Y. Liu, H.W. Zhao, X. Wang and H.Y. Luo, "Mechanical model for predicting thrust and torque in vibration drilling fiber-reinforced composite materials", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 641-657 (2001)
- Zorev N.N., "Metal Cutting Mechanics", Pergamon Press, Oxford, (1966)

Capítulo 3

Métodos para la determinación del estado de herramientas de corte

El presente capítulo cierra la parte introductoria del trabajo de tesis. A continuación se presentan los variados métodos directos e indirectos para la determinación del estado de herramientas de corte. En general por razones de practicidad en su aplicación son de mayor interés los métodos indirectos entre los cuales se destaca la EA como uno de los que más se ha desarrollado en los últimos 25 años. Luego se describen los distintos tipos de fuentes de EA en el corte. Como ejemplo se muestra el cálculo del valor RMS de la EA en un caso de corte donde la principal fuente es la deformación plástica. También se mencionan las principales fuentes de ruido que afectan a la medición de las señales de EA, así como las ventajas de la utilización de este método. Al final del capítulo se hace un resumen de los distintos métodos de análisis que se proponen y estudian en la literatura para extraer información de las señales de EA respecto del estado de las herramientas y del proceso de corte.

3.1 Introducción

El incremento de productividad de un sistema de maquinado automático está limitado por la confiabilidad de este. Deberán evitarse las piezas defectuosas producidas por un corte incorrecto causado por máquinas, procesos o herramientas con fallas. Las maneras de impedir esto podrían ser por un lado el control humano que detecte el mal funcionamiento o caso contrario un sistema experto automático independiente del operario, que pudiera detectarlo. Un operador humano experimentado desarrolla la habilidad para determinar el correcto desempeño de la herramienta durante el maquinado, basada en su práctica y en sus sentidos (visión, sonido o fuerza aplicada por su mano en el avance de la herramienta de corte). De la misma manera se pretende que un sistema automático pudiera ser capaz de poder detectar el momento cuando el sistema esté fallando, pudiendo interrumpirse la línea de producción hasta solucionar el problema, y más aun, lo óptimo sería poder detectar la falla antes que se produzca y de esa manera evitar la parada.

A continuación el factor principal que se tomará para su estudio es el estado de la herramienta de corte. Como se ha mencionado previamente, esta información si es obtenida durante el corte posibilita numerosas ventajas en varios aspectos, que podrían reducirse a tres fundamentales. Por un lado desde el punto de vista económico, por otro lado desde la calidad del producto y por último desde la óptica del control del proceso como ya se ha enunciado. Por estos motivos el monitoreo del estado de las herramientas ha ido tomando cada vez más relevancia.

La idea de monitorear sistemáticamente el desgaste de la herramienta se remonta a los trabajos históricos de Piispanen, Ernst, Merchant, Shaw, etc. citados en el capítulo anterior, en los cuales se empieza a estudiar metódicamente el proceso de corte, la generación (extracción) de viruta, y la influencia de los parámetros del corte. Allí también se empieza a esbozar el concepto de calidad del corte, directamente relacionado con el de “estado de la herramienta”.

Durante la década del 60 estos conceptos se vuelven más tangibles. Por ejemplo en una publicación Merchant (1961) postula que el factor más importante que limita la velocidad de remoción de metal durante el corte es el estado de desgaste de la herramienta de corte, y presenta un método experimental para el análisis del mismo. En esos años se forman y fortalecen en el mundo varios grupos en los cuales se estudian los procesos y las herramientas de corte. En los siguientes veinte años se realizan numerosos trabajos muchos de los cuales son extractados por Cook (1980), quien hace una revisión de los distintos métodos directos e indirectos de sensado del estado de las herramientas de corte disponibles hasta ese año. Propone que a partir de este sensado se podrían tomar decisiones relativas al corte por medio de un control adaptivo, optimizando las condiciones (velocidades y avances) a medida que se realiza dicho proceso. Por otra parte plantea también que este tipo de sensado permitiría tomar decisiones y estrategias concernientes al cambio de herramientas. Para esto se necesitaría relativamente poca información. En su trabajo concluye que hasta esos años, aunque se han investigado muchos métodos, ninguno ha llegado a una aplicación comercial exitosa, y propone el tema como un desafío pendiente.

En los finales de los años setenta y principios de los años ochenta aparecen nuevos trabajos de investigación con distintos métodos de monitoreo del desgaste. En esa época comienza la utilización de la EA como nuevo método indirecto para la caracterización del estado de la herramienta, tomando una importante relevancia. Como autor de referencia de esa época se puede citar a Dornfeld como uno de los más creativos y prolíficos.

En la década del 90, el concepto del monitoreo de la condición de la herramienta (en inglés “Tool Condition Monitoring” (TCM)) se va convirtiendo en una necesidad en las aplicaciones industriales. A la vez se va fortaleciendo el concepto del control inteligente de procesos como por ejemplo a partir de las redes neuronales. En 1995 Byrne y otros relevantes investigadores del tema publican una importante revisión de alrededor de doscientos trabajos, en la cual se sintetiza el estado del arte de los estudios orientados hacia las aplicaciones industriales en el TCM hasta la fecha de su publicación [Byrne y otros (1995)]. En el trabajo plantean las necesidades de su aplicación, y los requerimientos para el sensado de los procesos de corte. El trabajo más allá de

su mayor profundidad en el tema que el previamente realizado por Cook quince años antes, demuestra la aparición de nuevos métodos para el análisis de las señales medidas, así como la evolución de los métodos ya establecidos. Hacen hincapié en trabajos que proponen el “sensado inteligente” desde el sensor hasta el procesamiento de la información. Postulan que solo una fracción de sensores disponibles en el mercado son apropiados para TCM. Además Byrne hace una serie de recomendaciones para el sensado del estado de la herramienta de corte que son:

- No debe reducir la rigidez estática y dinámica de la máquina.
- No debe restringir los parámetros de corte ni el espacio de trabajo.
- Debe ser de bajo costo, sin mantenimiento y fácilmente reemplazable.
- La función debe ser independiente de la herramienta y de la pieza.
- Debe tener características metrológicas adecuadas.
- Transmisión de datos confiable.
- La medición debe estar lo más cerca posible de la máquina.

Ese mismo año, Teti (1995) publica una base de datos en la forma de un listado con 500 trabajos en el tema, realizados entre 1960 y 1995. Al año siguiente Dimla Jr. (1996) hace una revisión de los métodos de procesamiento de las señales con distintos tipos de redes neuronales, y para distintos tipos de formas de tomar parámetros que lleven información del corte, es decir distintos métodos de sensado. En otra revisión realizada por Dimla Sr. (2000), se extraen nuevamente los principales métodos de sensado, pero en ese trabajo sin poner énfasis en los métodos de procesamiento de las señales medidas, ni en sistemas de análisis complejos de la información, sino centrada en los tipos de sensado.

Otros temas directamente ligados al TCM van apareciendo en la literatura como es el caso del Mantenimiento basado en la condición de la máquina (en inglés “Condition-Based Maintenance” (CBM)) del cual hay una publicación de Jardine y otros (2006) en la cual se presenta una revisión de este tema, que consiste en diagnósticos y pronósticos sobre decisiones de mantenimiento en función de tres etapas que son la adquisición y el procesamiento de datos, y luego la decisión del mantenimiento.

La problemática de los trabajos de investigación de los últimos años ya no ha pasado tanto por los métodos de sensado, sino por el desarrollo y la aplicación de poderosos métodos de inferencia del estado de la herramienta, y del proceso de corte en general, a partir de los múltiples datos medidos. Entre esos métodos se pueden mencionar los sistemas de inteligencia artificial (AI) (redes neuronales, sistemas expertos, etc.) y también los poderosos métodos de análisis de señales en tiempo-frecuencia tales como wavelets [Li (2002)], EMD [Bassiuny y otros (2007)] [Peng (2006)], y otros. Esto es fundamentalmente debido a que los procesos de corte se pueden considerar procesos estocásticos complejos, con muchas variables en los cuales la interpretación determinista se vuelve inhallable. Por tal motivo en la actualidad la mayoría de los estudios se enfocan al análisis con métodos empíricos. En 2002 Sick presento una extensa y detallada revisión de trabajos sobre el monitoreo del desgaste mediante redes neuronales. En un reciente e importante trabajo de Teti y otros (2010) se resume una gran cantidad de líneas de investigación en este sentido.

Para concluir esta introducción se pueden citar los tipos de falla más comunes de las herramientas de corte dedicadas a metales. Estos son el desgaste gradual de las caras de la herramienta, la falla por temperatura cuando esta se vuelve demasiado elevada para permitir una masiva deformación plástica en el filo y la fractura (total o parcial) causada por fatiga o carga excesiva.

3.2 Métodos directos e indirectos para la determinación del estado de la herramienta de corte

Existen una variedad de métodos para determinar el desgaste de las herramientas de corte, los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos que son los métodos directos y los indirectos

[Cook (1980)] [Dimla (2000)] [Sick (2002)]. Se denominan “**métodos directos**” a aquellos que permiten la medición directa del estado actual de la herramienta, como por ejemplo la visualización óptica a través de una imagen en la cual se pueden evaluar las dimensiones y el estado del filo. Los otros métodos se denominan “**indirectos**” y en estos el estado se puede determinar a partir de la medición de alguna cantidad que se relacione, o sea función del desgaste. Ambas clases de métodos serán detalladas a continuación.

3.2.1 Métodos directos

Entre los métodos directos para la determinación del desgaste del filo de una herramienta de corte para maquinado se pueden citar los siguientes:

- **Medición de la geometría de la herramienta.**

Distintos métodos permiten la medición directa de variaciones mecánicas de la geometría de la herramienta. Esto puede hacerse con trazadores de perfil, con la medición de la variación del peso de la herramienta, por métodos ópticos, neumáticos y/o ultrasónicos [Abu-Zahra y Nayfeh (1997)] [Nayfeh (1995)] [Abu-Zahra y Yu (2003)]. Estos métodos en general son aplicados fuera de línea. Como ejemplos se pueden citar la medición a partir de sensores laser de la geometría de una mecha [Peng y otros (2007)] o del desplazamiento en fresado [Ryabov y otros (1998)].

- **Sensores de visión (Imagen óptica).**

Los métodos para la obtención de la imagen del filo de la herramienta pueden ser muy rápidos e intercalarse entre ciclos de trabajo. Pueden basarse por ejemplo en la variación de las propiedades reflectivas entre la parte de la herramienta gastada y el resto. Estas imágenes pueden ser tomadas con CCD. [Kurada y Bradley (1997a)] [Kurada y Bradley (1997b)]. También por medio de interferometría láser o con luz visible puede cuantificarse por ejemplo la profundidad de cráteres del filo de la herramienta [Devillez y otros (2004)]. En general dado la interferencia de los residuos del corte y del lubricante estos métodos suelen aplicarse en los momentos de intervalo entre cortes. Luego se pueden utilizar algoritmos de reconocimiento de patrones [Castejón y otros (2007)] [Lanzetta (2001)]. También los métodos de visión con CCD pueden emplearse en tamaños aun muy pequeños como en micro taladrado [Su y otros (2006)].

- **Imagen electrónica de barrido.** La microscopía electrónica de barrido (MEB) es un buen método para obtener imágenes de alta resolución y gran profundidad de campo para el estudio del desgaste de herramientas. También este método permite la fácil cuantificación del daño a partir de la medición cuantitativa de distancias en el plano de la imagen. En un trabajo de Casey y Wilks (1976) se mostraron los beneficios de este método, que fue utilizado en la presente tesis.

- **Técnicas eléctricas.** Los métodos son variados, como la medición de la resistencia de contacto entre herramienta y pieza como la incorporación de resistencia en forma de películas en el flanco para determinar la variación de estas durante el desgaste. En Wilkinson (1971) se describe la aplicación a la medición del desgaste de un inserto en torneado basado en la variación de la resistencia en función del área de la sección.

- **Técnicas radioactivas.** Se implantan pequeñas cantidades de material radioactivo en un punto del flanco de la herramienta y luego de una etapa de maquinado por medio de un detector Geiger se determina donde está ese emisor radioactivo. Este método fue desarrollado por Merchant y Krabacher en los años 50 [Merchant y Krabacher (1952)]. Merchant (1961) describe el método para determinar el desgaste con radioisótopos.

- **Cuantificación y análisis de las partículas del desgaste en la viruta.** Puede hacerse utilizando material radioactivo, detectando la radiación de fragmentos de viruta de la herramienta entre la viruta del material. También suele usarse el análisis químico (microsonda) y la difracción de RX de los fragmentos.

3.2.2 Métodos indirectos

A continuación se citan los métodos indirectos más reconocidos en la literatura del tema.

- Variación de la fuerza y el torque.

Aunque las fuerzas en si son sensibles a la complejidad de un proceso mayor que el simple desgaste, igualmente son muy útiles indicadores del desgaste y rotura de la herramienta [Cook (1980)]. Se puede correlacionar un mayor desgaste con una mayor fuerza que debe aplicarse al corte. Aunque hay que tener en cuenta que la fuerza puede depender de la dureza del material, de la profundidad de la capa removida y de la velocidad de corte. Históricamente fue uno de los primeros métodos para la caracterización y modelización del proceso de corte [Merchant (1945)], [Shaw and Oxford (1957)], [Lee and Schaffer (1951)] y otros. Nuevas mediciones en esa dirección han sido hechas en trabajos más recientes [Elhachimi y otros (1999)]. En el capítulo anterior se cita un trabajo de Subramanian and Cook (1977) en el cual se estudia el sensado del desgaste y predicción de vida de mechas en taladrado. En este se plantea que la dureza de la pieza taladrada afecta fuertemente a la vida útil de la mecha y también afecta a la medición de la fuerza de avance y al torque, y por lo tanto esas mediciones deben realizarse en piezas con una tolerancia de dureza uniforme.

Damodarasamy y Raman (1993) concluyen que el principal problema del monitoreo de las fuerzas es que estas dependen de muchas variables como la dureza y la homogeneidad de la pieza, o los parámetros de corte. El efecto conjunto del desgaste del filo y la craterización es muy difícil de cuantificar pudiendo afectar ambas a las fuerzas medidas de manera impredecible. Para ello harán falta sofisticados métodos de procesamiento de señales.

Lin y Ting (1996) miden torque y fuerza en taladrado para tres distintos niveles de desgaste de los filos para distintos diámetros de mechas, y velocidades de rotación y avance. Los resultados de las mediciones confirman un aumento del torque y principalmente de la fuerza de avance al incrementarse el desgaste de los filos de corte. Jantunen (2002) propone que este efecto está dado por el incremento en la fricción entre la herramienta y la pieza. También expone que la fuerza de avance es mejor indicador del desgaste de la herramienta que el torque, que es contradicho en un trabajo de Chen y Liao (2003) en el cual proponen que el torque es mejor indicador del desgaste de la mecha que la fuerza de avance, posiblemente consecuencia de la fricción. En dicho trabajo se analizan las distintas etapas de la evolución del corte en taladrado de Inconel a partir de la medición de fuerza de avance y torque para mechas con recubrimientos. Otra cosa propuesta por Jantunen en 2002 es que la dureza del material maquinado influye fuertemente en la fuerza de avance y el torque. Por lo tanto para que estas mediciones tengan sentido deben realizarse en un material lo suficientemente homogéneo en ese sentido.

Chungchoo y Saini (2000) proponen como parámetros para monitorear operaciones de corte oblicuo a la energía total y la entropía total, ambas de la fuerza de corte. La primera es la representación de la cantidad de energía consumida y la segunda el patrón de distribución de las señales, ambas en el dominio de frecuencias. La energía total de la fuerza se incrementa con la velocidad de corte, la de avance y a menor ángulo de ataque. También se incrementa con el crecimiento del desgaste del flanco. La entropía total de la fuerza no muestra sensibilidad a las variaciones de las condiciones de corte o al desgaste progresivo de la herramienta.

Al Hamdan (2002) estudia la falta de alineación del taladrado analizando la fuerza axial y el torque.

El torque y la fuerza de avance son dos de los parámetros más estudiados y que mejor pueden relacionarse con los distintos estados de corte de la herramienta. Por esta razón se utilizan en la mayoría de los trabajos que realizan estudios a través de métodos empíricos

multi paramétricos por ejemplo en el análisis de casos de desgaste con redes neuronales o lógica difusa. [Bhattacharyya y otros (2007)] [Lin y Ting (1996)].

Ha sido importante en esta línea de investigación el diseño, construcción y ensayo de sensores de fuerza y torque, pudiendo citarse en este sentido trabajos actuales como los de Totis y otros (2010), Yaldiz y otros (2007), Karabay (2007), Gao y otros (2006), Jin y otros (1995) y otros muy anteriores como los de Venkataraman y otros (1965) y Levy (1967).

- Vibraciones mecánicas.

El análisis de vibraciones provee un patrón del cual se puede extraer información del estado de la herramienta de corte. Hay mucha bibliografía y muchos trabajos realizados con este método de medición. En general se estudia el espectro en frecuencias de las vibraciones, relacionando cada frecuencia con características del proceso de corte, estando algunas de ellas ligadas al desgaste de la herramienta.

Las ventajas de este método son la facilidad de implementación y el hecho de que se pueden colocar los sensores sin modificar la disposición de la pieza en la máquina ni alterar el proceso de maquinado. Entre las desventajas se puede mencionar la dependencia de las señales de vibración con el material maquinado, las condiciones de corte y la estructura de la máquina. También se puede agregar en el estudio de vibraciones la influencia del entorno donde está ubicada la máquina. Se busca que las técnicas de vibraciones sean sensibles a las variaciones de la herramienta e insensibles a condiciones de corte, posición del sensor, etc. Por ejemplo, para el taladrado, las vibraciones en el dominio del tiempo se muestran como cortos transitorios oscilantes de alta frecuencia y banda angosta que ocurren de manera aleatoria durante el corte. Junto con el desgaste, la amplitud de los transitorios comienza a aumentar. En momentos antes de la rotura los transitorios se asemejan a los de un sistema resonante a alguna excitación impulsiva, con una frecuencia que no depende de las condiciones de corte. (El-Wardany (1996))

El método de vibraciones data de algunos años, pero en el último decenio se han logrado importantes avances en la aplicación de algoritmos de procesamiento de señales (cada vez más eficaces) que lo ponen entre los más utilizados para la caracterización del corte. En trabajos como los de Dimla y Lister (2000) para torneado, así como los de Li y otros (2000) o Abu-Mahfouz (2003) para taladrado se han hecho importantes estudios de las vibraciones producidas en el corte para clasificar el desgaste de las herramientas con distintos daños. En estos trabajos, las señales fueron analizadas por diversos métodos tales como: potencia espectral, análisis estadístico en el dominio del tiempo, y redes neuronales artificiales (ANN), obteniendo buenos resultados los cuales podrían ser extendidos a otros procesos de maquinado.

- Sonido.

Este método de medición está relacionado con la experiencia del operador humano para discriminar en el ruido de la herramienta que pudiera indicarle información del corte y del estado de la misma. El rango de frecuencia del sonido va aproximadamente desde 20 a 20000 Hz. Si bien estos métodos han mostrado cierta efectividad en laboratorio, la medición acústica (a frecuencias audibles) es difícil de implementar y tiene baja precisión en un entorno industrial, dado que la polución de ruido ambiental y vibraciones es importante para el rango de frecuencias correspondiente al sonido. En Grabec y Leskovar (1977), y en Grabec y otros (1998) se mide en el rango audible y en ultrasonido. Kopac and Sali (2001) analizan en procesos de torneado los efectos de distintas velocidades de corte y de avance sobre el espectro del sonido detectado durante el corte. En general a condiciones constantes de corte el aumento del desgaste del inserto da un incremento en la amplitud del espectro en las frecuencias más altas. En Aliustaoglu y otros (2009) se

analiza el estado de la herramienta en taladrado midiendo en el rango audible, mencionado por esos autores como EA, pero captado por un micrófono y no por un sensor de EA (de mayor frecuencia). En ese trabajo también se miden las vibraciones y la fuerza aplicada en el corte. Robben y otros (2010) también trabajan en el rango audible de las ondas elásticas generadas por el maquinado.

- Variación de la potencia eléctrica de la máquina.

Al aumentar el desgaste de la herramienta, las fuerzas de corte y el torque también se incrementan, lo cual demanda mayor energía de la máquina eléctrica, aumentando su consumo. La potencia se mide con la corriente que circula por los motores de la máquina herramienta, esto puede ser tanto para la parte de la rotación así como para la de avance (si están separados). El sistema tiene una inercia mecánica y la salida eléctrica tiene las características de un filtro pasa bajo, lo que dificulta en gran medida la detección de fenómenos como la rotura de la herramienta. Por esta razón, este método es menos sensible que los métodos mecánicos, pero un buen punto a favor es su muy fácil implementación, lo que permite realizar de manera sencilla cuantiosas mediciones. En los últimos años se han aplicado a este método de sensado distintos algoritmos para el estudio de las señales con buenos resultados. [Al-Sulaiman y otros (2005)] [Bassiuny y Li (2007)] [Constantinides y Bennet (1987)] [Li y Tso (1999)] [Li y Tso (2000)] [Li (2001a)] [Li (2001b)].

- Medición de temperatura de la interfase herramienta-material.

Esta suele incrementarse al aumentar el desgaste de la herramienta, habiendo numerosa bibliografía que lo acredita. Los métodos de sensado de la temperatura son variados [Potdar y Zehnder (2004)], por ejemplo: métodos fotográficos IR [Boothroyd (1961)], termocuplas en la herramienta [Ozcelik y Bagci (2006)], cámaras termográficas [Tan y otros (2009)], pirómetros [Sutter and Ranc (2007)], video térmico, CCD infrarrojo [M'Saoubi y Chandrasekaran (2004)], etc. El calentamiento en el corte ocurre en las regiones donde se disipa energía de la deformación plástica y la fricción. Los campos mecánicos y térmicos están fuertemente acoplados. Se pueden realizar mapas de temperatura de la zona de corte, de la viruta, y de las distintas partes de la herramienta. Una revisión muy completa de los métodos de medición de temperatura en corte fue realizada por Komanduri y Hou (2001). Luego de las mediciones, las condiciones del corte y de la herramienta se pueden modelar analíticamente [Nayebi y otros (2008)], por elementos finitos [Potdar y Zehnder (2003)] y con otros métodos numéricos [Tay y otros (1976)].

- Medición de la EA.

Este tema por su importancia para esta tesis se desarrolla en una sección exclusiva a continuación.

- Otros métodos indirectos

Entre los demás métodos que permiten inferir de manera indirecta el desgaste de la herramienta de corte, se pueden mencionar como ejemplos el análisis de la viruta o el análisis de la superficie maquinada. Como ejemplo se cita a Wong (1997) quien realizó un análisis del estado de la herramienta por medio del patrón de dispersión de láser en la superficie de la pieza.

3.3 Medición de la EA generada durante el corte de metales para la determinación del estado de la herramienta

3.3.1 Introducción

Los fundamentos de la EA ya han sido establecidos y desarrollados en el Capítulo 2. En esta sección se tratará la aplicación de este método de ensayo no destructivo a la determinación del desgaste de herramientas de corte durante su utilización en procesos de maquinado.

Iwata y Moriwaki (1977) y Grabec y Leskovar (1977) presentaron los primeros trabajos en la literatura en los cuales se aplica la EA para la determinación del estado de la herramienta de corte. Iwata y Moriwaki estudiaron las señales de EA generadas en un proceso de torneado, reportando que estas eran mayoritariamente del tipo explosión (“burst”). También mostraron que el RMS, la potencia espectral y el número de cuentas se incrementaban a la par del desgaste de la herramienta. Simultáneamente, Grabec y Leskovar analizaron la emisión de ondas elásticas de frecuencias audibles (sonido) y ultrasónicas (EA) durante el torneado de aluminio. En ese trabajo se propuso que la EA estaba principalmente generada por la fricción entre la herramienta y la pieza.

Pocos años después, en los comienzos de la década del 80 y hasta mediados de los 90's, se realizaron importantes estudios que fundamentaron la aplicación de la EA para el estudio de los procesos de maquinado, en principio realizando las mediciones en laboratorio. De esa manera, surgen una gran cantidad de trabajos entre los que se destacan los de Dornfeld y Kannatey Asibu (1980), Dornfeld (1981), Kannatey-Asibu y Dornfeld (1982), Chung y Kannatey-Asibu (1991), Kakino (1984), Diniz (1991), Carpenter (1992), Heiple y otros (1994).

En Dornfeld y Kannatey-Asibu (1980) se plantea un primer modelo para el valor RMS de la EA generada durante el corte ortogonal, basándose en Iwata y Moriwaki (1977), en las teorías de corte de metales (teoría del deslizamiento de cartas de Shaw) y en los fundamentos de la EA. Allí se presenta una ecuación que relaciona al valor RMS de la EA con los parámetros del corte, y se realiza una serie de experimentos para justificarla. Como se ha visto en el Capítulo 1 la parte elástica de la energía aplicada se conserva mientras que el trabajo hecho por la deformación plástica es irrecuperable. Este último ocurre principalmente por el movimiento de dislocaciones y es una de las fuentes de la EA. En ese trabajo se considera solo la deformación plástica en la zona de corte como fuente de EA, dando resultados alentadores, pero incompletos. En Kannatey-Asibu y Dornfeld (1981), se propone un nuevo modelo más general basado en la descripción del corte de Merchant, en el cual se agrega la EA generada en la zona secundaria de corte. Esa ecuación, si bien es simple, fue posteriormente utilizada en otros trabajos.

En los trabajos de esa época como Dornfeld (1981) y en Kannatey-Asibu y Dornfeld (1982), se vio que los mecanismos de EA y de la propagación de las ondas son muy complejos para ser estudiados totalmente de manera determinista, de manera que lo que se estudia son los parámetros estadísticos que se han mencionado (Amplitud, RMS, cuentas, etc.), pensando a la generación de la EA en el corte como un proceso estocástico.

Kakino (1984) hace una revisión del estado de la EA aplicada al sensado en el corte de metales en Japón. Uno de los temas importantes que trata este trabajo es cómo reducir la interferencia de las distintas fuentes de ruido que afectan a las mediciones en planta, realizando una clasificación de estos.

Dici y Dornfeld en 1987 presentan dos trabajos sobre la EA generada durante el fresado, midiendo el valor RMS de la EA y la fuerza aplicada por la herramienta a la pieza, para estudiar los efectos de las variables del proceso de corte y el sensado del desgaste de la herramienta. En el primer caso relacionan el RMS de la EA con las variables del proceso tales como velocidad, avance, cantidad de insertos y lubricación. Determinan que el RMS de la EA es muy sensible a la secuencia de eventos, contacto, fricción, formación de viruta, etc. El nivel de la señal aumenta con la velocidad del corte y disminuye con la aplicación de lubricación. La variación con la velocidad de avance es compleja. Detectan una similitud en la variación del RMS y de la

fuerza de corte con la variación de la velocidad de avance. En estos trabajos el transductor es único y está colocado en la pieza.

Chung y Kannatey-Asibu (1991) replantean los mecanismos de la EA producida durante el corte, descritos en Kannatey Asibu y Dornfeld (1982), estudiando en detalle la deformación plástica como fuente principal de EA, presentando un modelo que no tuvo repercusión en la literatura posterior.

Du y otros (1991) efectuaron un análisis espectral de la EA generada en el torneado y encontraron una relación entre la evolución del desgaste y el corrimiento de la densidad de potencia de las señales de EA hacia frecuencias mayores.

Dornfeld (1992) hace una amplia revisión de la aplicación de la EA a la manufactura, mostrando el potencial de este método no destructivo para el análisis del estado de la herramienta, clasificando el tipo de proceso, los mecanismos básicos en los que se basan, de qué manera se produce la generación de la EA, y cómo detectarla. Toda esa importante información se presenta condensada en tres tablas.

Carpenter y otros (1992) estudiaron el efecto de la fricción en el deslizamiento de superficies y su relación con la EA generada en el maquinado. Estos autores propusieron que la principal fuente de EA en el corte con una punta simple está dado por la fricción entre la cara de la herramienta y la superficie recién maquinada. La justificación de esa afirmación se basa en la aparente correlación entre los resultados de las mediciones de la fuerza de fricción y de RMS de la EA. Esto causaría una fuerte dependencia de la EA generada en el corte con el tipo de material maquinado. Las señales características de EA no cambian de igual manera para distintos materiales estudiados. Los mismos autores en otro trabajo posterior [Heiple y otros (1994)], luego de una extensa investigación de maquinado para distintos materiales y en distintas condiciones de corte, concluyeron que probablemente no exista un cambio simple de las características de la señales de EA en función del desgaste de la herramienta que sea generalizable a todos los casos de estudio.

Hasta 1993 la literatura de la EA aplicada al corte de metales consistía en trabajos en los cuales la detección de las ondas elásticas se realizaba por medio de transductores piezoeléctricos. En ese año Mc Bride y otros (1993) presentaron la aplicación de un sistema interferométrico tipo Michelson para el sensado de la EA. El dispositivo mostró estabilidad, y los resultados una buena correlación con aquellos obtenidos con sensores piezoeléctricos, pero con ventajas como el mayor ancho de banda y la independencia del acople. Como se vio en el Capítulo 1 el acople de los sensores piezoeléctricos con el sistema a estudiar es un tema crucial en la EA. Además en determinados procesos no es sencilla la colocación de los sensores, por ejemplo si se quiere monitorear la herramienta en un proceso rotatorio como el fresado o el taladrado. De esa manera el método de sensado interferométrico tendría ventajas importantes frente al piezoeléctrico. Pero la inmensa cantidad de trabajos posteriores en el tema han seguido utilizando exclusivamente el sensado piezoeléctrico, posiblemente por su simplicidad, abundancia y menor costo.

Saini y Park (1996) estudiaron, para el caso de corte ortogonal, la relación entre el valor RMS de la EA, la geometría de la herramienta, el material de la pieza y las energías involucradas en el corte, relacionadas con los parámetros de corte. Ellos calcularon la variación de energía en la zona de deformación primaria a partir de las ecuaciones de Ernst y Merchant (ver Capítulo 2). La variación de energía de la zona de deformación secundaria está dividida entre las dos regiones de contacto entre la herramienta y la viruta que son la zona de adherencia y la zona de deslizamiento. Ellos hicieron una serie de suposiciones para el modelado de la variación de energía. En la zona terciaria propusieron que la determinación es muy compleja, pero con una influencia despreciable en la emisión acústica.

Ravindra y otros (1997) estudian las señales y los parámetros de la EA (definidos para las señales tipo explosión) para el corte de un filo simple con distintos grados de desgaste. En ese trabajo no se discriminan los tipos de señales de EA producidas en el maquinado y se utilizan parámetros auto-regresivos para identificar el estado de la herramienta.

Inasaki (1998) estudia la posibilidad de aplicación de la EA en procesos de torneado, fresado y rectificad. Para esto analiza las formas de onda continuas y tipo explosión, concluyendo que la EA es una técnica de alta sensibilidad para el monitoreo del corte que puede ser fusionada con otro tipo de sensado como por ejemplo la medición de la fuerza de corte.

Everson y Cheraghi (1999) presentan un trabajo donde aplican la EA para determinar el desnivel de los filos de corte en taladrado de precisión, utilizando como parámetro estudiado la energía MARSE de la EA.

Chungchoo y Saini (2000) hacen un extenso trabajo en torneado, en el cual muestran como el RMS de la EA es un mejor indicador de la rotura de la viruta que la medición de la fuerza.

Jemielniak (2000 y 2001) plantea recomendaciones para la aplicación de la EA en monitoreo de la herramienta y el corte en procesos de torneado. Por un lado menciona que la EA depende no solo del desgaste sino también de la geometría de la pieza, de las condiciones de corte y de los materiales de herramienta y pieza. Acerca de las señales a medir plantea que el promedio del RMS y de la tasa de señales tipo burst pueden relacionarse con el desgaste. En el caso de medir RMS, debe tenerse en cuenta la constante de integración También la curtosis y la asimetría estadística (“skew”) de la función distribución beta (cuya descripción hicieron Kannatey Asibu y Dornfeld (1982), y que Jemielniak y Otman (1998) utilizaron) exhiben una buena sensibilidad a la rotura catastrófica de la herramienta y a la formación de viruta. En ese trabajo en un proceso de torneado, el sensor está solidario al inserto, midiéndose la EA para distintos grados de desgaste.

En Li (2002) se propone una acotada revisión de los métodos de análisis de la EA para la detección del desgaste. Respecto del taladrado, en la última década Jantunen (2002) hizo una revisión dedicada a los métodos indirectos de monitoreo de herramientas de corte para el caso del taladrado, haciendo la disquisición sobre las posibilidades de detección de fallas repentinas y de desgaste gradual. Un tema muy importante que cita Jantunen es la aleatoriedad intrínseca del proceso de corte durante el taladrado con mechas convencionales. El desgaste de la herramienta en el taladrado es un proceso progresivo que toma lugar en el margen externo de los bordes inferiores de los helicoides de las estrías producido por contacto íntimo y la alta temperatura de la interfase herramienta-espécimen. Sin embargo en condiciones de corte estacionario la falla de la herramienta es un proceso estocástico. Jantunen propone que las razones para la variada vida de la herramienta son las inhomogeneidades en los materiales de la pieza y de la herramienta, las irregularidades en el movimiento del fluido de corte y de la inevitable asimetría introducida durante el maquinado de los filos de corte. En el maquinado hay muchas perturbaciones y hasta en los métodos de múltiples parámetros un importante desafío es poder separar el ruido de la información a medir.

3.3.2 Fuentes de EA en el proceso de corte de metales

En función de los estudios de la EA producida en los distintos procesos de maquinado que han sido publicados en la literatura sobre el tema [Dornfeld (1991, 1992)] [Saini y Park (1996)] [Li (2002)], se citan las mayores fuentes de EA generadas durante el corte de metales. La distribución de las principales fuentes de EA en tres zonas está basada en el análisis del corte ortogonal hecho por Ernst y Merchant (1941), que puede verse en la Fig. 3.1.

La EA en el corte será producida por:

- Deformación plástica durante el proceso de corte en la pieza.** Esto ocurre en la llamada “zona primaria de deformación plástica” o zona de corte, en la formación de la viruta.
- Deformación plástica en la viruta.** En la “zona secundaria de deformación” (interfase viruta-herramienta) la denominada “sticking zone” o zona de adherencia, en la cual se produce la deformación en volumen de la viruta.
- Fricción de contacto entre la cara de avance de la herramienta y la viruta.** En la “zona secundaria de deformación” a continuación de la zona de adherencia se produce

la “sliding zone” o zona de deslizamiento. La viruta desliza sobre la cara de la herramienta hasta que deja de hacer contacto.

- d. **Fricción de contacto entre la cara del flanco de la herramienta y la nueva superficie maquinada de la pieza**, que resulta en el desgaste del flanco. Esta es la llamada “zona terciaria”.
- e. **Colisiones entre viruta y herramienta.**
- f. **Colisiones entre viruta y pieza.**
- g. **Rotura de la viruta.**
- h. **Rotura del filo de la herramienta.** El filo se va degradando fracturándose en pequeños fragmentos (“chipping”).
- i. **Otras fuentes de fricción de contacto**, por ejemplo en taladrado **entre el cuerpo de la herramienta y la pieza, o entre la herramienta y la viruta.**

En la Fig. 3.1 se observa un esquema del corte ortogonal y las posibles fuentes de EA, listadas previamente, para cada una de las tres zonas del corte. La región roja corresponde a la zona primaria de deformación (plano de corte), la verde a la secundaria (fricción, adherencia y deslizamiento, craterización) y la azul la terciaria (fricción de deslizamiento y desgaste del flanco).

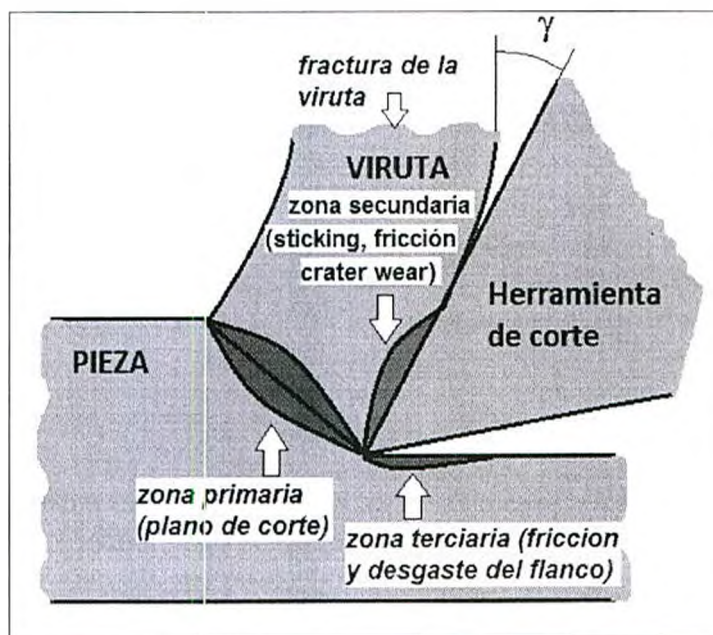


Fig. 3.1. Esquema del corte ortogonal y las posibles fuentes de EA.

En procesos que involucren múltiples filos estas fuentes actuarán de manera conjunta, como por ejemplo en el taladrado con dos filos cortando simultáneamente o en el fresado con más. Siendo el caso más sencillo de analizar el torneado con un solo filo.

En los albores del estudio de la EA en corte de metales se comenzó a observar que las señales obtenidas en el mecanizado eran tanto del tipo continuo como del tipo explosión (“burst”) presentándose en combinaciones de estas, dependiendo de las fuentes actuantes [Dornfeld & Kannatey-Asibu (1982)] [Du (1991)] [Byrne (1995)]. Esto también fue ratificado en trabajos más cercanos al presente como en Li (2002). Moriwaki (1980) propusieron una clasificación respecto de qué tipo de señal de EA se presentaba para cada una de las fuentes descritas en los párrafos anteriores de esta sección, otros trabajos como Dornfeld (1991) reproducen esa descripción. De esta manera, se plantearon como fuentes de señales continuas a la deformación plástica del material cortado y a la fricción entre el material (pieza y viruta) y la herramienta; y como señales tipo explosión a las fracturas de herramienta, material y viruta. Carpenter y otros (1992) priorizan como fuente de EA a la fricción, mientras que Li y Yuan (1998) proponen que la fricción y la deformación plástica tienen importancia comparable en la generación de EA de tipo continuo. Alternativamente Inasaki (1998) propone que de todos los procesos conocidos que

generan EA, los más importantes involucrados en el corte mecánico de metales son la deformación plástica y la fractura.

En el Capítulo 1 de esta tesis se menciona la relación entre la EA y la fricción, la cual dependiendo el tipo de proceso de corte estudiado cobrará mayor o menor protagonismo como fuente de EA.

3.3.2.1 Modelo de la EA en las zonas primaria y secundaria de corte basada en el modelo de Merchant (Kannatey-Asibu y Dornfeld)

Este modelo se presenta como un ejemplo de cálculo aproximado de la EA a partir del modelo de corte de Merchant. Cabe anticipar que si bien este es uno de los más citados en la literatura, ha tenido un éxito bastante limitado en la interpretación de datos experimentales.

De las numerosas fuentes de EA generadas durante el corte, y citadas en el punto anterior, Kannatey-Asibu y Dornfeld condicionaron su modelo a aquellas producidas solo en las zonas primaria y secundaria de corte, del modelo de corte ortogonal de Merchant. Para lograr esa restricción, propusieron por un lado trabajar con herramientas con buen filo y en etapas de corte iniciales, de manera de minimizar la acción de la tercera zona, y por otro controlar la formación de viruta, dirigiéndola fuera de la zona de corte para evitar colisiones y demás efectos no deseados. A partir de este modelo se calculó la variación del trabajo para las zonas primaria y secundaria y se relacionó con el cuadrado del valor RMS de la señal de EA emitida.

Variación del trabajo en la zona primaria

Para tensiones y deformaciones de corte, la variación del trabajo por deformación plástica, está dada por la ecuación:

$$\dot{W} = \tau_k' \dot{\gamma} V \quad (3.1)$$

Donde τ_k' es la tensión de corte promedio, $\dot{\gamma}$ es la tasa de deformación de corte y V es el volumen del material deformado.

Bajo condiciones de corte estacionarias, la tensión de corte promedio (resistencia al corte del material) y la tasa de deformación de corte en la zona de corte pueden asumirse constantes, entonces queda:

$$\dot{W}_s = b_1 t_1 \tau_k \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} U \quad (3.2)$$

Donde α es el ángulo de ataque, ϕ es el ángulo de corte, U la velocidad de corte, b_1 es el ancho del corte y t_1 el ancho de la viruta sin cortar.

Variación del trabajo en la zona secundaria

La viruta se mueve a lo largo de la cara de la herramienta, una porción de esta se deforma (zona de adherencia) y otra porción se desliza (zona de deslizamiento), hasta que se pierde el contacto con la cara de la herramienta. Dado que los mecanismos son distintos, se pueden separar los dos fenómenos para su modelado y luego hacer su superposición.

Variación del trabajo en la zona de deslizamiento

La parte de la cara de la herramienta más lejana al filo está sujeta a una débil fuerza normal por lo que experimenta fricción por deslizamiento.

El coeficiente de fricción μ se supone constante de acuerdo a las leyes de la fricción de Coulomb, y las tensiones friccionales entre la viruta y la cara de la herramienta está dado por:

$$\tau_f = \mu P_N \quad (3.3)$$

Donde P_N es la tensión normal a la cara de la herramienta

En el caso general la distribución de tensiones normales puede ser aproximada por una ley de potencias dada por:

$$P_N = y^a \quad (3.4)$$

donde a es una constante, y la variable y es la distancia desde el punto de contacto al de interés.

Entonces la tensión friccional será:

$$\tau_f = \mu P_N = \mu y^a \quad (3.5)$$

El área de contacto real de un elemento, entre la viruta y la cara de la herramienta, también varía y su valor depende de la carga normal. Esto puede representarse por una ley potencial entre el área de contacto y la tensión normal. El área de contacto se puede expresar como:

$$dA_t = C_2 P_N^b = C_2 y^{ab} \quad (3.6)$$

Con b y C_2 constantes.

Como la tensión normal se incrementa desde cero hasta el punto de contacto, se llega a que la presión es tan grande que causa el contacto completo entre viruta y herramienta. En ese punto se asume que el área real de contacto es igual al área aparente y la tensión friccional es también igual a la resistencia al corte del material.

$$dA_t = C_2 P_N^b \quad (3.7)$$

Luego evaluando C_2 :

$$dA_t = dA \left(\frac{y}{l-l_1} \right)^{ab} = b_1 dy \left(\frac{y}{l-l_1} \right)^{ab} \quad (3.8)$$

En un elemento de la zona de deslizamiento actúa una fuerza diferencial:

$$dF = \tau_f dA_t = \mu y^a b_1 \left(\frac{y}{l-l_1} \right)^{ab} dy = \frac{\mu b_1}{(l-l_1)^{ab}} y^{a(b+1)} dy \quad (3.9)$$

Entonces la fuerza resultante sobre la zona de deslizamiento será:

$$F = \int_0^{l-l_1} dF = \int_0^{l-l_1} \frac{\mu b_1}{(l-l_1)^{ab}} y^{a(b+1)} dy = \frac{\mu b_1}{a(b+1)+1} (l-l_1)^{a+1} \quad (3.10)$$

Asumiendo (por simplicidad) una relación lineal entre P_N e y , y entre dA_t e y , es decir $a=1$ y $b=1$ entonces queda:

$$F = \frac{1}{3} \mu b_1 (l-l_1)^2 \quad (3.11)$$

Si $\tau_k = \mu(l-l_1)$ entonces

$$F = \frac{1}{3} \tau_k b_1 (l-l_1) \quad (3.12)$$

Quedando la variación de la energía en la zona de deslizamiento como:

$$\dot{W}_{c_1} = U_c \cdot F = \frac{1}{3} \tau_k b_1 (l-l_1) U_c \quad (3.13)$$

Variación del trabajo en la zona de adherencia

En la parte más cercana al borde de la herramienta la tensión compresiva es suficientemente alta como para causar un contacto completo entre la viruta y la herramienta, causando la deformación en volumen del material de la viruta. En ese caso tanto el área de contacto como la tensión ejercida pueden considerarse constantes. Entonces la tasa de trabajo será:

$$\dot{W}_{c_2} = \tau_k b_1 l_1 U_c \quad (3.14)$$

Variación de trabajo total en la zona secundaria

$$\dot{W}_c = \dot{W}_{c_1} + \dot{W}_{c_2} = \frac{1}{3} \tau_k b_1 (l - l_1) U_c + \tau_k b_1 l_1 U_c = \frac{1}{3} \tau_k b_1 (l + 2l_1) \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} U \quad (3.15)$$

Variación de trabajo total en ambas zonas

$$\dot{W}_T = \dot{W}_s + \dot{W}_c = b_1 t_1 \tau_k \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} U + \frac{1}{3} \tau_k b_1 (l + 2l_1) \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} U \quad (3.16)$$

En el Cap. 1 se vio que a tasa de energía de la señal de EA emitida será:

$$\frac{dE}{dt} \propto (RMS)^2 \quad (3.17)$$

Relación entre el valor RMS de la señal de EA y los parámetros de corte del modelo de Merchant:

$$RMS^2 = C \left[b_1 \tau_k U \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} t_1 + \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \right) \right] \quad (3.18)$$

Donde luego de una evaluación experimental Kannatey-Asibu y Dornfeld llegaron a la conclusión que:

$$RMS = C \sin \alpha \left[b_1 \tau_k U \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} t_1 + \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \right) \right]^{0.5} \quad (3.19)$$

Entonces el RMS de la EA queda en función de los parámetros del corte ortogonal. Suponiendo velocidad de avance constante, el RMS será función del ángulo de ataque α , de la velocidad de corte U , y del material de la pieza.

Esta ecuación ha sido utilizada en la literatura para relacionar el daño en la herramienta con la variación en el RMS de la EA medida durante el maquinado. Esto puede hacerse teniendo en cuenta la variación de los parámetros relacionados con el estado de la herramienta como por ejemplo la superficie de contacto entre la herramienta y la pieza (craterización de la herramienta). Kannatey-Asibu y Dornfeld realizaron experimentos en los que comprobaron que el RMS se incrementaba al aumentar la velocidad de corte, ocurriendo el mismo comportamiento para un aumento del ángulo de ataque.

En 2000 Chiou y Liang (2000a) adaptaron las ecuaciones de Kannatey y Dornfeld para el caso del análisis del RMS de la EA, para un modelo dinámico de corte (también basado en el de Merchant) en el cual existe una oscilación relativa entre la herramienta y la pieza. Ese nuevo modelo luego fue utilizado para el estudio de las vibraciones de la herramienta con EA [Chiou y Liang (2000b)].

Otros autores como Saini y Park (1996) realizaron un estudio similar al de Dornfeld y lo contrastaron con resultados experimentales llegando a la conclusión que es muy difícil la

obtención de un modelo útil para describir la EA en el proceso de corte, dada su complejidad por la acción de múltiples factores.

3.3.2.2 Fuentes de ruido que afectan las mediciones de EA en maquinado

Una posible clasificación de los tipos de ruido que pueden encontrarse presentes durante las mediciones de la EA generada en el maquinado [Kakino (1984)], propone tres categorías:

- Ruidos Ambientales.
- Ruidos producidos por la máquina.
- Ruidos producidos en la operación del corte.

Entre los primeros podríamos citar los ruidos electromagnéticos de distintas fuentes tales como interruptores eléctricos, motores, soldadoras, máquinas eléctricas en general, tubos fluorescentes, radiotransmisores, etc. También en esa primera categoría se pueden incluir los ruidos mecánicos tales como golpes de materiales cercanos, otras máquinas, etc. La segunda categoría incluye a los ruidos electromagnéticos y principalmente a los mecánicos dados por rodamientos, engranajes, y piezas móviles de la misma máquina que pudieran efectuar golpes o fricción. Para el caso de la EA estos ruidos son más importantes que los primeros, ya que la distancia juega un rol importante en la atenuación de las ondas elásticas cuando se miden frecuencias mayores a los 100 kHz. Respecto de los de la tercera clase se pueden citar los ruidos que indirectamente podrían también reflejar el estado de la herramienta si son analizados, como por ejemplo la fractura de la viruta, la fricción entre superficies o la deformación plástica.

3.3.3 Ventajas y desventajas del uso de la EA en el monitoreo del desgaste de herramientas

Ventajas de la EA

Entre las ventajas de la EA frente a otros métodos en el monitoreo del desgaste de herramientas se puede mencionar que:

- Las señales medidas son generadas durante el corte y en la zona del corte, conteniendo información dinámica del mismo, y no son señales introducidas externamente.
- El rango de frecuencia en el cual se mide la EA está localizado más allá de los ruidos típicos de un entorno industrial [Li (2002)], que se pueden ubicar en el rango del audible y de las vibraciones mecánicas. Esto provee a la EA una alta relación señal ruido frente a otros métodos de detección como el de vibraciones (que se registran a frecuencias menores) [Holroyd (1998)] La ventaja de la detección a mayores frecuencias reside en el hecho que los efectos del ruido ambiental mecánico que se propaga por el aire se minimiza mientras que la sensibilidad a los mecanismos de pérdida de energía como la fricción o los impactos se conservan [Mathews y Shunmugam (1999)]. Por otra parte, en general las señales de EA relativas al corte contienen frecuencias mayores de 50 kHz mientras que las frecuencias naturales del sistema están por debajo de los 10 kHz [Guo y Friedrich (1994)]
- El sensado a partir de transductores que se pueden colocar en la pieza o en la herramienta, en general no afectan al proceso de corte. [Dornfeld (1992)]

Dificultades de método

Durante los años que han transcurrido desde que se utiliza la EA en caracterización del desgaste de herramientas de corte en metales, varios autores han hecho hincapié en algunas dificultades de la aplicación de este método. En 1988, en la primera década de investigación en este tema, Roget y otros (1988) planteaban estas dificultades dada la gran cantidad de factores involucrados en el proceso. Ellos expresaban que su aplicación industrial era posible pero bajo condiciones específicas y limitadas y además mostraron que la detección de rotura ya podía ser aplicable a usos industriales. Como se ha mencionado para otros métodos previamente citados, en los últimos años el avance de las herramientas matemáticas de procesamiento de señales ha

permitido avances importantes, pero aun limitados, de la interpretación de información a partir de sistemas inteligentes multi-paramétricos que puedan inferir las respuestas buscadas [Teti y otros (2010)].

3.3.4 Instrumentación de la EA en el maquinado

Un punto importante de la aplicación de la EA a los procesos de maquinado es la forma de tomar las señales. Típicamente, los sensores más utilizados son los piezoeléctricos, que se colocarán en distintos lugares en la conjunción herramienta-pieza dependiendo del tipo de proceso que se esté analizando. Esto condicionará el grado de dificultad del sitio donde se coloque el sensor. En general en los trabajos con herramientas fijas los sensores se colocan sobre la herramienta o sobre el soporte de la misma. Esto es así por ejemplo en la mayoría de los ensayos de torneado [Li (2002)]. Distinto es cuando se utilizan herramientas rotantes como en el taladrado o en el fresado, donde la situación para medir la EA directamente en la herramienta es más compleja, y en general se colocan los sensores en la pieza a maquinar [Velayudham y otros (2005)]. Una alternativa posible es la detección de las ondas elásticas a partir de colocar los sensores acoplados acústicamente a regiones de la herramienta cercanas a su punta, a través del fluido lubricante que hace de guía de onda para la EA [Takeshita e Inasaki (1991)] [Li y otros (1997)] [Kopac y Sali (2006)]. Li y Yuan (1998) proponen que la transmisión de la EA a través de un medio líquido es uno de los métodos más efectivos para la detección de las señales en la herramienta rotante a partir de sensores piezoeléctricos. Ellos estudian varios fluidos y encuentran los mejores resultados para magneto-fluidos con un campo magnético aplicado.

Otro tipo de sensores, que se pueden utilizar para ambos tipos de máquinas herramientas, son aquellos interferométricos ópticos. Esta forma de sensado podría aplicarse a la detección de la EA en herramientas rotantes, por ejemplo a partir de la utilización de un interferómetro de fibra óptica en un esquema similar al propuesto por Mc Bride y otros (1993) y por Carolan y otros (1996), aunque ellos en ese trabajo lo aplicaron a detectar la EA en la pieza y no en la herramienta. Este método interferométrico tiene sus principales bondades en prescindir del contacto físico con el componente a medir, y en el gran ancho de banda de la señal detectada con una respuesta en frecuencia plana.

Para el caso de los sensores piezoeléctricos, que como se ha visto en el capítulo 1 tienen gran sensibilidad, Jemielniak (2000 y 2001) en un trabajo que trata del monitoreo de señales provenientes de herramientas de corte propuso que debe tenerse en cuenta la relación entre las características de la señal, el sensor y el preamplificador de EA, ya que las señales pueden ser muy fuertes y saturar. Por lo tanto propone utilizar baja amplificación de las señales de EA.

3.3.5 Otras aplicaciones del estudio de la EA durante el maquinado

Además de dar información sobre el estado de la herramienta, las señales de EA se pueden utilizar para detectar otras deficiencias del proceso de maquinado. Inasaki (1998) propone un “estado deseable de corte” en el cual la viruta se deberá romper tal que tenga una longitud dentro de un rango estipulado, las vibraciones de la herramienta (chatter) sean despreciables y no se forme filo recrecido (“Built Up Edge” (BUE)). Teti (2010) suma una condición más que es la buena terminación superficial del corte. Estas condiciones también pueden monitorearse a partir de la medición de las señales de EA. Entre las aplicaciones más difundidas en la literatura se pueden mencionar la caracterización de la viruta, el estado de la calidad de la superficie maquinada, el estado del proceso de corte y las vibraciones de la herramienta durante el corte (chatter).

3.3.5.1 Caracterización de la viruta con EA.

Según Diei y Dornfeld (1987a) la formación de viruta tiene una estrecha relación con la EA, dado que la deformación plástica y la rotura de esta son fuentes de EA, tipo continua y tipo explosión respectivamente.

En la literatura hay trabajos como el de Sukvittayawong e Inasaki (1991) en el cual se pudo identificar, con una alta tasa de éxito (90% de efectividad), la forma de la viruta a partir del análisis de las señales de EA producidas en el corte, para un proceso de torneado de piezas de acero.

Inasaki (1998) estudió la identificación del tipo de viruta, para un proceso de torneado. En ese trabajo se pudieron clasificar, mediante el análisis de las señales de EA, fragmentos largos y cortos de viruta, en tipologías denominadas viruta continua y discontinua. De esa manera se pueden estudiar parámetros de la EA que permitan distinguir un proceso de emisión tipo explosión que es mayoritario en el caso de viruta discontinua, cuantificando la cantidad de explosiones. Entonces podrá inferirse el grado de rotura de la viruta.

Para la identificación de la viruta se han estudiado la desviación estándar, el asimetría (skew) y la curtosis de ciertos parámetros de la EA como la amplitud, el RMS y el número de cuentas entre otros. Govekar y otros (2000) utilizaron un sensor de banda ancha para medir las señales de EA y analizar con estas la forma de la viruta, para un proceso de torneado, clasificándola en tres clases utilizando métodos estadísticos.

Barry y otros (2001) observaron la formación de viruta tipo diente de sierra y tipo continua en aleaciones de Ti relacionando ese proceso con la EA. En ese trabajo se hace referencia que para el caso del maquinado de acero endurecido se produce una alta energía, reflejada en el valor RMS de la señal de EA para el primero de los casos, como consecuencia de la rápida liberación de energía por la rotura catastrófica por clivaje en la zona primaria de corte. Esa EA es dos órdenes mayor que para el caso de la viruta continua relacionada con la fractura dúctil. A mayor dureza, para una dada velocidad de corte, se observó un valor RMS de la EA mayor. En la aleación de Ti aparece un efecto de soldadura de la viruta a la herramienta, que se fractura durante el corte, produciendo un incremento en la EA al aumentar la velocidad de corte.

3.3.5.2 Caracterización de la calidad superficial por EA.

En 1991 Dalpiaz propone el uso de la EA para el monitoreo del deterioro de la calidad de la terminación superficial en el torneado, concluyendo que el valor RMS de la señal de EA puede ser un buen parámetro para medir el deterioro de una superficie torneada, aunque tal vez algún parámetro que indique cambios más rápidamente sería más aconsejable.

Diniz y otros (1991) buscaron establecer la relación entre EA y la rugosidad de la superficie de la pieza en maquinado de terminación con el fin de buscar cuando realizar el reemplazo de la herramienta. La geometría de la herramienta causa un cambio en la rugosidad cuando se va desgastando. Hay trabajos que estudian la rugosidad en función del desgaste del flanco, pero esa dependencia no está totalmente determinada. La dispersión del RMS de la EA es útil para monitorear el crecimiento de la rugosidad, independientemente de la velocidad de corte.

En el maquinado de terminación de superficies las fuentes de EA son las mismas que en el de corte, más la rotura del filo recortado (BUE) el cual da señales tipo burst. Beggan, y otros (1999) definen un valor RMS de la EA en el que toman el 20% menor de la señal al que denominan AE_{RMS20} , el cual es menos influenciado por la rotura de la viruta o los golpes de la viruta y tiene más en cuenta la emisión continua. Ese parámetro es más representativo de la realidad del corte como por ejemplo la disminución del AE_{RMS20} al incrementar la fuerza de avance, mientras que el AE_{RMS} convencional sube. Las variaciones en ese parámetro medido pueden correlacionarse con las variaciones en la rugosidad a través de una correlación positiva entre ambas. Tönshoff y otros en 2000, analizan la relación entre la EA y la superficie en procesos de rectificado y torneado de piezas de gran dureza. Luego Axinte y otros (2004) analizan en un proceso de brochado la correlación entre la calidad de la superficie maquinada y los resultados obtenidos de las señales de EA. En este trabajo se muestra que la EA es buena para la detección de anomalías durante el corte. Guo y Ammula (2005) muestran la sensibilidad de los parámetros de la señal de AE de banda ancha respecto del daño de la superficie y el correspondiente desgaste de la herramienta y la terminación de la superficie. La EA es usada para monitorear factores de integridad superficial. El RMS es sensible a la rugosidad mientras que la amplitud y el número

de cuentas no lo son. Marinescu y Axinte (2008 y 2009) estudian espectros tiempo-frecuencia de la EA medida en procesos de fresado para identificar fallas en la superficie de las piezas maquinadas. Encuentran que con la medición de la fuerza no se detectan las anomalías superficiales de la pieza, mientras que si se pueden hallar a través de graficar en un sistema de tres ejes la fuerza, el valor MARSE de la EA y la longitud del corte.

3.3.5.3 Monitoreo del estado del proceso de corte con EA

Como ejemplo del monitoreo de procesos de corte se puede mencionar el caso del maquinado de precisión y de alta velocidad, en la cual es necesaria alguna técnica que informe el estado del corte a tiempo real para su control. Kang y otros (2001) estudiaron un sistema multisensor en el cual se incluyó la EA para controlar el corte. A partir de la señal de EA se buscó poder detectar por ejemplo que etapa del corte estaba ocurriendo, o más generalmente si existía algún tipo de alteración durante el proceso. O'Donnell y otros (2001) hicieron una comparación entre señales de EA, vibración y potencia eléctrica durante una operación de taladrado, y describieron las distintas fuentes que influyen a procesos y sistemas. Similar comparación entre la amplitud de la EA y la fuerza en dos componentes muestran Marinescu y Axinte (2008) en procesos de fresado donde se observa en los gráficos la sincronización y correlación de la información obtenida por dos caminos alternativos.

3.3.5.4 Detección y análisis de vibraciones de la herramienta durante el corte (chatter). Análisis de las vibraciones de la herramienta ("chatter")

Otro factor que influye en la calidad del proceso de maquinado son las vibraciones ("chatter"), principalmente en la terminación superficial. La EA permite su estudio con el fin de detectarlo para poder controlarlo, minimizarlo o eliminarlo.

En el trabajo previamente citado de Inasaki (1998) se introduce la idea de la detección de las vibraciones ("chatter") mediante la medición de la EA producida en el corte, utilizándose redes neuronales para su automatización. Chiou y Liang (2000b) analizaron el efecto de las vibraciones en el torneado por medio de un modelo dinámico del RMS de la EA generada durante el corte, de manera de relacionar ambas para el caso del desgaste del flanco de la herramienta. Este efecto es expresado en función de los parámetros de corte y de las geometrías de la pieza y la herramienta. A partir del principio de disipación de energía se estudia la EA generada por fricción sobre el flanco durante la vibración ("chatter"). Este modelo explica el "chatter" a frecuencias próximas a la de la vibración de la herramienta.

Kwak y Song (2001) hacen el diagnóstico de problemas durante el rectificado mediante el estudio de la EA generada en ese proceso. De esa manera detectan cuando se producen distintos problemas que pueden causar una mala terminación de la pieza como lo es la vibración de la herramienta ("chatter").

Gradisek y otros (2003) miden las vibraciones de la herramienta (chatter) en procesos de rectificado a partir del cálculo de la entropía del espectro de potencia del parámetro RMS de las señales de EA obteniendo buenos resultados.

3.4 Métodos de análisis de señales utilizados para el monitoreo de herramientas con emisión acústica

Como se ha mencionado en el Capítulo 1, las señales de EA medidas por los equipos convencionales pueden presentarse como parámetros característicos, formas de onda o la señal completa. En la literatura de la EA aplicada a las herramientas de corte, las dos primeras representaciones son las más comunes. Luego se pueden dividir las formas de analizar las señales de EA de distintas maneras en función: del tiempo, de la frecuencia (Fourier), del tiempo y la frecuencia (onditas), también desde el punto de vista estadístico, como procesos dinámicos o complejos, o con otras formas de análisis más elaboradas. Siempre con el objetivo de conservar la mayor parte de la información relevante para el estudio del proceso. Una vez obtenidos distintos parámetros se seleccionaran los más convenientes. Posteriormente con los parámetros elegidos, en una aplicación concreta, se podrán tomar decisiones respecto de la ejecución del maquinado a partir de aplicar paradigmas y sistemas de soporte de decisión tales como redes neuronales, lógica difusa, algoritmos genéticos o sistemas híbridos. A continuación se describirán brevemente algunos de los métodos más citados en la literatura.

3.4.1 Caracterización de las señales en el dominio temporal

3.4.1.1 Parámetros generales de las señales y parámetros de la EA

Las señales temporales se pueden parametrizar en el dominio del tiempo a partir de características de propósitos generales como son:

- La *magnitud*, como la media aritmética, el valor medio la máxima amplitud, etc. [Roget y otros (1988)] [Baranov (2005)].
- Los valores efectivos como el RMS [Heiple y otros(1992)] [Dornfeld (1992)].
- La potencia de la señal.
- El factor de cresta.
- Incrementos de la señal
- Etc.

En particular las señales de EA se parametrizan en el tiempo según las características primarias específicas indicadas en el Capítulo 1. Estas son:

- Amplitud máxima.
- Tiempo de subida.
- Duración.
- Energía MARSE.
- Número de cuentas (cruces por el umbral).

[Mathews y Shunmugam (1999)] [Diei y Dornfeld (1987, 1988)]

O las secundarias como:

- Frecuencia media.
- Potencia media. [Gómez y otros (2007, 2010)]
- Relación RA (rise time /amplitud) [Takuma y otros (2006)]
- Etc.

3.4.2 Caracterización en el dominio de las frecuencias

Como ya se ha expresado el análisis espectral fue una de las primeras herramientas matemáticas que se aplicó a las señales de EA para determinar el desgaste de las herramientas. En el trabajo

de Iwata y Moriwaki (1977) se utiliza este método para ver como varía la distribución de la energía en función de la frecuencia, de manera discreta, aplicando un algoritmo denominado FFT o transformada rápida de Fourier (“Fast Fourier Transform”) [Cooley y Tukey (1965)] [National (1980)]. De esta manera se representa una secuencia temporal discreta en una representación en frecuencia discreta. Los posibles estudios que se encuentran mencionados en la literatura basados en la aplicación de la FFT a las señales medidas estudian:

- Amplitud de los picos dominantes en el espectro. [Jemielniak (2001)] [Kwak y Song (2001)].
- Potencia espectral en rangos de frecuencia específicos. [Du y otros (1991)].
- Características estadísticas de los espectros de potencia. [Houshmand y otros (1995)] [Susic y Grabec (2000)].
- Frecuencia del pico más alto del espectro. [Haber y otros (2004)].

3.4.3 Caracterización en el espectro tiempo-frecuencia de las señales de EA Wavelets

Las herramientas más utilizadas para la caracterización de las señales de EA en el espectro tiempo-frecuencia son:

- Transformada de Fourier de tiempo corto (STFT)
- Transformada ondita (TO) (“Wavelet transform”)
- Transformada de Hilbert-Huang

3.4.3.1 Transformada de Fourier de tiempo corto (“Short Time Fourier Transform” (STFT))

La STFT o “transformada de Gabor” fue la primera técnica tiempo frecuencia utilizada para el análisis de señales de EA en maquinado. Utiliza una ventana que se va deslizando a lo largo del eje del tiempo para caracterizar los cambios en el espectro de frecuencia para distintos intervalos de tiempo. Los coeficientes espectrales se calculan para los datos incluidos en la ventana móvil para cada posición de esta. Si el tamaño de la ventana es de tiempo T el ancho de banda de cada coeficiente espectral será del orden de $1/T$.

$$STFT(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot g(t - \tau) e^{-i\omega t} dt \quad (3.20)$$

τ es el parámetro que indica el desplazamiento temporal de la ventana y $g(t - \tau)$ es la función ventana.

Un ejemplo de aplicación son los trabajos de Marinescu y Axinte (2008 y 2009) que estudiaron la aplicación de la EA para detectar fallas en operaciones de fresado aplicando STFT para determinar cuando la herramienta hacía contacto con la pieza. Estas transformadas no son buenas para patrones con diferentes escalas.

3.4.3.2 Transformada Onditas (TO) (“Wavelet Transform” (WT))

Las características de la multi-resolución que poseen las onditas (wavelets) la vuelven una herramienta muy competitiva al momento del análisis de señales no estacionarias, como lo suelen ser gran parte de las señales generadas en el corte. Las onditas permiten hacer una localización temporal de las frecuencias involucradas en los mecanismos de emisión, propagación y detección. Las onditas se basan en la descomposición de las señales a través de las transformadas continua y discreta. La descomposición de la señal a estudiar por medio de las onditas se efectúa

La transformada onditas es una transformación tiempo escala o tiempo frecuencia de señales continuas o discretas y es más general que la transformada de Gabor. Esta permite el análisis multi-resolución de la señal del dominio tiempo escala mostrando buena resolución en el tiempo para altas frecuencias y buena resolución en frecuencia para bajas frecuencias.

La función ondita normalizada se define como:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.21)$$

Adonde Ψ es la función ondita madre y a y b son los parámetros de dilatación y posición respectivamente.

La transformada ondita de una señal continua $f(t)$ se define como:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3.22)$$

Donde $\psi_{a,b}^*(t)$ es el complejo conjugado de la función $\psi_{a,b}(t)$

Una discretización de las integrales de transformación pueden realizarse para resolver la transformada ondita continua de una señal discretizada $f(t)$, remplazando la integral continua por una suma discreta en el tiempo, con la evolución discreta de los parámetros a y b , adonde $t = n_t \Delta t$ y $b = n_b \Delta t$

$$WT(a, n_b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{n_t=0}^{N-1} f(n_t \Delta t) \Psi_{a,b}^* \left(\frac{(n_t - n_b) \Delta t}{a} \right) \quad (3.23)$$

Con $n_b = 0 \dots N-1$

Otra forma de mostrar la transformada wavelet es por medio de la convolución en el tiempo entre la señal medida y la wavelet madre.

$$WT(a,b) = f(t) \otimes \Psi_{a,b}^*(t) \quad (3.24)$$

Usando el teorema de convolución en el tiempo de la señal medida y de la wavelet madre, la transformada wavelet puede ser expresada como:

$$WT(a) = IFFT \left(\frac{1}{\sqrt{a}} FFT(f(n, \Delta t)) FFT(\Psi(n, \Delta t, a)) \right) \quad (3.25)$$

El beneficio de la última expresión es la velocidad computacional de resolución usando la transformada rápida de Fourier (FFT) y la transformada inversa (IFFT). El objetivo de esas ecuaciones es encontrar los coeficientes onditas (o amplitudes) como una función del tiempo y la escala (la cual está relacionada a la frecuencia). El espectro de potencia de las onditas está definido como el valor absoluto al cuadrado de los coeficientes onditas.

Existen algunos requisitos para considerar una función como ondita. Esta debe tener energía finita, valor medio cero, y para onditas complejas la transformada de Fourier debe ser real y debe hacerse cero para frecuencias negativas.

Debabrata (1994) fue uno de los primeros en aplicar la transformada ondita continua para la detección de cambios en procesos. Posteriormente este análisis tiempo-frecuencia (o más correctamente tiempo-escala), así como el filtrado de ruido, el análisis de singularidades y la estimación de la densidad espectral forman parte de los beneficios de la aplicación de las wavelets al monitoreo del estado de las herramientas de corte [Zhu y otros (2009)].

Las transformadas discretas con onditas también han sido aplicadas a las señales de EA con un costo de cálculo menor que las continuas, tal como es el caso de los paquetes de onditas ("wavelet packets") [Maradei y otros (2002, 2003)] [Li y otros (1999)].

Sick (2002) plantea sobre uso de las onditas que si bien su éxito en la extracción de parámetros ha sido demostrado en muchas publicaciones, no se ha observado una amplia superioridad frente a otros métodos y deja los siguientes interrogantes: ¿Por qué para el monitoreo del desgaste de la herramienta es importante una buena localización de las características de la señal en el dominio

del tiempo?, o ¿por qué lo es para la detección de colisiones o fracturas la localización en frecuencia? Propone que otros métodos deberían ser investigados.

La transformada ondita puede ser útil para el filtrado que permita la separación de señales de EA tipo continuas de aquellas de tipo explosión. Niu y otros (1998) se refieren a estas señales provenientes del proceso de corte, como periódicas y no periódicas (que en este trabajo se denominaran cuasi estacionarias y no estacionarias). Las primeras están asociadas a la deformación plástica y la fricción, las otras debidas a golpes y fracturas.

3.4.3.3 Transformada de Hilbert Huang

La transformada de Hilbert-Huang (HHT) es un nuevo método de análisis en tiempo-frecuencia que ha sido desarrollado de manera empírica y se basa en la aplicación un algoritmo aplicado a un conjunto de datos. Este método ha sido especialmente diseñado para señales no lineales y no estacionarias. Este método se desarrolla en dos etapas. Por un lado el método de descomposición empírica (EMD) que descompone la señal en un conjunto de señales con un componente que se denomina funciones de modo intrínseco (IMF). Por el otro lado de la aplicación de la transformada HH las IMF. Aún no se encuentra trabajos que estudien la emisión acústica y generada de herramientas a partir de este método de descomposición. Si hay trabajos que analizan otros métodos indirectos [Peng (2006)] [Bassiuny y Li (2007)]

3.4.4 Caracterización de las señales en el dominio estadístico.

En la aplicación de un método estadístico, se supone que las señales del sensor en el dominio del tiempo o frecuencia tienen una distribución probabilística. De tal manera, se podrá extraer información útil para el monitoreo de la herramienta estudiando la estadística de la distribución. Entonces, la señal es considerada como una salida de un proceso estocástico.

En general estas señales son no estacionarias, pero se las puede considerar estacionarias en cortos períodos de tiempo en los cuales se calculan los parámetros, según Jenkins y Watts (1968). Sobre las características estadísticas influirán los cambios producidos por el desgaste y por las condiciones de corte que también pueden variar. Entre las características estadísticas se pueden mencionar:

- Características que denotan la distribución de probabilidad del proceso aleatorio subyacente como la media, la variancia, la desviación estándar, la Curtosis (momento estadístico de cuarto orden, o cuan picuda es la señal), el factor de asimetría ("skewness") de la distribución de las amplitudes en el tiempo, y otros [Kannatey-Asibu y Dornfeld (1982)] [Inasaki (1998)]. Otros modelos más complejos de modelado de la distribución acumulativa como la estadística de KS también han sido utilizados [Hall y otros (2001)].
- Los coeficientes de una serie temporal o espectral que pueden usarse para describir la señal medida. Los modelos más frecuentes son: análisis auto regresivo (AR), media móvil (MM) (o "Moving Average" (MA)) y media móvil auto regresiva (ARMA). [Houshmand y otros (1995)]
- Tasas de cruces de umbrales, valores medios de tasas de cruces, etc. [Diniz y otros (1992)] [Kwak y Song (2001)]
- Otros parámetros estadísticos como por ejemplo correlación cruzada, coherencia entre dos funciones, etc. [Kwak y Song (2001)] [Susic y Grabec (2000)]

Una posible ventaja de este tipo de métodos sería la economía de cálculo para obtener parámetros que representen una información equivalente al espectro. El uso de estos parámetros estadísticos para la determinación del desgaste de las herramientas de corte está limitado por la complejidad del proceso.

Análisis de los parámetros de EA como series temporales

El proceso de corte puede considerarse un sistema no lineal dinámico caótico [Grabec (1980)] y esto puede extenderse a las señales de EA producidas por ese proceso. En Takuma y otros (2006) se estudia el caos en series temporales. Similar tratamiento se aplica previamente en Govekar y otros (2000). Cambios menores en las condiciones iniciales del corte pueden producir efectos muy diversos, algunos de mayor magnitud perjudiciales por ejemplo para la herramienta. Bukkapatnam y otros (1999) determinaron invariantes del proceso de corte por medio del análisis fractal de las señales de emisión acústica. Las dimensiones fractales cuantifican la auto similaridad o invariancia de escala en el espacio de los estados de un sistema dinámico, tal como un proceso de maquinado.

De esta forma se puede capturar, con efectividad, la variación producida por el desgaste del flanco en la dinámica del maquinado, y de esa manera podrían ser usadas como parámetros que sean útiles para la estimación por medio de redes neuronales. A partir del análisis de series temporales, Bukkapatnam y otros examinaron las señales de EA asociadas con el desgaste del flanco y encontraron que emergen de un atractor de baja dimensión de un proceso caótico. Ellos produjeron un conjunto compacto de características de las señales que les permitieron generar una red neuronal para la estimación del desgaste [Ono (2005)].

Análisis multi-paramétricos con herramientas estadísticas

Grabec et al (1998) plantea que la complejidad de los procesos estocásticos involucrados en el corte impiden determinar de manera analítica una relación entre las características de las señales de EA y las propiedades del proceso, por lo cual pueden implementarse modelos empíricos para estudiar estas situaciones.

Para ello Grabec plantea un modelo no paramétrico de las leyes físicas, a partir de una red de sensores que proveen datos de las variables medidas, repitiendo la operación N veces y haciendo un estudio probabilístico, estimando una función densidad de probabilidad.

3.4.5 Métodos de soporte de toma de decisión

Una vez extraídos los parámetros que permiten el monitoreo del estado de la herramienta y el corte, a partir de las señales, el objetivo siguiente es utilizarlos para tomar la decisión clave sobre este proceso: seguir el corte sin modificaciones, interrumpirlo o cambiar las condiciones. Para esto en los últimos veinte años se han incrementado en la literatura la utilización de variados paradigmas y métodos de toma de decisión como lo son por ejemplo las redes neuronales, la lógica difusa, los algoritmos genéticos o los sistemas híbridos. Estos soportes de decisión se aplican a la EA pero también involucran otra información proveniente de los otros métodos de medición indirecta que se han expuesto previamente. El presente trabajo de tesis finaliza en una instancia previa a este tipo de aplicaciones las cuales se mencionaran dentro de los posibles pasos a seguir. A continuación se mencionan brevemente como referencia al tema algunos estudios y aplicaciones encontradas en la literatura.

3.4.5.1 Redes neuronales

Revisiones de los últimos años exponen, para los distintos métodos indirectos de monitoreo del estado de las herramientas, soluciones basadas en la aplicación de redes neuronales. Entre estas se encuentran el extenso trabajo de Sick (2002) que involucra todos los métodos indirectos aplicados al torneado, el de Jantunen (2002) que describe lo mismo para el taladrado, o el de Teti (2010) que es más general que los anteriores. Hay otros trabajos más específicos como el de Li (2002) que apunta directamente a la EA en torneado. En estos extractos se citan principalmente aquellos trabajos publicados en las últimas dos décadas. Los resultados mostrados para la EA pueden ser extrapolados a otros métodos indirectos y viceversa. Una de las conclusiones que se puede inferir es respecto a que cuanto más parámetros se monitorean, más el análisis podrá independizarse del tipo de proceso que se está estudiando.

En la literatura citada se presentan trabajos que utilizan modelos de redes neuronales, basadas en paradigmas de aprendizaje supervisado como: “Perceptron”, “Feed Forward (FFN)”, “Back Propagation (BP)”, “Wavelet Neural Network (WNN)”, etc., o no supervisado como “Adaptive Resonance Neural network (ART)”, “Kohonen Feature Map (KFM)”, etc. En general estos mecanismos se aplican sobre parámetros como el RMS o los coeficientes de ondas de la descomposición espectral de la señal de EA y de las demás señales de los demás métodos indirectos involucrados.

Como ejemplo se puede mencionar el trabajo de Choi y otros (1991) en el que se plantea un modelo de series temporales auto regresivo multicanal, el cual se aplicó a la fuerza de corte y la EA en un proceso de torneado donde se estudian herramientas en buen estado y gastadas. Existen otros modelos como los híbridos difusos donde se usan redes neuronales difusas como en el trabajo de Yao y otros (1999) donde se analizan la corriente del motor de la máquina y la EA y se obtienen buenos resultados con el modelo propuesto.

3.4.5.2 Reconocimiento de patrones

Emel y Kannatey-Asibu (1988) están entre los pioneros de la aplicación del reconocimiento de patrones para el monitoreo del desgaste de herramientas de corte. Ellos comenzaron con un trabajo en el que se analizaron las señales de EA generadas durante el maquinado en torno, aplicando una técnica de reconocimiento con una función discriminante lineal [Kannatey-Asibu y Emel (1987)]. Damodarasamy y Raman (1993) plantearon un método simple para verificar la aplicabilidad de principios del reconocimiento de patrones a la identificación del desgaste de herramientas. Midió fuerzas y EA en torneado. Usando estas técnicas pudieron obtener buenos resultados de señales obtenidas con métodos no muy sofisticados ni precisos. Houshmand y otros (1995), utilizando las mediciones de EA de Emel y Kannatey-Asibu (1988) desarrollaron un sistema dinámico para estudiar la estadística de los espectros de potencia de señales de EA cuasi estacionarias, con el fin de diferenciar señales de herramientas aceptables y no aceptables. El modelo dinámico de Houshmand propone un mejor enfoque que el de Emel respecto de la validez de la aplicación de las herramientas estadísticas utilizadas. En ese trabajo se discute el significado estadístico de la potencia espectral en señales cuasi estacionarias. La función auto correlación con la que se calcula la densidad espectral está definida para series estacionarias por lo que para series no estacionarias no tiene sentido estadístico. En Susic y Grabec (2000) se realiza un estudio similar al de Houshmand. Otros trabajos como los de Li y Yuan (1997) o el de Zhu y otros (2009) plantean la utilización de wavelets para corregir el problema de la no-estacionariedad, adonde en uno se aplican redes neuronales difusas y en el otro se estima la densidad de probabilidad para clasificar el desgaste de herramientas.

3.5 Bibliografía del Capítulo 3

- Abu-Mahfouz I., "Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 707-720 (2003)
- Abu-Zahra N.H and T.H. Nayfeh, "Calibrated method for ultrasonic on-line monitoring of gradual wear during turning operations", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 37, 1475-1484 (1997)
- Abu-Zahra N.H. and G. Yu, "Gradual wear monitoring of turning inserts using wavelet analysis of ultrasound waves", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 337-343 (2003)
- Al-Hamdan A., "Effect of misalignment on the cutting force signature in drilling", *Journal of Materials Processing Technology*, 124, 83-91 (2002)
- Aliustaoglu C., H.M. Ertunc and H. Ocak, "Tool wear condition monitoring using a sensor fusion model based on fuzzy inference system", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23, 539-546 (2009)
- Al-Sulaiman F., M. Baseer and A.K. Sheikh, "Use of electrical power for online monitoring of tool condition", *Journal of Materials Processing Technology*, 166, 364-371 (2005)
- Axinte D.A., N. Gindy, K. Fox and I. Unanue, "Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 1091-1108 (2004)
- Baranov V., E. Kudryavtsev, G. Sarychev and V. Schavelin "Acoustic emission in friction", *Tribology and interface engineering series*, B.J. Briscoe (Ed.), Springer (2007)
- Barry J., G. Byrne and D. Lennon, "Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, 1055-1070 (2001)
- Bassiuny A.M. and X. Li, "Flute breakage detection during end milling using Hilbert-Huang transform and smoothed nonlinear energy operator", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 1011-1020 (2007)
- Beggan C., M. Woulfe, P. Young and G. Byrne, "Using Acoustic Emission to Predict Surface Quality", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 15, 737-742 (1999)
- Bhattacharyya P., D. Sengupta and S. Mukhopadhyay, "Cutting force-based real-time estimation of tool wear in face milling using a combination of signal processing techniques", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, 2665-2683 (2007)
- Boothroyd G., "Photographic Technique for the Determination of Metal Cutting Temperatures," *Br. J. Appl. Phys.*, 12, 238-242 (1961)
- Bukkapatnam S. T., S. Kumara and A. Lakhtakia, "Analysis of acoustic emission signals in machining", *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 121, 568-576 (1999)
- Bukkapatnam S. T., S. Kumara and A. Lakhtakia, "Fractal estimation of flank wear in turning", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Transactions of the ASME*, 122, 89-94 (2000)
- Byrne G., D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Kettler, W. Koenig and R. Teti, "Tool Condition Monitoring (TCM)", *Annals of CIRP*, 44, 541-567 (1995)
- Cakir C.M. and Y. Isik, "Detecting tool breakage in turning AISI 1050 steel using coated and uncoated cutting tools", *Journal of Materials Processing Technology*, 159 191-198 (2005)
- Carolan T. A., D. Hand, J. Barton, J. Jones, P. Wilkinson, and R. Reuben, "Assessment of Tool Wear in Milling Using Acoustic Emission Detected by a Fiber-Optic Interferometer", *J. Manuf. Sci. Eng.*, 118, 428-433 (1996)
- Carpenter S. H., C.R. Heiple, D.L. Armentrout, F.M. Kustas and J.S. Schwartzberg, "Acoustic Emission Produced by Sliding Friction and Its Relationship to AE from Machining", *Journal of Acoustic Emission*, 10, 97-101 (1992)

- Casey M. and J. Wilks, "Some experiments to study turning tools using the scanning electron microscope", *Int. J. Mach. Tool Des.*, 16, 13-22 (1976)
- Castejon M., E. Alegre, J. Barreiro and L.K. Hernandez, "On-line tool wear monitoring using geometric descriptors from digital images", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 1847-1853 (2007)
- Chen Y.C. and Y.S. Liao, "Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 269-273 (2003)
- Chiou R.Y. and S.Y. Liang, "Dynamic modeling of cutting acoustic emission via piezoelectric actuator wave control", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 641-659 (2000a)
- Chiou R.Y. and S.Y. Liang, "Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 927-941 (2000b)
- Choi Z., H. Wang and D. Dornfeld, "Detection of Tool Wear Using Neural Networks", 4th World Meeting on Acoustic Emission, ASNT, Boston, 342-349 (1991)
- Chung J.B. and E. Kannatey-Asibu, "Analysis of Acoustic Emission form Metal Cutting", 4th World Meeting on Acoustic Emission and 1st International Conference on AE in Manufacturing, ASNT, Boston, 261-268 (1991)
- Chungchoo C. and D. Saini, "The total energy and the total entropy of force signals -- new parameters for monitoring oblique turning operations", *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40, 1879-1897 (2000)
- Constantinides N., and S. Bennet, "An investigation of methods for the on line estimation of tool wear", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 27, 225-237 (1987)
- Cook N.H., "Tool wear sensors", *Wear*, 62, 49-57 (1980).
- Cooley J.W. and J.W. Tukey "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", *Math. Comp.*, 19, 297-301 (1965)
- Dalpiatz G., "Monitoring workpiece quality deterioration in turning by AE analysis", 4th World Meeting on Acoustic Emission, ASNT, Boston, 479-486 (1991)
- Damodarasamy S. and S. Raman, "An inexpensive system for classifying tool wear states using pattern recognition", *Wear*, 170, 149-160 (1993)
- Debabrata P., "Detection of change in processes using wavelets", Proc. Of the IEEE-SP International Symposium on Time Frequency and Time Scale Analysis, 174-177 (1994)
- Devillez A., S. Lesko and W. Mozer, "Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry", *Wear*, 256, 56-65 (2004)
- Diei E.N. and D.A. Dornfeld, "Acoustic Emission From the Face Milling Process - the Effects of Process Variables", *ASME Trans., J. Eng. Ind.*, 109, 92-99 (1987a)
- Diei E.N. and D.A. Dornfeld, "Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Peripheral Milling", *ASME Trans., J. Eng. Ind.*, 109, 234-240 (1987b)
- Dimla Jr. D.E., P. M. Lister and N. J. Leighton, "Neural network solutions to the tool condition monitoring problem in metal cutting - A critical review of methods", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37, 1219-1241(1996)
- Dimla Snr. D.E., "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 1073-1098 (2000)
- Dimla Sr. D.E., P.M. Lister, "On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyses", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 739-768 (2000)
- Diniz A., J. Liu and D. Dornfeld, "Monitoring the surface Roughness through Acoustic Emission in Finish Turning", 4th World Meeting on Acoustic Emission ASNT, Boston, 487-493 (1991)
- Diniz A., J. Liu and D. Dornfeld, "Correlating tool life tool wear and surface roughness monitoring acoustic emission in finish turning", *Wear*, 152, 395-407 (1992)
- Dornfeld D. and E. Kannatey-Asibu, "Acoustic emission during orthogonal metal cutting", *Int. J. Mech. Sci.*, 22, 285-296 (1980)

- Dornfeld D., "Investigation of Machining and Cutting Tool Wear and Chatter Using Acoustic Emission", *Review of Progress in Quantitative NDE*, 475-483 (1981)
- Dornfeld D., "Monitoring of the machining process by means of acoustic emission sensors", *Acoustic Emission: Current Practice and Future directions*, ASTM STP 1077 328-344 (1991)
- Dornfeld D., "Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing", *NDT International*, 25, 259-269 (1992)
- Du R., D. Yan and M.A. Elbestawi, "Time frequency distribution of acoustic emission signals for tool wear detection in turning", 4th World Meeting on Acoustic Emission and 1st International Conference on AE in Manufacturing, ASNT, Boston, 261-268 (1991)
- Elhachimi M., S. Torbaty and P. Joyot, "Mechanical modeling of high speed drilling. 2: predicted and experimental results", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 569-581 (1999)
- El-Wardany T. I., D. Gao, and M.A. Elbestawi, "Tool Condition Monitoring in Drilling Using Vibration Signature Analysis", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36, 686-711 (1996)
- Emel E. and E. Kannatey Asibu, "Tool Failure Monitoring in Turning by Pattern Recognition Analysis of AE Signals", *Journal of Engineering for Industry*, 110, 137-145 (1988)
- Ernst H. and M. Merchant, "Chip formation, friction and high quality machined surfaces", *Surface Treatment of Metals – ASM*, 20, New York (1941)
- Everson C.E. and S.H. Cheraghi, "The application of acoustic emission for precision drilling process monitoring", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 39, 371-387 (1999)
- Gao C., H. Zhao, L. Ma and N. Chen, "Principle and manufacture of a new type of torque sensor based on the torsional effect of a piezoelectric quartz disc", *Meas. Sci. Technol.*, 17, 323-330 (2006)
- Gao R.X. and C.R. Friedrich, "Acoustic Emission Measurement for the In- Process Monitoring of Diamond Turning", *IMTC/94 IEEE Proceedings*, 757- 760 (1994)
- Govekar E., J. Gradisek and I. Grabec, "Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes", *Ultrasonics*, 38, 598-603 (2000)
- Grabec I., "Chaotic vibrations and acoustic emission caused by the cutting process", *8th Int. AE Symp., Tokyo*, 87-93 (1986)
- Grabec I., "Chaotic dynamics of the cutting process", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 28, 19-32 (1988)
- Grabec I. and P. Leskovar, "Acoustic Emission of a cutting process", *Ultrasonics*, 15, 17-20 (1977)
- Grabec I., E. Govekar, E. Susic and B. Antolovic, "Monitoring manufacturing processes by utilizing empirical modeling", *Ultrasonics*, 36, 263-271 (1998)
- Guo Y.B. and S.C. Ammala, "Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 1622-1627 (2005)
- Haber R., J. Jimenez, C. Perez and J. Alique, "An investigation of tool wear monitoring in a high speed machining process", *Sensors and Actuators A*, 116, 539-545 (2004)
- Hall L.D., D. Mba and R. Bannister "Acoustic emission signal classification in condition monitoring using the Kolmogorov Smirnov statistic", *J. Acoustic Emission*, 19, 209-227 (2001)
- Heiple C.R., S.H. Carpenter, D.L. Armentrout and A. P. McManigle, "Acoustic emission from single point machining. Source mechanisms and signal changes with tool wear", *Materials Evaluation*, 52, 590-596 (1994)
- Holroyd T.J., "Using Acoustic Emission to simplify the condition monitoring of industrial machinery", *Insight*, 40 558-560 (1998)
- Houshmand A., E. Kannatey-Asibu and G. Herrin, "A dynamic model for tool wear detection using acoustic emission", *Mechanical systems and signal processing*, 9, 415-428 (1995)
- Inasaki I., "Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes", *Ultrasonics*, 36, 273-281 (1998)

- Iturrospe A., D. Dornfeld, V. Atxa and J. Manuel Abete, "Bicepstrum based blind identification of the acoustic emission (AE) signal in precision turning", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19, 447-466 (2005)
- Iwata K. and T. Moriwaki, "An Application of acoustic emission measurement to in-process sensing of tool wear", *Annals of CIRP*, 25, 21-26 (1977)
- Jantunen E., "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 42, 997-1010 (2002)
- Jardine A., D. Lin and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 1483-1510 (2006)
- Jemielniak K., "Some aspects of AE application in tool condition monitoring", *Ultrasonics*, 38, 604-608 (2000)
- Jemielniak K., "Some aspects of acoustic emission signal pre-processing", *Journal of Materials Processing Technology*, 109, 242-247 (2001)
- Jemielniak K. and O. Otman, "Tool Failure Detection Based on Analysis of Acoustic Emission Signals", *Journal of Materials Processing Technology*, 76, 192-197 (1998)
- Jenkins and Watts, "Spectral analysis and its applications", San Francisco, Holden Day (1968)
- Jin W., P. Venuvinod and X. Wang, "An Optical Fibre Sensor based Cutting Force Measuring Device", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 35, 877-883 (1995)
- Kakino Y., "Monitoring of metal cutting and grinding processes by acoustic emission", *J. Acoust. Emission*, 3, 108-116 (1984)
- Kang M.C., J.S. Kim and J.H. Kim, "A monitoring technique using a multi-sensor in high speed machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 113, 331-336 (2001)
- Kannatey-Asibu Jr. E. and D. A. Dornfeld, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", *Trans. ASME, J. Engineering for Industry*, 103, 330-340 (1981)
- Kannatey-Asibu Jr. E. and D. A. Dornfeld, "A Study of Tool Wear Using Statistical Analysis of Metal Cutting Acoustic Emission", *Wear*, 76, 247-261 (1982)
- Kannatey-Asibu Jr. E. and E. Emel, "Linear discriminant function analysis of acoustic emission signals for cutting tool monitoring", *Mechanical systems and signal Processing*, 1, 333-347 (1987)
- Karabay S., "Analysis of drill dynamometer with octagonal ring type transducers for monitoring of cutting forces in drilling and allied process", *Materials and Design*, 28, 673-685 (2007)
- Komanduri R. and Z.B. Hou, "A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology", *Tribology International*, 34, 653-682 (2001)
- Kopac J. and S. Sali, "Tool wear monitoring during the turning process", *Journal of Materials Processing Technology*, 113, 312-316 (2001)
- Kopac J. and S. Sali, "Acoustic Emission drilling in carbon steel and nodular gray iron", *J. of Achiev. in Mat. and Manuf. Eng.* 19, 91-95 (2006)
- Kurada S. and C. Bradley, "A review of machine vision sensors for tool condition monitoring", *Computers in Industry*, 34, 55-72 (1997a)
- Kurada S. and C. Bradley, "Machine vision system for tool wear assessment", *Tribology International*, 30, 295-304 (1997b)
- Kwak y Song, "Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, 899-913 (2001)
- Lanzetta M., "A new flexible high resolution vision sensor for tool condition monitoring", *J of Mat Proc Tech*, 119, 73-82 (2001)
- Levy R., "Drill press dynamometers", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 7, 269-287 (1967)
- Li X., "Detection of Tool Flute breakage in end milling using feed motor current signatures", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 6, 491-498 (2001a)

- Li X., "Real time tool wear condition monitoring in turning", *Int. J. Prod. Res.*, 39, 981-992 (2001b)
- Li X., "A brief review: acoustic emission for tool wear monitoring during turning", *Intl. J. of Mach. Tools and Manufacture*, 42, 157-165 (2002)
- Li X. and Z. Yuan, "Tool wear monitoring with wavelet packet transform-fuzzy clustering method" *Wear*, 219, 145-154 (1998)
- Li X. and S.K. Tso, "Drill wear monitoring based on current signals", *Wear*, 231, 172-178 (1999)
- Li X. and S.K. Tso, "Real time tool wear condition monitoring using wavelets transform and fuzzy techniques", *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics- Part C: Applications and reviews*, 30, 352-357 (2000)
- Li X., Y. Yao, and Z. Yuan, "On line tool condition monitoring system with wavelet fuzzy neural network", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 8, 271-276 (1997)
- Li X., S. Dong and Z. Yuang, "Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring", *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 39, 1935-1944 (1999).
- Li X., S. Dong and P. Venuvinod, "Hybrid learning for tool wear monitoring", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 16, 303-307 (2000)
- Lin S. and C. Ting, "Drill wear monitoring using neural networks", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 36, 465-475 (1996)
- Maradei C., Tesis de Maestría: "Estudio de la condición de la herramienta durante el maquinado de piezas mediante emisión acústica", IT "Prof. J. Sabato", UNSAM (2001)
- Maradei C., R. Piotrkowski, E. Serrano and J. Ruzzante, "Acoustic Emission Signal analysis in machining processes using wavelet packets", *Latin American Applied Research*, 33, 443-448 (2003)
- Maradei C., R. Piotrkowski, E. Serrano and J.E. Ruzzante, "Monitoring of the tool condition with acoustic emission signal analysis using wavelets packets" *Insight* 44, 786 (2002).
- Marinescu I., D. Axinte, "A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 1148-1160 (2008)
- Marinescu I., D. Axinte, A time-frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunctions in milling with multiple teeth cutting simultaneously, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 53-65 (2009)
- Mathews P. and M. Shunmugam, "Condition monitoring in reaming through acoustic emission signals", *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 81-86 (1999)
- Mc Bride R., T.A. Carolan, J.S. Barton S.J. Wilcox, W.K. Borthwick and J.D. Jones, "Detection of acoustic emission in cutting processes by fibre optic interferometry", *Meas. Sci. Technol.*, 4, 1122-1128 (1993)
- Merchant M.E., "Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip", *Journal of Applied Physics*, 16, 267-275 (1945)
- Merchant M.E. and E.J. Krabacher, "Radioactive tracers for rapid measurement of cutting tool life", *J. Appl. Phys.*, 1507-1508 (1952)
- Merchant M.E., "Recent progress in metal removal research at Cincinnati", *Int. J. Mach. Tool. Des. Res.*, 1, 79-88 (1961)
- Moriwaki T., "Detection for cutting tool fracture by acoustic emission measurement", *Annals of CIRP*, 29, 35-40 (1980)
- M'Saoubi R. and H. Chandrasekaran, "Investigation of the effects of tool micro-geometry and coating on tool temperature during orthogonal turning of quenched and tempered steel", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 213-224 (2004)
- National Semiconductor, "Power spectra estimation", Application Note 255, 1-27 (1980)
- Nayebi A., G. Mauvoisin and H. Vaghefpour, "Modeling of twist drills wear by a temperature-dependent friction law", *Journal of Materials Processing Technology*, 207, 98-106 (2008)

- Nayfeh T.H., O.K. Eyada and J.C. Duke, "An integrated ultrasonic sensor for monitoring gradual wear on-line during turning operations", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 35, 1385-1395 (1995)
- Niu Y. M., Y. S. Wong, G. S. Hong and T. I. Liu, "Multi-category classification of tool conditions using wavelet packets and ART2 network", *Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 120, 807-816 (1998)
- O'Donnell G., P. Young, K. Kelly and G. Byrne, "Towards the improvement of tool condition monitoring systems in the manufacturing environment", *Journal of Materials Processing Technology*, 119, 133-139 (2001)
- Ozcelik B. and E. Bagci, "Experimental and numerical studies on the determination of twist drill temperature in dry drilling: A new approach", *Materials and Design*, 27, 920-927 (2006)
- Paul D., "Detection of change in processes using wavelets" Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, Philadelphia PA, 174-177 (1994)
- Peng Y., "Empirical Model Decomposition based time frequency analysis for the effective detection of tool breakage", *J. of Manuf. Sci. and Eng.*, 128, 154-166 (2006)
- Peng Y., H. Kumehara and W. Zhang "Measurement of drill point geometry by using laser sensor", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 682-688 (2007)
- Potdar Y.K. and A.T. Zehnder, "Measurements and Simulations of Temperature and Deformation Fields in Transient Metal Cutting", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 125, 645-655 (2003)
- Potdar Y.K. and A.T. Zehnder, "Temperature and Deformation Measurements in Transient Metal Cutting", *Experimental Mechanics*, 44, 1-9 (2004)
- Ravindra H.V., Y.G. Srinivasa and R. Krishnamurthy, "Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting", *Wear*, 212, 78-84 (1997)
- Robben L., S. Rahman, J. Buhl, B. Denkena and B. Konopatzki, "Airborne sound emission as a process monitoring tool in the cut-off grinding of concrete", *Applied Acoustics*, 71, 52-60 (2010)
- Roget J., P. Souquet and N. Gsib, Application of Acoustic Emission to the Automatic Monitoring of Tool Condition during Machining, *Mat. Eval.*, 46, 225-229 (1988)
- Roget J., P. Souquet, M. Deschamps and N. Gsib, "Tool Monitoring by Acoustic Emission" Acoustic Emission: Current Practice and Future directions, ASTM STP 1077 316-327 (1991)
- Ryabov O., K. Mori and N. Kasashima, "Laser displacement meter application for milling diagnostics", *Optics and Lasers in Engineering*, 30, 251-263 (1998)
- Saini D.P. and Y.J. Park, "A quantitative model of acoustic emissions in orthogonal cutting operations", *J. of Mat. Process Tech.*, 58, 343-350 (1996)
- Shaw M.C. and C.J. Oxford, "On the drilling of metals 2 - the torque and thrust in drilling", *Trans ASME*, 79, 139-148 (1957)
- Sick B., "Review on-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16, 487-546 (2002)
- Su J.C., C.K. Huang and Y.S. Tarn, "An automated flank wear measurement of micro drills using machine vision", *Journal of Materials Processing Technology*, 180, 328-335 (2006).
- Subramanian K., and N.H. Cook, "Sensing of drill wear and prediction of drill life", *ASME Journal of Engineering for Industry*, 103, 295-301 (1977)
- Sukvittayawong S. and I. Inasaki, "Identification of chip form in metal cutting with an acoustic emission sensor", 4th World Meeting on Acoustic Emission, ASNT, Boston, 80-87 (1991)
- Susic E. and I. Grabec, "Characterization of the grinding process by acoustic emission", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 225-238 (2000)
- Sutter G. and N. Ranc, "Temperature fields in a chip during high-speed orthogonal cutting—An experimental investigation", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 1507-1517 (2007)

- Suzuki H., T. Kinjo, Y. Hayashi, M. Takemoto, and K. Ono, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals", *J. of Acoustic Emission*, 14, 69-84 (1996)
- Takeshita H. and I. Inasaki, "Monitoring endmill cutter failure with an AE sensor", 4th World Meeting on Acoustic Emission, ASNT, Boston, 301-307 (1991)
- Takuma M., N. Shinke, T. Nishiura and K. Akamatu, "Acoustic Emission evaluation systems of tool life for shearing of piano and stainless steel wires", *J. Acoustic Emission*, 24, 52-66 (2006)
- Tan K.K., Z. Yi, H. Sunan, W. Yoke and L. Tong, "Decoupled tracking and thermal monitoring of non-stationary targets", *ISA Transactions*, 48, 449-457 (2009)
- Teti R., "A review of tool condition monitoring literature database", *Annals of CIRP*, 44, 659-666 (1995)
- Teti R., K. Jemielniak, G. O'Donnell and D. Dornfeld, "Advanced monitoring of machining operations", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59, 717-739 (2010)
- Tönshoff H.K., M. Jung, S. Mannel and W. Rietz, "Using acoustic emission signals for monitoring of production processes", *Ultrasonics*, 37, 681-686 (2000)
- Totis G., G. Wirtz, M. Sortino, D. Veselovac, E. Kuljanic and F. Klocke, "Development of a dynamometer for measuring individual cutting edge forces in face milling", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, 1844-1857 (2010)
- Venkataraman R., J. Lambie and F. Koenigsberger, "Analysis and performance testing of a dynamometer for use in drilling and allied processes", *Int. J. Mach. Tool. Des. Res.*, 5, 233-261 (1965)
- Wilkinson A. J., "Constriction-resistance concept applied to wear measurement of metal cutting tools", *Proceedings of the IEEE*, 18, 381-386 (1971).
- Wong Y., A. Nee, X. Li and C. Reisdorf, "Tool condition monitoring using laser scatter pattern", *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 205-210 (1997)
- Yaldiz S., F. Unsacar, H. Saglam and H. Isik, "Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, 1499-1511 (2007)
- Zhu K.P., S. Wong and G. Hong, "Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 537-553 (2009)

Capítulo 4

Etapla preliminar del análisis de señales de maquinado. Parte 1

Estudio del espectro tiempo-frecuencia de señales de Emisión Acústica generadas en un proceso de torneado para la estimación del estado de la herramienta de corte, utilizando la transformada onditas.

En este capítulo se muestran primeros análisis de señales de EA adquiridas en un proceso de corte de metales por medio de un torno, y su relación con el desgaste de la herramienta de corte, en este caso un inserto. En esta primera etapa preliminar del trabajo se inicia la búsqueda de nuevos parámetros de la EA que permitan evaluar el estado de la herramienta en procesos de maquinado, en este caso a partir del análisis de las señales de EA producidas durante el corte. Los datos estudiados corresponden a un trabajo realizado previamente por miembros del grupo de investigación en el cual se realizó esta tesis [Maradei y otros (2000, 2001)], y fueron utilizados con la finalidad de poner a punto métodos de exploración de las señales de EA a partir del estudio de los espectros tiempo-frecuencia utilizando la transformada continua de onditas. El trabajo de análisis expuesto en el presente capítulo se encuentra publicado en [Gómez y otros (2006)].

El experimento consistió en una serie de ensayos de torneado de quince barras de acero SAE 1010 de iguales características con un inserto el cual fue perdiendo su filo a lo largo del proceso hasta llegar a un nivel apreciable de desgaste según norma. Las variables medidas fueron la amplitud de la señal de EA en función del tiempo para pequeños fragmentos de señal, cuya detección era disparada a partir de que la señal superara un umbral.

A las señales de EA se les calculó la transformada onditas continua y se relacionaron la potencia y dos parámetros surgidos del análisis de las onditas con el grado de desgaste determinado según especificaciones de la Norma ISO 3685.

4.1 Introducción

Luego de la introducción general a la EA del Capítulo 1 y de la introducción a los métodos de determinación del estado de la herramienta del Capítulo 3, se pueden resaltar unos pocos conceptos que son útiles para centrar el estudio expuesto en este capítulo.

En los materiales, en condiciones de trabajo normal de la herramienta, las fuerzas aplicadas al filo así como las señales de EA generadas en ese proceso surgen de procesos estocásticos intrínsecos al proceso de corte [Grabec y Leskovar (1977)] [Kannatey-Asibu Jr. y Dornfeld (1982)]. Por esta razón ciertos parámetros de la EA podrían tomar valores críticos anunciando el comienzo de la falla de la herramienta y utilizarse como método indirecto de evaluación de la condición de la misma [Diei y Dornfeld (1987, 1988)] [Teti y otros (2010)] [Dornfeld (1991, 2002)]. Como ya se ha mencionado, las fuentes de EA en el corte son variadas [Moriwaki (1980)] [Li (2002)] como por ejemplo: la deformación plástica en la pieza y en la viruta, la fricción entre la pieza y la herramienta [Heiple (1994)], colisiones entre la viruta y la herramienta y la fractura de la viruta y de la herramienta [Dornfeld (1980)]. Siendo las más importantes fuentes de señales de EA continuas y transitorias (explosión), la fricción y la fractura, respectivamente [Carpenter y otros (1992)]

Como hipótesis de trabajo se propone que, como se expresa en la bibliografía, la EA total producida en el proceso de maquinado de metales y otros materiales, con herramientas de corte, puede ser estudiado como un proceso estocástico no estacionario. En la literatura, se pueden encontrar trabajos en los cuales se observa el carácter estocástico de las señales de EA provenientes del maquinado, por ejemplo cuando se estudian los valores RMS de la EA [Jemielniak y Otman (1998)]. El comportamiento no estacionario de la EA generada por algunas de las fuentes actuantes en el corte plantearía la necesidad de aplicar la Transformada Onditas (TO) en las señales de EA si se desea estudiar la evolución del espectro de frecuencias. Previamente Iwata y Moriwaki (1977) y Kakino (1984) han estudiado el espectro de potencia a través de la transformada rápida de Fourier. Luego Du y otros (1991) observaron la existencia y evolución de bandas de frecuencias para las señales de EA en función del corte. Luego, características de las señales de EA como la energía, potencia y entropía, han sido calculadas con paquetes de onditas ("wavelet packets"), las cuales mostraron ser útiles para la caracterización del desgaste [Maradei y otros (2002)] [Li y otros (1999)]. También hay en la literatura variados trabajos, citados en el capítulo anterior en los cuales se utilizan distintos tipos de aplicaciones de la TO para el estudio del desgaste con EA [Kunpeng y otros (2009)]. En este capítulo se avanza en el sentido de hallar parámetros descriptivos de la condición de la herramienta.

4.2 Transformada ondita (wavelet)

Aunque este tema ya fue tratado en capítulos anteriores se hace una muy breve reseña de las onditas continuas que son las utilizadas en el desarrollo de este capítulo. Comenzando con su definición, la Transformada Ondita (TO) es una transformación tiempo-escala (o tiempo frecuencia) de señales continuas o discretas, y su aplicación y alcance son más generales que la transformada de Fourier por ventanas. Esto permite un análisis multi-resolución de la señal en el dominio de la escala temporal, mostrando buena resolución en el tiempo para altas frecuencias y buena resolución en frecuencia para bajas frecuencias [D'Attellis (1995)] [Li y otros (1999)] [Addison (2002)] [Suzuki y otros (1980)].

En general la función ondita continua normalizada está definida como:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.1)$$

donde $\Psi(t)$ es la ondita madre y a y b son los parámetros de *dilatación* y *posición*.

La TO de una señal continua $s(t)$ puede escribirse como:

$$WT(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (4.2)$$

donde $\Psi_{a,b}^*$ es el complejo conjugado de la función $\Psi_{a,b}$.

Algunos requerimientos existen para considerar una función como una wavelet. Esta debe tener energía finita, un valor medio nulo, y para wavelets complejas, la transformada de Fourier debe ser real y hacerse nula para frecuencias negativas.

En este trabajo se utilizó una función de Gabor como la wavelet madre. Para resolverla se realizó una discretización de las integrales de la transformada, substituyendo la integral continua por una suma discreta en el tiempo, con la evolución de los parámetros a y b .

4.3 Método experimental

4.3.1 Respecto del ensayo de torneado

El método experimental para la medición de las señales de EA está descrito en [Maradei y otros (2000)] [Maradei y otros (2001)]. Sólo detalles importantes para la comprensión del análisis realizado serán dados a continuación sobre el material y el proceso de maquinado.

Las muestras maquinadas fueron quince barras de acero SAE 1010, de 335 mm de longitud. Todas las barras tenían las mismas características estructurales y mecánicas como por ejemplo tamaño de grano heterogéneo (entre 7 and 10 ASTM), inclusiones de tamaño medio de 2 micrones y dureza media de 86 HRB (Rockwell B). Las probetas fueron torneadas con un torno de 20 kW marca Turri modelo 250, usando el mismo inserto de carburo metálico (P20) pasando seis veces sobre todas las barras.

Las señales de EA fueron medidas durante cada pasada del torno sobre cada probeta usando un sistema MISTRAS (PAC). Un sensor de EA piezoelectrico de banda ancha (50 Khz - 1 MHz) fue fijado al inserto y fue conectado a un preamplificador de 40 dB. Las señales eléctricas fueron amplificadas, convertidas de A/D, y parametrizadas y almacenadas en una PC por medio de una placa PCI marca PAC modelo AEDSP 32/16B de 16 bits de resolución. La tasa de muestreo fue de 4 Ms/s y la señal digitalizada (que se nombrará a continuación como “señal” o “forma de onda”) contenía 15600 puntos (o 3.9 ms expresado en tiempo). En el orden de 400 archivos de señales fueron grabados para cada muestra para cada pasada del torno, en coincidencia con el tiempo de maquinado. El desgaste del inserto fue medido después de cada pasada con un microscopio de precisión micrométrica Leitz-Weitzlar, para comparar su condición (porcentaje de desgaste de la herramienta) con la información provista por la EA. La vida útil de la punta del inserto (100 % de desgaste) fue determinada de acuerdo a la norma ISO 3685.

4.3.2 Procedimiento para el análisis de las señales de EA

Una vez que todas las formas de onda de las señales de EA fueron adquiridas, se convirtieron a formato ASCII por medio del software AEWin de la marca PAC. Un ejemplo de las señales puede verse en la Fig. 4.1, donde se grafica la amplitud de una señal de EA en función del número de muestra, el cual crece proporcionalmente con el tiempo, relacionándose ambas variables a través de la tasa de muestreo.

Luego, a las señales almacenadas, se les aplicó la transformada onditas, utilizando las onditas continuas del tipo de “Gabor” o “Gaussianas”. De esta manera, los datos de las señales de EA adquiridas fueron procesados con programas generados en MATLAB con los que se obtuvieron patrones tridimensionales de onditas.

Un conjunto de quince probetas a maquinarse fue pasado, secuencialmente y ordenadamente, en seis oportunidades por el torno, y para cada probeta en cada pasada se tomaron las señales de EA producidas por el maquinado, es decir por la acción del inserto sobre la pieza. Estas quince probetas multiplicadas por las seis pasadas darían la cantidad de noventa casos (o ensayos concretos de torneado). En los registros de las experiencias sólo se consideraron ochenta y dos casos ya que los ocho iniciales (de la primera pasada) tuvieron alguna dificultad de ejecución. Entonces, para los datos estudiados la primera pasada comenzó con la probeta número 9.

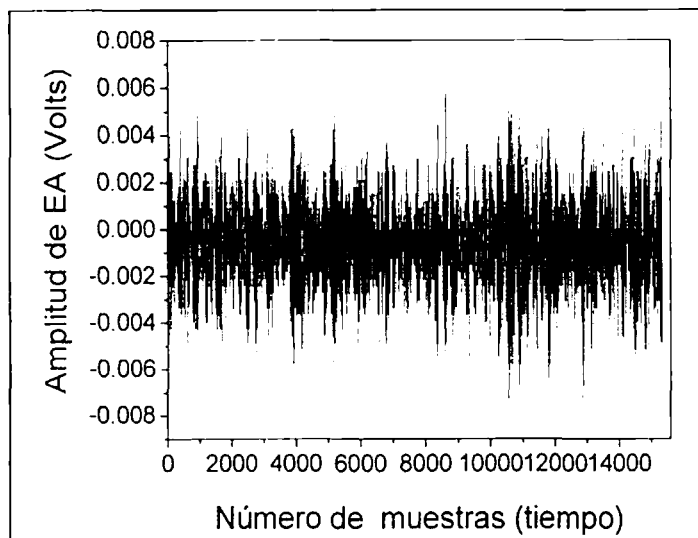


Fig. 4.1. Ejemplo de la señal de EA. Amplitud de EA vs. Número de muestras (tiempo).

En esta tesis, se conserva la misma nomenclatura para las probetas que la utilizada por los autores de los ensayos analizados, para poder realizar posibles comparaciones de los resultados obtenidos. En cada uno de los 82 maquinados de las probetas con el torno se midieron alrededor de 400 formas de onda (o fragmentos de la señal de EA) de las cuales, por razones de tiempo de cálculo, se tomaron solo 60 muestras, elegidas de manera equiespaciada en función del número de señales de EA. De esta manera se analizaron aproximadamente 5000 formas de onda de EA con la transformada ondita, obteniéndose para cada una matriz del patrón tiempo-escala. Resumiendo, para cada muestra o forma de onda de EA correspondiente a una pasada determinada para una probeta determinada, se construyó un gráfico tridimensional tiempo-escala-intensidad de las onditas y se almacenó una matriz correspondiente a la transformada ondita. Un ejemplo de la representación gráfica de la transformada ondita se muestra en la Fig. 4.2. A partir de los gráficos obtenidos se realizaron estudios de las escalas características y de la amplitud de los coeficientes de las onditas para intentar la caracterización del proceso de desgaste de la herramienta. Ambos parámetros tienen un significado físico asociado, la escala es una función inversa de la frecuencia, mientras que los coeficientes elevados al cuadrado están relacionados con la potencia de las ondas de EA.

4.3.2.1 Visualización del espectro tiempo-frecuencia

En una **primera etapa** del trabajo, y buscando un comportamiento característico para los coeficientes de las onditas y para la escala respecto del desgaste de la herramienta (inserto), se construyeron secuencias de visualización con los gráficos tridimensionales que representan la transformada onditas de las señales de EA. Esto se realizó para cada uno de los casos.

4.3.2.2 Procesamiento de las matrices transformada de las señales de EA

En una segunda etapa, a partir de la matriz transformada ondita de las señales de EA, se procesaron los coeficientes de estas de tres formas. Por un lado se calcularon la variación de los coeficientes y la potencia de las onditas, y por otro se estudió la variación de la escala

correspondiente a la potencia máxima para cada tiempo, en los tres casos en función del desgaste de la herramienta. Estos análisis se detallan a continuación.

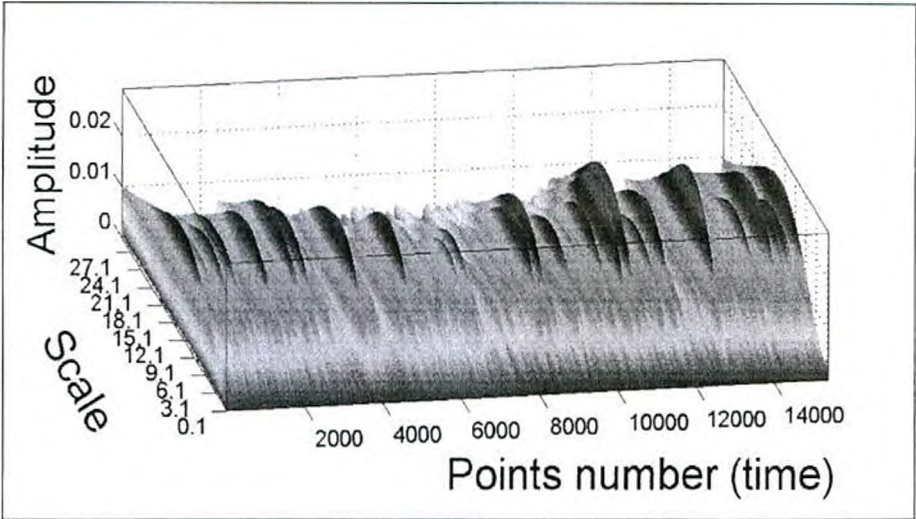


Fig. 4.2. Representación gráfica del patrón de la TO (para la señal de la Fig. 1).

4.3.2.2.1 Valor máximo de los coeficientes de cada matriz

En primer lugar se tomó el valor máximo de los coeficientes de cada matriz, y su valor de escala correspondiente a ese máximo para cada caso, es decir para cada probeta y para cada uno de los ensayos. Luego los valores máximos de los coeficientes de onditas fueron graficados en función del número de muestra, que está relacionado con el tiempo que transcurre entre cada toma de formas de onda de EA, es decir es una escala que representa la evolución temporal de la respectiva pasada de la pieza por el torno.

4.3.2.2.2 Potencia en función del desgaste

Para el segundo caso se estudió para cada señal el promedio de la potencia de las onditas, es decir del cuadrado de los coeficientes de onditas promediado en la escala. La potencia media definida en este trabajo, P_M es el valor medio de la potencia sobre todas las señales de cada caso medido, es decir una probeta torneada en una pasada. Con más detalle se puede decir que para un dado caso se tomaron una por una las 60 señales promediando la potencia para todas las escalas, y luego se promedió la potencia para las 60 señales obteniéndose un valor promedio de la potencia de las onditas para un caso de torneado. Luego se construyó un gráfico de manera secuencial (pasada 1, pasada 2,..., pasada 6) de manera de tener los 82 puntos antes mencionados ordenados en función del avance del tiempo de desgaste. Así se estudio la variación del parámetro P_M en función de la evolución del proceso de desgaste de la herramienta.

4.3.2.2.3 Mediana y varianza de la escala correspondiente a la potencia máxima de onditas en función del desgaste

Luego se tomaron los valores de escala correspondientes a la máxima amplitud potencia de las onditas en función del tiempo, a los cuales se denominó como parámetros S_M . La idea era visualizar temporalmente de qué manera está distribuida la energía con respecto a la escala (o de manera inversa, a la frecuencia) en el lapso transcurrido para cada señal. Un umbral conveniente fue elegido para evitar que la presencia de ruido espurio causara resultados erróneos. Si se observa en la Fig. 4.2, el patrón tridimensional de la TO de una señal de EA, se pueden distinguir máximos de los coeficientes de las onditas en función de la escala y el tiempo. Estos valores máximos de los coeficientes se corresponden a máximos de potencia. De esta manera, para cada uno de los máximos se analizó a qué escala se producían, a la cual se la denominó como S_M o “escala correspondiente a la máxima potencia de las onditas para cada tiempo”. Para cada patrón de cada señal se pueden observar más de un máximo y por lo tanto más de un S_M . Por esa razón, para cada señal se tomaron la mediana de los S_M (notada como $Med(S_M)$) como valor

representativo de los diferentes S_M de esa forma de onda, y la varianza de los S_M ($\text{Var}(S_M)$) para cuantificar la dispersión de la distribución de la potencia máxima respecto de la escala.

La mediana y la varianza del parámetro S_M , fueron representados en función del desgaste a partir de dos procedimientos distintos:

Para el primer método se tomaron todas las señales a ser estudiadas según el criterio descripto al comienzo de esta sección y se calcularon los parámetros denominados $\text{Med}(S_M)$ y $\text{Var}(S_M)$ para cada una. Luego sobre cada pasada se agruparon los resultados obtenidos para sus correspondientes señales y se les calcularon la media y la mediana, realizando un gráfico con seis puntos, uno por pasada para cada estimador. Entonces cada punto representa el promedio en un caso y la mediana en el otro, realizadas sobre los parámetros $\text{Med}(S_M)$ y $\text{Var}(S_M)$ calculados sobre las 15 probetas (a excepción de la pasada 1).

El segundo método correspondió a tomar la media móvil de los valores de $\text{Med}(S_M)$ y de $\text{Var}(S_M)$ respectivamente, para cada señal y sobre todas las señales, es decir que en este método se tomaron las señales analizadas. Este método de media móvil fue elegido con el fin de filtrar las altas frecuencias de la señal para poder observar una tendencia de la misma en función del tiempo. Esto se debió a que los valores de $\text{Med}(S_M)$ y de $\text{Var}(S_M)$ mostraban fluctuaciones de alta frecuencia dada la gran variabilidad estocástica de las señales de EA, que enmascaraban una mejor visualización de la evolución de los parámetros para un número grande de señales. En ambos casos la media móvil se calculó con ventanas de 300 muestras en un total de aproximadamente 5000 señales.

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Visualización del espectro tiempo frecuencia. Evolución de la frecuencia en función del desgaste.

Se realizó un exhaustivo y detallado análisis de los patrones de las señales de EA medidas para distintas etapas de desgaste de la herramienta para esto se visualizaron numerosas secuencias de patrones. Unos pocos ejemplos de estas señales pueden observarse en la Fig. 4.3 en la cual se grafica una representación 3-D de seis patrones correspondientes a los coeficientes de onditas de las señales de EA tomadas en la etapa inicial de los ensayos (Pasada 1) mientras que en la Fig. 4.4 se muestran patrones de las señales de la etapa final del ensayo (pasada 6). Cabe destacar que en ambos casos las señales graficadas fueron elegidas de manera aleatoria. Los gráficos 3-D representan la escala de las onditas en función del tiempo y del valor de los coeficientes, y corresponden a las TO de las señales graficadas en color azul y ubicadas por debajo de estos.

Una característica que se logro visualizar y que se puede observar en ambas figuras recientemente mencionadas se refiere a la alineación de las escalas correspondientes a los coeficientes de onditas máximos para cada tiempo (o número de muestra) en los patrones de onditas. En esos gráficos se puede observar cualitativamente que para la etapa inicial existe una escala (función inversa de la frecuencia) en la cual los coeficientes de onditas máximos están centrados. Mientras que para las etapas finales (últimas pasadas) se produce una dispersión mayor en los valores de las escalas concernientes a los coeficientes máximos.

Otra característica observada en los patrones de onditas respecto de la distribución de los coeficientes máximos fue que desde la etapa inicial hasta la etapa final estos se fueron desplazando desde valores de escalas mayores hacia valores inferiores, es decir que la distribución de la energía de las onditas de las señales de EA se corrió hacia frecuencias mayores. Se observó entre la etapa inicial y la final un corrimiento de alrededor del 30 % en el valor de la frecuencia correspondiente a los valores máximos de la amplitud de los coeficientes de las onditas Gaussianas. Luego de individualizadas, estas características fueron estudiadas cuantitativamente, tal como se explicita en las secciones siguientes. A las escalas correspondientes a los máximos coeficientes se las llamó S_M .

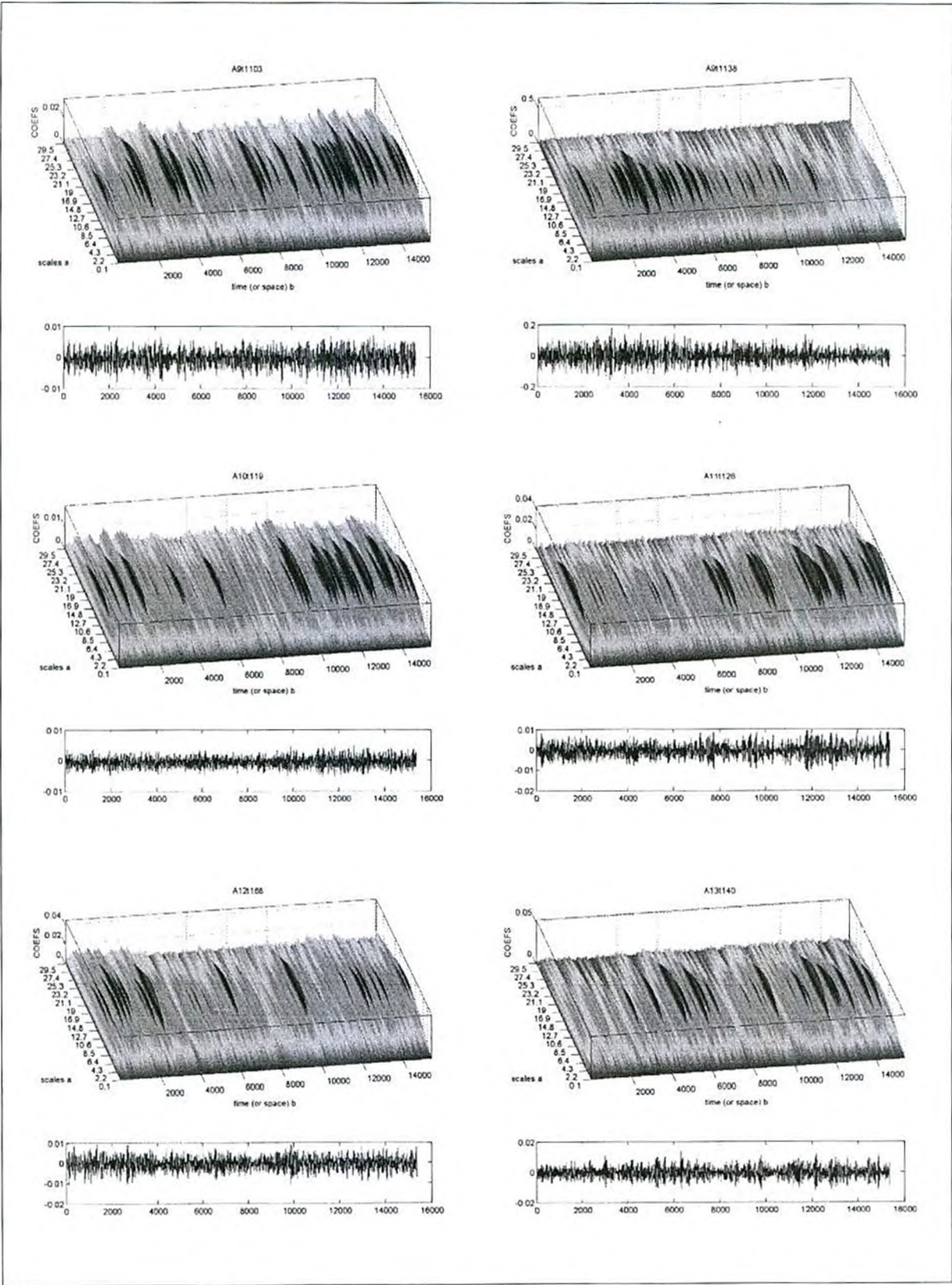


Fig. 4.3. Ejemplo de la representación 3-D de seis patrones correspondientes a la etapa inicial de los ensayos (Pasada 1). Los gráficos 3-D representan Escala vs. Tiempo vs. Coeficiente y corresponden a las TO de las señales graficadas en color azul y ubicadas debajo de estos, en las cuales se grafica amplitud en función del número de muestras, donde la señal mostrada tiene una duración de 3 ms..

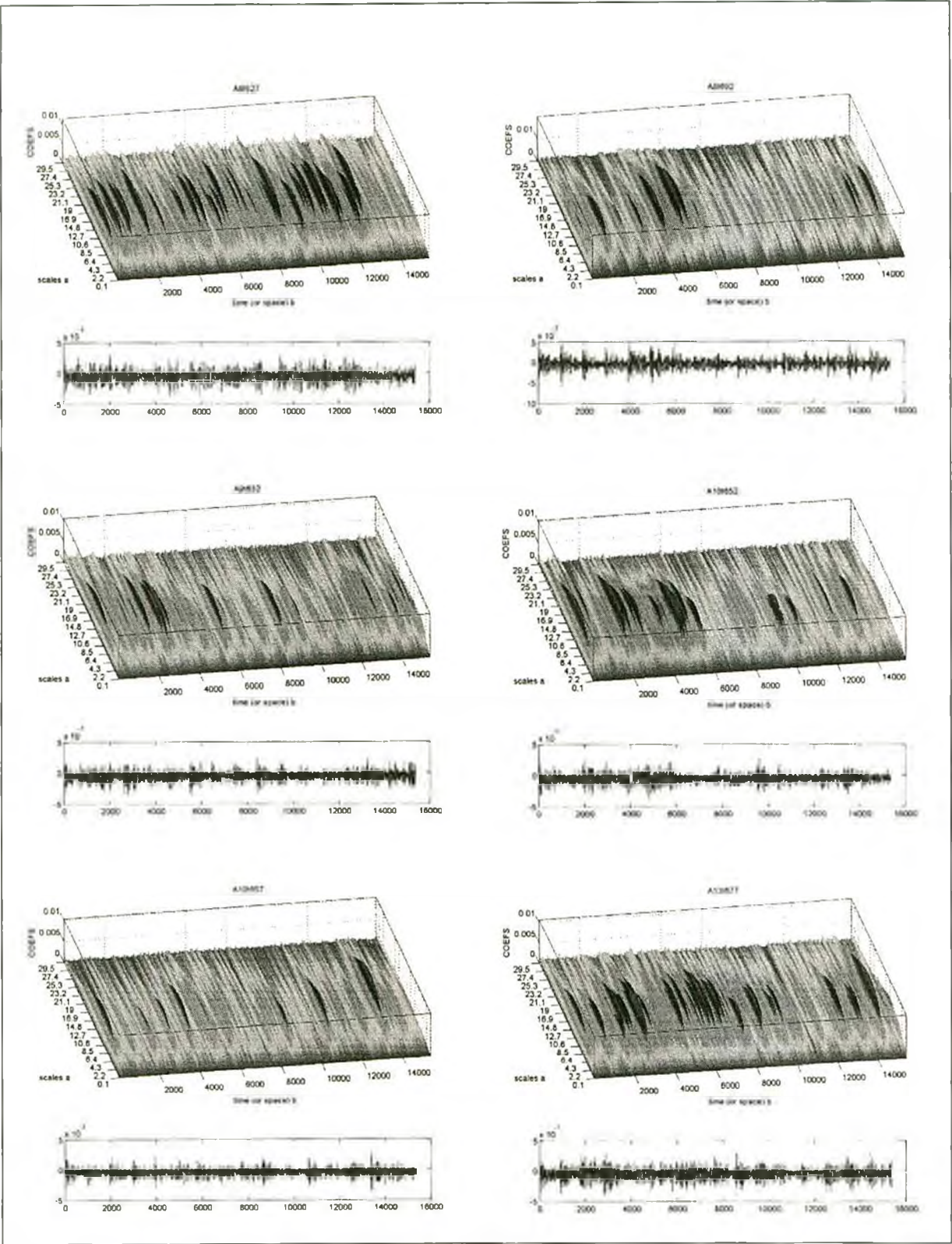


Fig. 4.4. Ejemplo de la representación 3-D de seis patrones correspondientes a la etapa final de los ensayos (Pasada 6). Los gráficos 3-D representan Escala vs. Tiempo vs. Coeficiente y corresponden a las TO de las señales graficadas en color azul y ubicadas debajo de estos, en las cuales se grafica amplitud en función del número de muestras, donde la señal mostrada tiene una duración de 3 ms.

4.4.2 Valor máximo de los coeficientes de cada matriz (Estudio de las amplitudes de los coeficientes de las onditas en función del número de pasada).

En la Fig. 4.5 se observan los resultados obtenidos por el método de los máximos. Para cada pasada el gráfico superior se refiere a los máximos de los coeficientes de onditas para cada muestra. Cada color corresponde a cada probeta. El gráfico inferior de cada pasada corresponde a los promedios de los máximos para cada probeta (promedio de los valores tomados por las curvas de cada color del grafico superior). El resultado obtenido es un visible aumento de amplitud en las etapas de desgaste de la herramienta coincidentes con el fin de la pasada 3 y comienzo de la pasada 4.

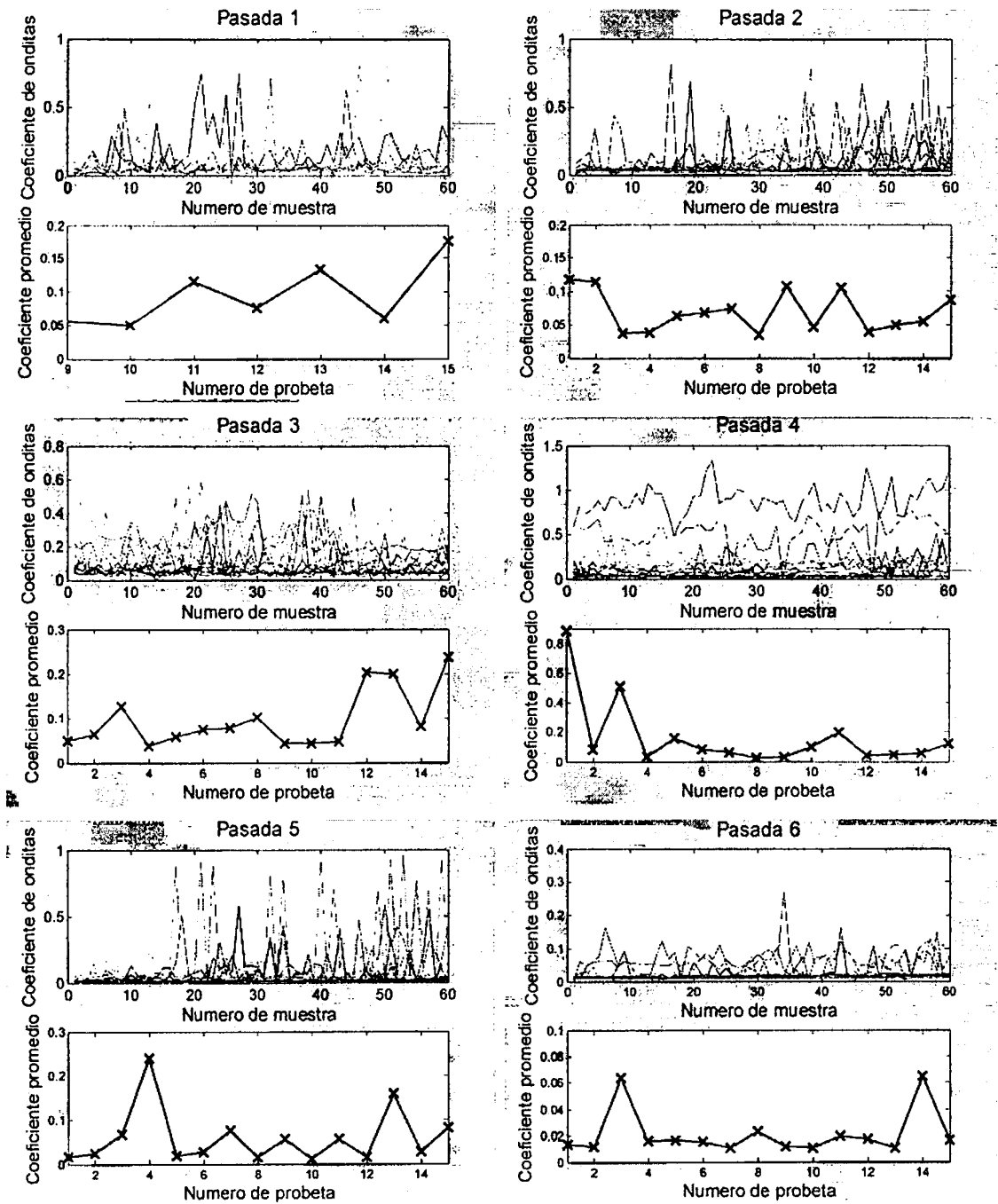


Fig. 4.5. Resultados de las TO para cada una de las pasadas. Parte superior: valores máximos de los coeficientes de onditas en función del número de muestra para cada probeta. Parte inferior promedio de los coeficientes máximos, para cada probeta.

4.4.3 Potencia en función del desgaste

En la Fig. 4.6 se grafican los resultados de promediar el módulo al cuadrado de los coeficientes de ondas (cálculo de la potencia) donde cada color representa cada probeta torneada en cada determinada pasada. En los gráficos superiores del cuadro respectivo a cada pasada se representa la potencia de las ondas, y en los gráficos inferiores el promedio de esta potencia sobre las 60 muestras en cada probeta. En estos gráficos se observa más claramente que en el caso anterior el incremento de la potencia en la misma etapa de desgaste obteniéndose también un máximo en la primera probeta de la cuarta pasada. Este segundo método resultó claramente más útil y confiable que el de los máximos, tomándose como una de las herramientas a seguir utilizándose.

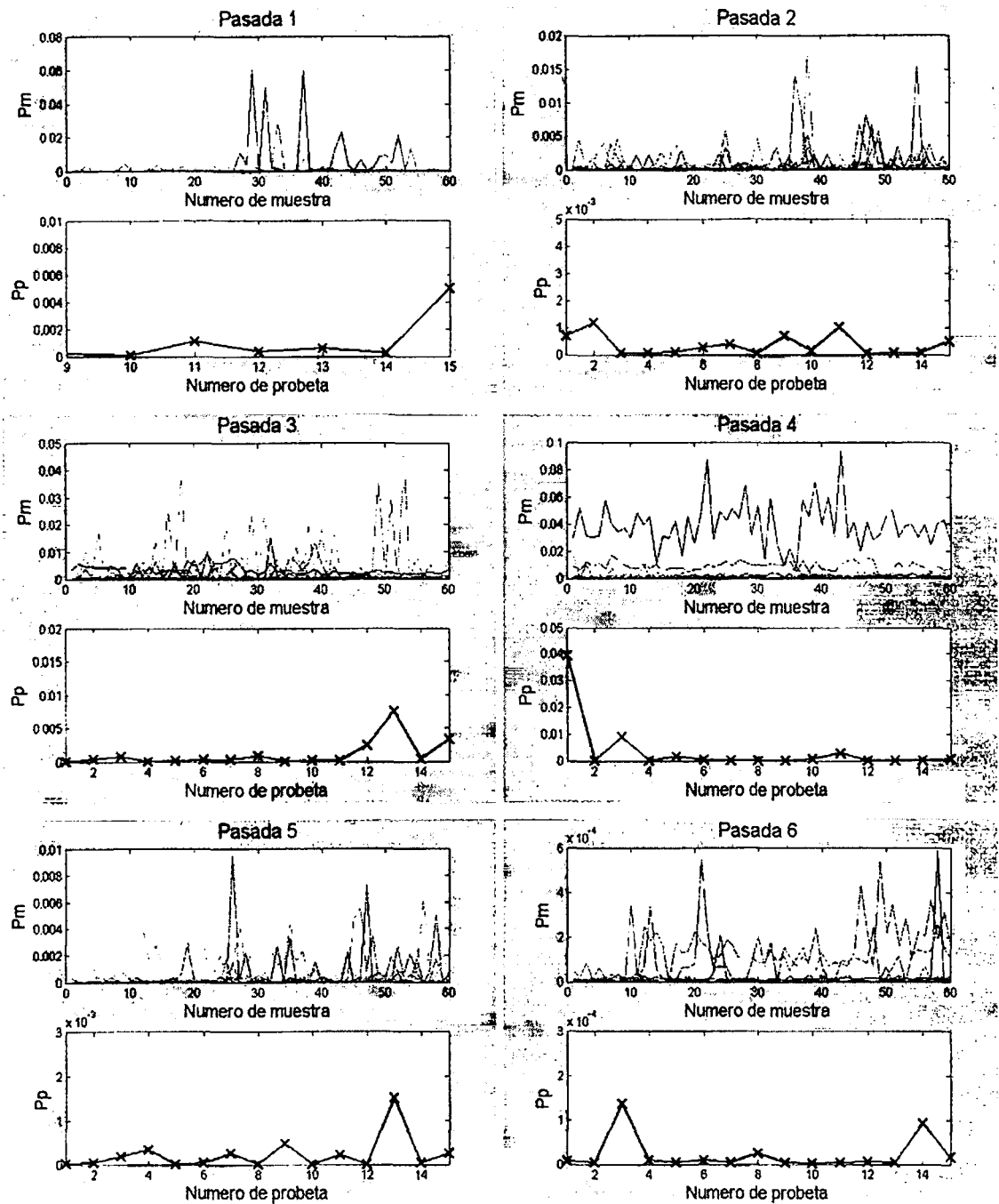


Fig. 4.6. Resultados para cada una de las pasadas. Parte superior: valores promedio de la potencia de los coeficientes de ondas en función del número de muestra para cada probeta. Parte inferior: promedio de los promedios de la potencia, para cada probeta

Otra forma de mostrar los mismos resultados se puede visualizar en la Figura 4.7 en la cual se grafica la potencia media de la transformada ondita (P_M) en función del porcentaje de tiempo de maquinado. La evolución de los valores medios de la potencia de la TO (en unidades arbitrarias) muestra un marcado incremento en las etapas intermedias del ensayo, en aproximadamente un 50% del tiempo de maquinado.

Los resultados del análisis de ambos parámetros, escala y potencia están en concordancia mostrando un significativo cambio de comportamiento cerca de la mitad del tiempo de ensayo (o tiempo de desgaste). La razón de este cambio podría estar posiblemente relacionada con un daño global en el inserto al mencionado nivel de desgaste.

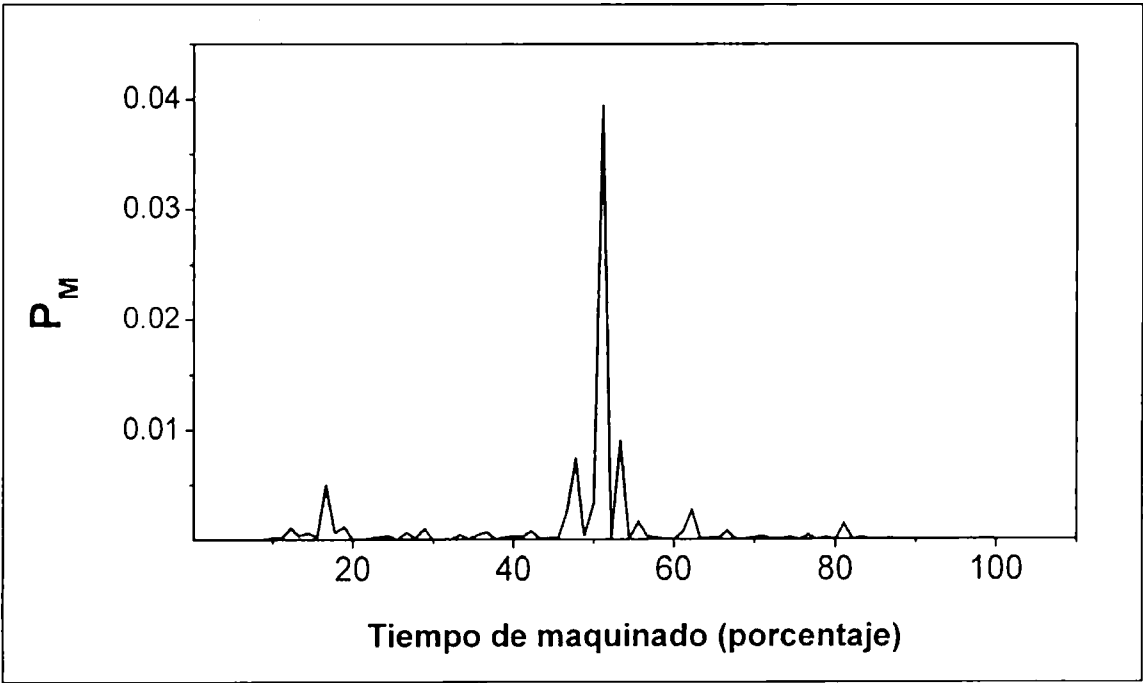


Fig. 4.7. Evolución de los valores medios de la Potencia de la Transformada Onditas (P_M) (en unidades arbitrarias).

4.4.4. Análisis de la evolución de la mediana y la variancia de las escalas que corresponden a la potencia máxima de las onditas en función del tiempo

Como ya se ha visto, la notación para las escalas correspondientes a los máximos coeficientes de onditas para cada tiempo (o número de muestra) es S_M , habiendo típicamente varios máximos, en cada una de los miles de formas de onda medidos, representados en las Fig. 4.2, 4.3. y 4.4. A cada uno de esos máximos le corresponde una escala asociada, las cuales se ha visto que pueden ser bastante coincidentes (al comienzo del desgaste) o pueden estar dispersas (en etapas de considerable desgaste). Por lo tanto, para cada una de las formas de onda se calculó la mediana para representar con un único número los distintos valores de S_M , notándose como $Med(S_M)$. Por otra parte, la dispersión de los valores de escala S_M se la representó a través de la variancia, simbolizada como $Var(S_M)$.

En función de la mediana y el promedio

En las Fig. 4.8 y 4.9 se muestra la evolución del parámetro S_M a través de su mediana ($Med(S_M)$) y de su variancia ($Var(S_M)$) en función del número de pasada (utilizado como indicador de tiempo), durante el experimento de torneado completo. La Fig. 4.8 muestra un cambio de tendencia con un repentino y marcado incremento entre las pasadas 3 y 4, a aproximadamente el 50% de la duración del ensayo, superpuesta a un gradual decrecimiento de la curva cuando el tiempo de desgaste aumenta. Dado que escalas altas (o frecuencias bajas) están involucradas en este notable cambio, esto probablemente denota un precursor del daño

generalizado del inserto, en la etapa mencionada (entre las pasadas 3 y 4) [Piotrkowski et al. (2005)].

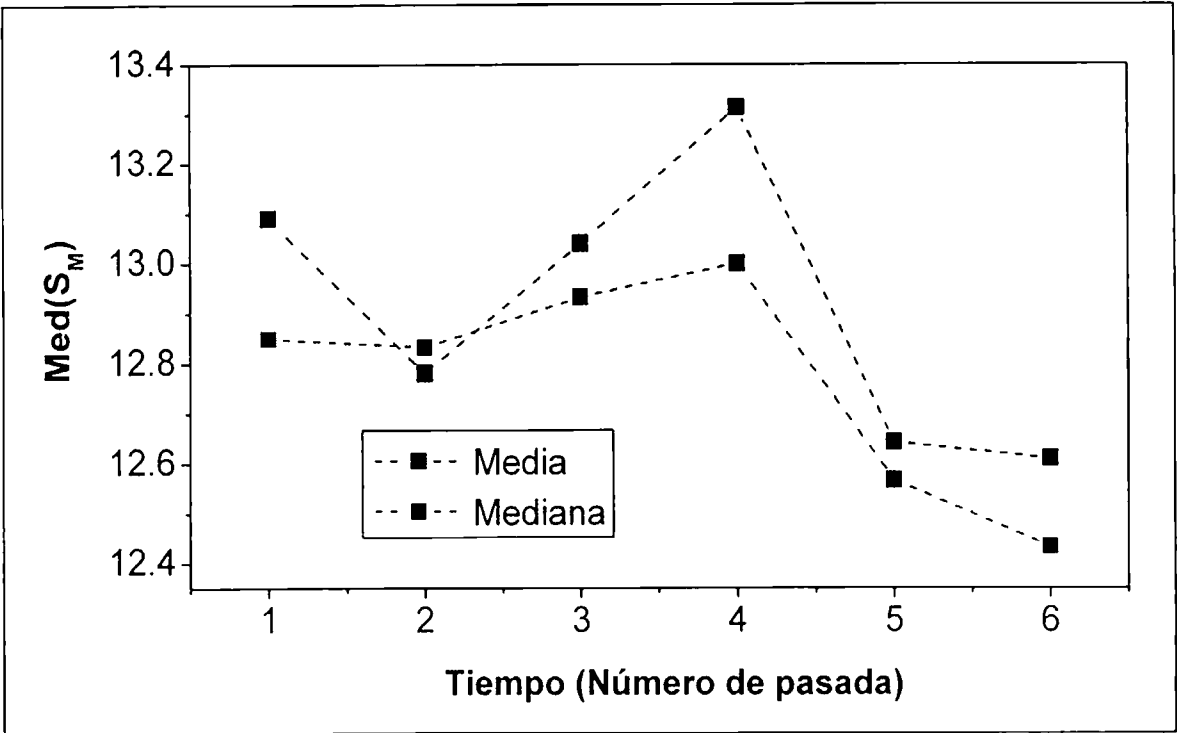


Fig. 4.8. Evolución del parámetro $Med(S_M)$ en función del tiempo como número de pasada.

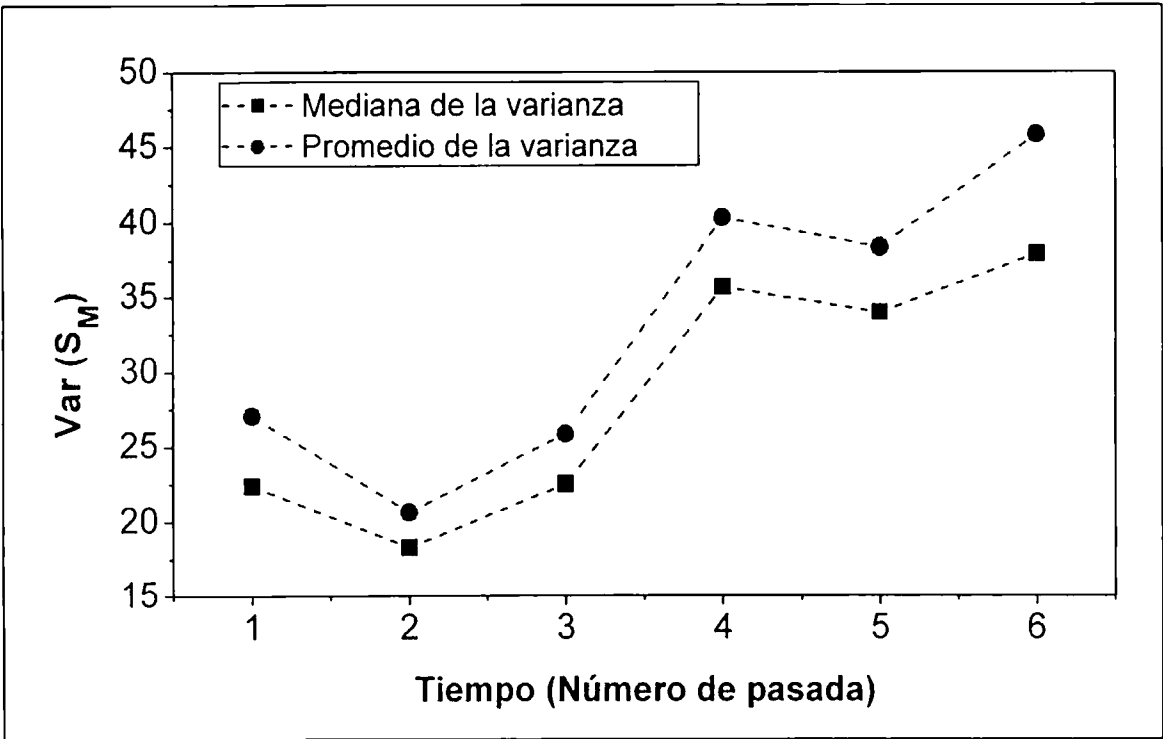


Fig. 4.9. Evolución del parámetro $Var(S_M)$ en función del tiempo como número de pasada.

Buscando una tendencia general, dejando de lado lo que ocurre con el pico por tratarse de otro fenómeno superpuesto, se observa un decrecimiento en la mediana de las escalas correspondientes a los máximos coeficientes (menor $Med(S_M)$), lo que implica un aumento de la frecuencia de las señales de EA con el aumento del desgaste de la herramienta (o números de pasada más altos). En la Fig. 4.9, se observa un incremento global de la $Var(S_M)$, pero también se observan cambios en la forma de un pico cerca del 50% del tiempo del ensayo completo. La

relación entre una función similar a la mediana del parámetro S_M ($Med(S_M)$) y los mecanismos de fractura fueron encontrados en un trabajo previo de daño de recubrimientos superficiales [Piotrkowski et al. (2005)].

En función de la media móvil

En las Fig. 4.10 y 4.11 se puede observar lo mencionado anteriormente sobre la naturaleza profundamente estocástica de las señales de EA reflejada en la distribución de la mediana de la escala correspondiente al coeficiente máximo para cada señal. En estas figuras es difícil observar una tendencia, dada la disimilitud entre valores muy cercanos en tiempo, que al promediarlos localmente en la aplicación de la media móvil se verá que muestran un comportamiento mejor definido. Las mayores discontinuidades de los valores de la $Med(S_M)$, en forma de picos hacia valores menores, se constató posteriormente al análisis que se debió a las señales de cada probeta y para cada pasada, de los instantes iniciales del ensayo. Exceptuando estas formas de onda de los transitorios del corte la $Med(S_M)$ hubiera sido más regular. Pero en esta parte del trabajo se comenzó el análisis tomando un muestreo de todas las señales existentes en el ensayo sin aplicar ningún criterio de selección respecto de las etapas del corte. Estas formas de onda incluían señales de EA tipo explosión, tipo continuas y tipo mixtas.

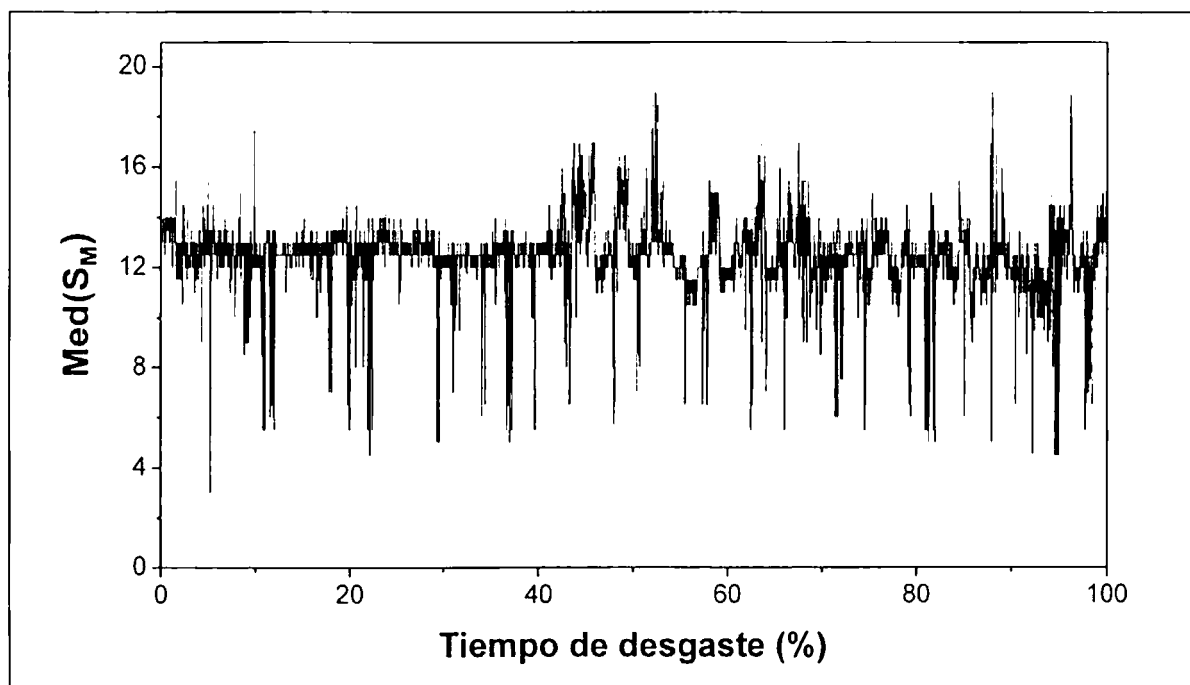


Fig. 4.10. Parámetro $Med(S_M)$ en función del tiempo de desgaste en porcentaje.

Entonces, se puede realizar un análisis equivalente al anterior de los valores de escala correspondientes a los coeficientes de onditas máximos de las señales de EA como una función del porcentaje del tiempo de desgaste (en lugar de promediar todos los valores de cada pasada), ahora utilizando el cálculo de la media móvil, es decir promedios locales de la variable $Med(S_M)$ en una ventana que se desplaza a lo largo del eje que representa al tiempo. En este caso se estudiaron las aproximadamente 5000 señales, con una ventana móvil de 300 puntos para los parámetros $Med(S_M)$ y $Var(S_M)$. Se tomaron las señales representadas en las Fig. 4.10 y 4.11, y se desplazó la ventana de cálculo de la media, actuando de filtro pasa-bajos, es decir suavizando las diferencias locales, y mostrando con mayor claridad las tendencias globales de los parámetros estudiados. Entonces en la Fig. 4.12 que representa a la mediana de S_M se visualizan tres zonas una inicial con pendiente casi nula, una intermedia que muestra un pico localizado, y otra final con pendiente decreciente, en la cual a un mayor desgaste le correspondería un aumento en la frecuencia donde se ubica la mayor parte de la energía en el espectro.

De igual manera observando en la Fig. 4.13 la media móvil de la varianza de S_M en función del tiempo de desgaste, también se pueden diferenciar tres zonas, una inicial de poca variación, una intermedia y otra final con pendiente positiva, es decir una mayor dispersión cuando es mayor el desgaste. Respecto de la zona intermedia de ambos gráficos, aparece un pico que denota una anomalía en el comportamiento. Esto ya se había puesto de manifiesto en la representación de la potencia de las ondas de las señales de EA (Fig. 4.7), que podría estar relacionada con la posible rotura o algún otro tipo de daño de la herramienta. Otra hipótesis podría ser la existencia de inhomogeneidades en el material que hubieran causado un golpeteo entre el inserto y la pieza, pero no es consistente en este caso ya que debería haber ocurrido simultáneamente en varias de las piezas maquinadas, hecho cuya probabilidad tiende a cero. Para corroborar la primera hipótesis se buscó en los registros de los ensayos realizados anteriormente a este trabajo de análisis, y se encontró [Maradei y otros (2002)] que al finalizar la última pasada, el inserto había quedado severamente desgastado. No hay registros de que la herramienta se hubiera dañado en alguna de sus partes de corte, lo que sí está evidenciado es el desgaste de la punta el cual fue registrado y mostrado en un gráfico en [Maradei (2001) Pág. 42].

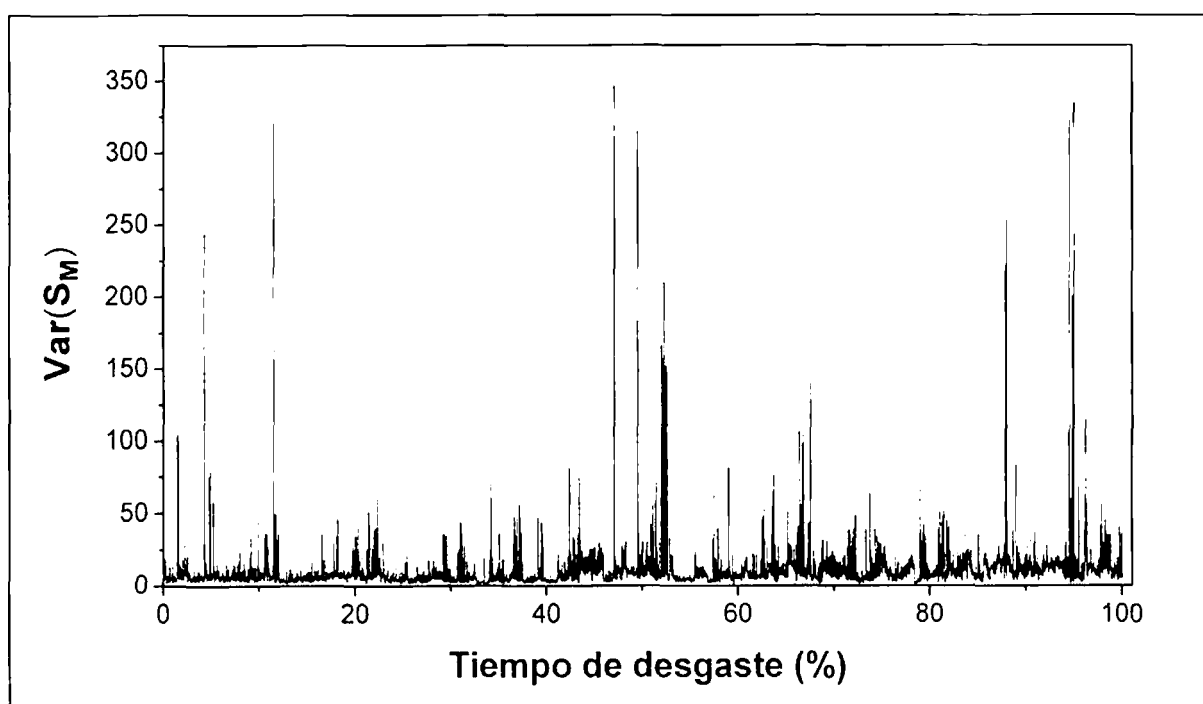


Fig. 4.11. Parámetro $\text{Var}(S_M)$ en función del tiempo de desgaste en porcentaje.

Volviendo a la tendencia general de los parámetros durante todo el ensayo, parecería haber una etapa donde el desgaste que se va produciendo influye poco, tanto en la mediana de S_M como en la varianza de S_M en los dos parámetros estudiados, hasta que ocurre algo que produce un aumento significativo de ambos parámetros (y de la potencia) y luego de esta etapa los dos parámetros empiezan a tomar una tendencia definida que se podría relacionar con el desgaste. Entonces para un incremento del desgaste de la herramienta se observó para un corrimiento de la frecuencia de los máximos de energía hacia valores mayores, en total concordancia con la bibliografía [Du y otros (1991)] mencionada en el capítulo anterior. También se observó una dispersión mayor de los valores de las frecuencias de estos máximos.

Además, en relación a lo discutido, se puede inferir del análisis de los parámetros de las señales de EA presentado por [Maradei (2001)] que a partir del comienzo de la denominada “zona final” en la presente tesis, la cantidad de señales de EA tipo explosión incrementa su proporción respecto de las señales tipo continua.

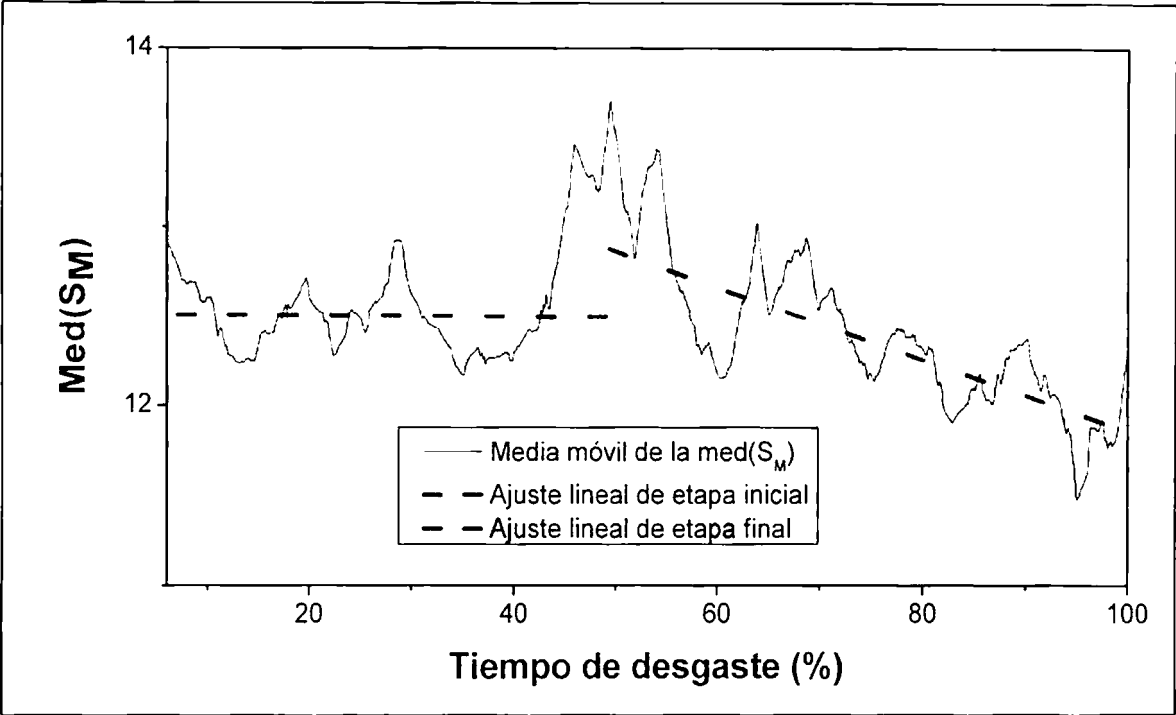


Fig. 4.12. Evolución temporal de la media móvil del parámetro $Med(S_M)$ calculado con 300 puntos sobre una cantidad aproximada de 5000 puntos (que representan cada forma de onda).

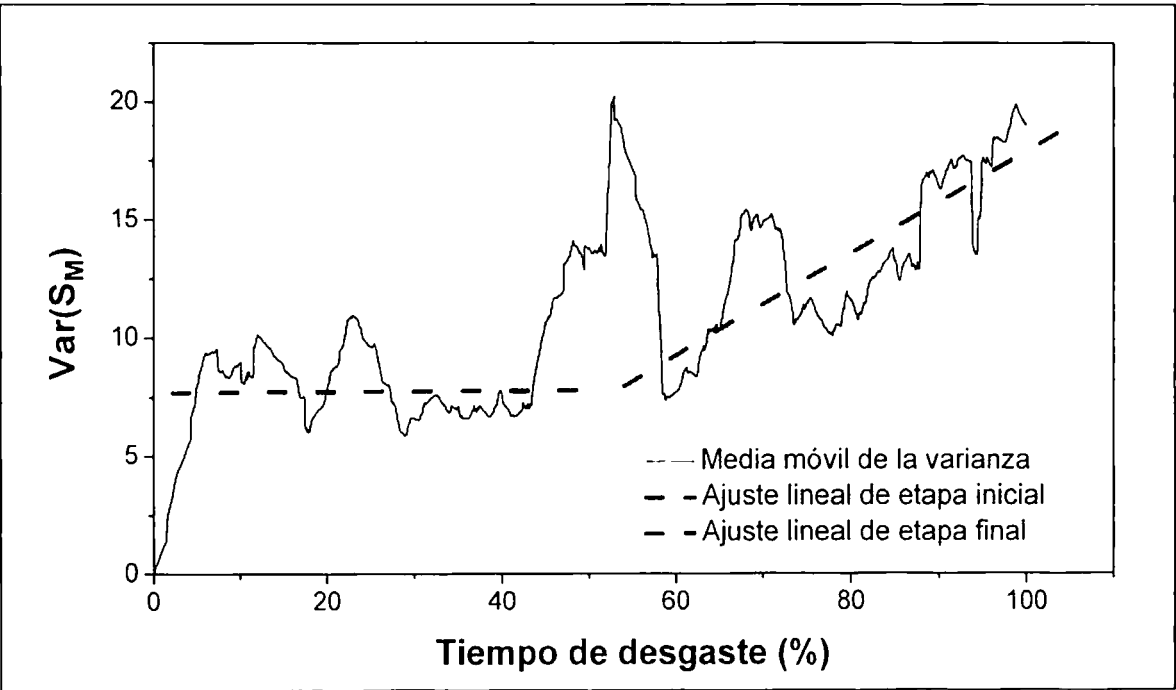


Fig. 4.13. Evolución de la media móvil del promedio del parámetro $Var(S_M)$ calculado con 300 puntos sobre una cantidad aproximada de 5000 puntos (que representan cada forma de onda).

Al realizar medianas y promedios en el tiempo de las escalas correspondientes a los coeficientes máximos de las onditas de las señales de EA, se podría plantear que se está haciendo un proceso similar a un espectro en frecuencia según la transformada de Fourier, ya que al promediar en el tiempo se está eliminando la ventaja de la dependencia temporal que proponen las onditas que las hacen indispensables para el análisis de señales no estacionarias. Ese razonamiento no puede aplicarse a la varianza de las S_M que contempla la no estacionariedad de la señal analizada y podría ser una buena herramienta para la clasificación de las señales en función del desgaste de la herramienta que las genera.

Luego de obtenida una metodología de estudio aplicable sobre las señales de EA, y para evaluar la utilidad de los mismos, se prosiguió el trabajo de tesis realizando mediciones de la EA en procesos de maquinado, tal como se detalla en el capítulo siguiente.

4.5 Conclusiones del Capítulo 4

La Emisión Acústica como técnica de sensado fue aplicada al estudio de procesos de maquinado de probetas de acero. Las señales adquiridas fueron estudiadas usando la Transformada ondita (o “Wavelet”). Se obtuvieron parámetros que demostraron su posibilidad de uso para la predicción del daño. Esos parámetros fueron la potencia de la TO y la escala a la cual esta potencia toma su valor máximo. No se ha mencionado la amplitud de los coeficientes de las onditas ya que no parece ser tan descriptiva como la potencia.

Valores críticos de los parámetros fueron obtenidos a aproximadamente el 50% de la duración del ensayo, la cual fue determinada según la norma ISO 3685. Este resultado probablemente indique una relación con daño global incipiente del inserto en dicho momento.

Aunque este capítulo describe una metodología de trabajo y no un estudio fehaciente del experimento analizado, los resultados obtenidos son prometedores en la búsqueda de parámetros que puedan predecir el desgaste de las herramientas de corte con los beneficios consecuentes en el ahorro de energía y la automatización de procesos industrial.

4.6 Bibliografía del Capítulo 4

- Addison P.S., "The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance", Institute of Physics Publishing, Bristol, 2002.
- D'Attellis C.E., M.T. Anaya, M.I. Cavallaro y F. Villaverde, "Introducción a las onditas", Nueva librería, 1995.
- Diei E.N. and D.A. Dornfeld, "Acoustic Emission From the Face Milling Process - the Effects of Process Variables", *ASME Trans., J. Eng. Ind.*, 109, 92-99 (1987a)
- Diei E.N. and D.A. Dornfeld, "Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Peripheral Milling", *ASME Trans., J. Eng. Ind.*, 109, 234-240 (1987b)
- Dornfeld D. A., "Investigation of Machining and Cutting Tool Wear and Chatter Using Acoustic Emission", *Review of Progress in Quantitative NDE*, 475-483 (1980)
- Dornfeld D., "Monitoring of the machining process by means of acoustic emission sensors", *Acoustic Emission: Current Practice and Future directions*, ASTM STP 1077 328-344 (1991)
- Dornfeld D. and E. Kannatey-Asibu, "Acoustic emission during orthogonal metal cutting", *Int. J. Mech. Sci.*, 22, 285-296 (1980)
- Dornfeld D., "Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing", *NDT International*, 25, 259-269 (1992)
- Du R., D. Yan and M.A. Elbestawi, "Time frequency distribution of acoustic emission signals for tool wear detection in turning", 4th World Meeting on Acoustic Emission and 1st International Conference on AE in Manufacturing, ASNT, Boston, 261-268 (1991)
- Gómez M.P., R. Piotrkowski, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Estimation of the Tool Condition by Applying the Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals" *Rev. of Prog. in QNDE*, 894, 635-641 (2007b)
- Grabec I. and P. Leskovic, "Acoustic Emission of a cutting process", *Ultrasonics*, 15, 17-20 (1977)
- Heiple C.R., S.H. Carpenter, D.L. Armentrout and A. P. McManigle, "Acoustic emission from single point machining. Source mechanisms and signal changes with tool wear", *Materials Evaluation*, 52, 590-596 (1994)
- Iwata K. and T. Moriwaki, "An Application of acoustic emission measurement to in-process sensing of tool wear", *Annals of CIRP*, 25, 21-26 (1977)
- Jemielniak K. and O. Otman, "Tool Failure Detection Based on Analysis of Acoustic Emission Signals", *Journal of Materials Processing Technology*, 76, 192-197 (1998)
- Kannatey-Asibu Jr. E. and D. A. Dornfeld, "A Study of Tool Wear Using Statistical Analysis of Metal Cutting Acoustic Emission", *Wear*, 76, 247-261 (1982)
- Li X., S. Dong and Z. Yuang, "Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring", *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 39, 1935-1944 (1999)
- Li X., "A brief review: acoustic emission for tool wear monitoring during turning", *Intl. J. of Mach. Tools and Manufacture*, 42, 157-165 (2002)
- Kakino Y., "Monitoring of metal cutting and grinding processes by acoustic emission", *J. Acoust. Emission*, 3, 108-116 (1984)
- Kannatey-Asibu Jr. E. and D. A. Dornfeld, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", *Trans. ASME, J. Engineering for Industry*, 103, 330-340 (1981)
- Maradei C., Tesis de Maestría: "Estudio de la condición de la herramienta durante el maquinado de piezas mediante emisión acústica", IT "Prof. J. Sabato", UNSAM (2001)
- Maradei C., R. Piotrkowski, E. Serrano and J.E. Ruzzante, "Monitoring of the tool condition with acoustic emission signal analysis using wavelets packets" *Insight* 44, 786 (2002).

- Maradei C., R. Piotrkowski, E. Serrano and J. Ruzzante, "Acoustic Emission Signal analysis in machining processes using wavelet packets", *Latin American Applied Research*, 33, 443-448 (2003)
- Moriwaki T., "Detection for cutting tool fracture by acoustic emission measurement", *Annals of CIRP*, 29, 35-40 (1980)
- Piotrkowski R., A. Gallego, E. Castro, M.T. Garcia Hernandez and J.E. Ruzzante, *NDT&E International*, 30, 260 (2005)
- Suzuki H., T. Kinjo, Y. Hayashi, M. Takemoto, and K. Ono, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals", *J. of Acoustic Emission*, 14, 69-84 (1996)
- Teti R., K. Jemielniak, G. O'Donnell and D. Dornfeld, "Advanced monitoring of machining operations", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59, 717-739 (2010)
- Kunpeng Z.P., S. Yoke and H. Geok, "Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 537-553 (2009)

Capítulo 5

Etapla preliminar del análisis de señales de maquinado. Parte 2

Puesta a punto y primeras mediciones de la aplicación de EA para la estimación del estado de la mecha y del corte en el taladrado de probetas planas de acero

En este capítulo se describen las primeras mediciones de un estudio de las señales de EA adquiridas en un proceso de taladrado con el fin de encontrar parámetros que permitan inferir el estado de desgaste de la herramienta. En este sentido se retoma el análisis realizado en el capítulo anterior para el caso del torneado y se evalúa su posibilidad de aplicación en iguales condiciones. Por otra parte se toman los parámetros característicos de la EA y se define uno nuevo denominado Potencia Media. En esta etapa del trabajo se realizaron 35 ensayos en dos condiciones extremas del estado de la herramienta, que fueron mechas nueva y rota.

También se analizan a partir de las señales de EA otros tópicos del maquinado como por ejemplo la caracterización del tipo de viruta formada en el corte, la detección de las distintas etapas en la realización de un agujero pasante, o el cálculo de la velocidad de rotación de la mecha a partir de una periodicidad en la señal.

La finalidad de este capítulo es mostrar las primeras etapas de la implementación de los experimentos y del análisis de las señales, y cuál fue el camino por el cual se fueron gestando los ensayos y métodos de análisis utilizados a posteriori en el siguiente capítulo.

5.1 Introducción

Como se ha expresado previamente en el Capítulo 2, el taladrado es uno de los procesos de maquinado más comúnmente utilizados en la industria de la manufactura [Jantunen (2002)] [Lin y Ting (1996)] [Subramanian y Cook (1977)]. Por ese motivo, es de especial interés el hallazgo de posibles indicadores del estado de la herramienta de corte, en este caso la mecha [Byrne (1995)]. Varios autores [Saini y Park (1996)] [Kannatey y Dornfeld (1982)] expresan, para el caso de torneado, que la generación de EA es un proceso complejo dada la interacción de muchos factores que ocurren en el corte. Esta idea puede extenderse con mayor énfasis al taladrado, dado que para su estudio se deben tener en cuenta que los filos de corte son dos, sumando además el filo del cincel, y el contacto permanente de la mecha con la pieza mientras avanza en la realización del agujero, que expande el efecto de múltiples fuentes de EA. Esto ha llevado a que el problema se aborde mediante estudios de tipo empírico y no se encuentren en la literatura trabajos de EA en taladrado en los que se haga una descripción analítica.

El presente trabajo aborda el estudio de la EA generada en un proceso de taladrado con mechas con dos condiciones muy diferentes respecto del estado de sus filos de corte. Esta investigación comienza aplicando la metodología desarrollada en el Capítulo 4, para el análisis en frecuencia de las formas de onda de la EA generada durante el torneado [Gómez y otros (2007a)] [Iwata y Moriwaki (1977)] [Du y otros (1991)], pero se muestra que este método no llega a buenos resultados para su implementación directa al caso del taladrado, probablemente por la complejidad del proceso de corte mencionada previamente y por la disimilitud de las señales tipo estallido y las tipo continuo que se generan para los dos casos de distinto estado de la mecha aquí analizados. Esta parte del trabajo se expone como un ejemplo de que una metodología que es apropiada para un caso de corte puede no serlo para otro de mayor complejidad. En el próximo capítulo se mostrará una posible solución para su correcta aplicación al taladrado.

Durante la realización de ensayos de taladrado, se puede observar que la EA producida al comienzo del proceso, cuando la herramienta se acerca y toca la pieza, es predominantemente del tipo estallido (o “burst”) [Li (2002)]. Luego, cuando la herramienta comienza a cortar, aparecen muchos eventos de notablemente menor amplitud que los anteriores que incrementan rápidamente su tasa de ocurrencia dando una EA del tipo continua, que se suma como un fondo a las señales de tipo explosión. Como ya se ha mencionado previamente las señales de tipo continua demuestran la activación de mecanismos de fricción y deformación plástica [Carpenter y otros (1992)] [Moriwaki (1980)] [Heiple y otros (1994)]. Ambas se irán incrementando con el área de acción de la mecha, por un lado cuanto mayor sea la viruta involucrada mayor será el volumen a deformar y por otro lado mayor será la superficie de fricción. Luego al penetrar la mecha en el agujero aparecerá el rozamiento lateral en las paredes del mismo [Gong y otros (2005)], que será significativa en cuanto la profundidad se vuelva una magnitud relevante. Las emisiones de tipo estallido de mayor amplitud superpuestas a la señal continua estarán producidas por otros mecanismos actuantes como el choque de los filos con irregularidades del material de la pieza, la rotura de la viruta o el golpe de esta en las cercanías del conjunto que forman la pieza maquinada y el sensor de EA [Miller y otros (1987)].

De esta manera, cuando se analiza la distribución de los tipos de señales de EA para un dado ensayo de taladrado se puede observar que generalmente una gran cantidad de las señales de EA adquiridas son del tipo continua, por lo que se debe tener cuidado en qué tipo de parámetros serán utilizados para su estudio (por las razones estipuladas en el Capítulo 1). Por lo tanto hay que buscar que los parámetros a estudiar no dependan de la duración si se busca realizar comparaciones entre señales de distinto tipo que puedan tener distinta duración.

Los parámetros característicos de la EA que típicamente no dependen de la duración de la señal son la amplitud y el valor cuadrático medio (RMS). Pero para el desarrollo de este trabajo se encontró en la literatura otro parámetro que suele ser utilizado, denominado Frecuencia Media (FM), que se construye a partir del cociente entre el número de cuentas de la señal de EA (“ring

down counting”) y la duración de la señal de EA [PAC (2007)] [Ohtsu (2006)]. Ese parámetro característico da como resultado la información de cuantos cruces por el umbral realiza la señal de EA por unidad de tiempo, pudiéndolo relacionar con una frecuencia. En el Capítulo 1 se mencionó un parámetro denominado “energía MARSE” (MARSE corresponde a las siglas en inglés de “área medida bajo la envolvente de la señal”) que en la nomenclatura de la EA se denomina “energía”. Este es uno de los más utilizados en la literatura, con buenos resultados en el estudio del taladrado [Everson y Cheraghi (1999)]. Con la misma intención de construir otro parámetro independiente de la duración de la señal, se definió en este trabajo de tesis la “Potencia MARSE media” como el cociente entre la energía MARSE y la duración de cada hit de EA. Este nuevo parámetro derivado o secundario fue denominado de manera simplificada como Potencia Media (PM) [Gómez y otros (2007b)]. El término “media” se refiere a que representa el cociente de dos intervalos uno de la energía MARSE y otro de la duración del hit.

Una vez definidos los parámetros mencionados previamente, se analizó la evolución temporal de la señal de EA producida desde el comienzo hasta el final del proceso de corte.

Continuando lo observado por Diei y Dornfeld (1987), en este capítulo se muestran métodos y procedimientos a partir de los cuales las señales de EA pueden brindar información importante respecto del proceso de corte, más allá del estudio del estado de la herramienta, que es la parte central de este trabajo de tesis. Los casos mostrados y discutidos al final del capítulo son meramente descriptivos y cualitativos, y están orientados a la conceptualización de la potencialidad del método, dadas las limitaciones de las mediciones experimentales realizadas en las experiencias descritas en este capítulo, que no permitieron profundizar el aspecto cuantitativo de la investigación. Algunos de estos análisis son retomados en el capítulo siguiente con mayor formalidad. De esta manera, se pudo inferir el estado de las distintas etapas del corte en función de la evolución temporal, diferenciar el tipo de viruta por distintos métodos, medir las velocidades de rotación y avance de la mecha, y detectar el momento de la rotura de una mecha (craterización de los filos), todo a partir de la EA. La aplicación de estos conceptos y métodos podría ser de gran utilidad en la automatización de las máquinas herramientas.

5.2 Método Experimental

Para la ejecución de los primeros ensayos de taladrado se construyeron tres probetas planas de acero, sobre cada una de las cuales se efectuaron un total de 35 agujeros. Las mechas utilizadas en el taladrado representaron dos condiciones extremas del estado de sus filos denominados mechas “nueva” y “rota”. Para esto se recurrió a cuatro mechas de iguales características, las cuales fueron en primer lugar utilizadas como nuevas. Luego, una de ellas al ser sometida a condiciones desfavorables sufrió la rotura de sus dos filos y representó la condición de “rota”.

Para todos los casos, la EA fue registrada de tres maneras, midiéndose: las formas de onda, los parámetros característicos (energía, duración, amplitud y número de cuentas) y la señal de “streaming” de muestreo continuo (transferencia a disco a tiempo real). Las señales de EA adquiridas durante el corte fueron procesadas de distintas formas para buscar una relación entre los resultados obtenidos y los distintos estados de las mechas utilizadas para el corte. A continuación se describen el desarrollo de los experimentos y los métodos utilizados para el procesamiento de las señales. Se realizaron ensayos complementarios a los del desgaste al comprobar que podía obtenerse importante información del proceso de corte más allá del estudio del desgaste de la herramienta. De esta manera, se hicieron 4 agujeros pasantes en los cuales se monitorearon las etapas del corte.

5.2.1 Preparación del experimento

5.2.1.1 Preparación de las probetas

Dos de las probetas utilizadas en el experimento, denominadas A y B, fueron preparadas con un acero 1010 de baja calidad, con una microestructura poco homogénea. La restante, denominada

probeta E, se construyó con un acero 1020 comercial, con mayor homogeneidad en su microestructura, tanto en el tamaño de grano como en la distribución de la fase perlítica. La forma de las probetas está representada en la Fig. 5.1, en la cual se muestra un croquis y una fotografía de una probeta taladrada. El tamaño de las probetas fue de 155 mm de longitud, 67,3 mm de ancho y 16,5 mm de alto para los casos A y B y 16,7 mm de alto para la probeta E. En las Figs. 5.2 y 5.3 se pueden observar fotografías de la microestructura del material obtenidas a través de un microscopio óptico.

Los estudios metalográficos de las probetas mostraron una inhomogeneidad importante, siendo las probetas A y B de un acero de inferior calidad a la que se comercializa en la actualidad. Se les midió la dureza y se obtuvieron resultados con mucha dispersión para las probetas A y B y un poco menor para la probeta E (ver Tabla V.I). El lugar de cada agujero fue marcado con una mecha de pequeño diámetro en una posición preestablecida según simetrías y se siguió una secuencia de taladrado para poder analizar la dependencia de los resultados respecto de la geometría.

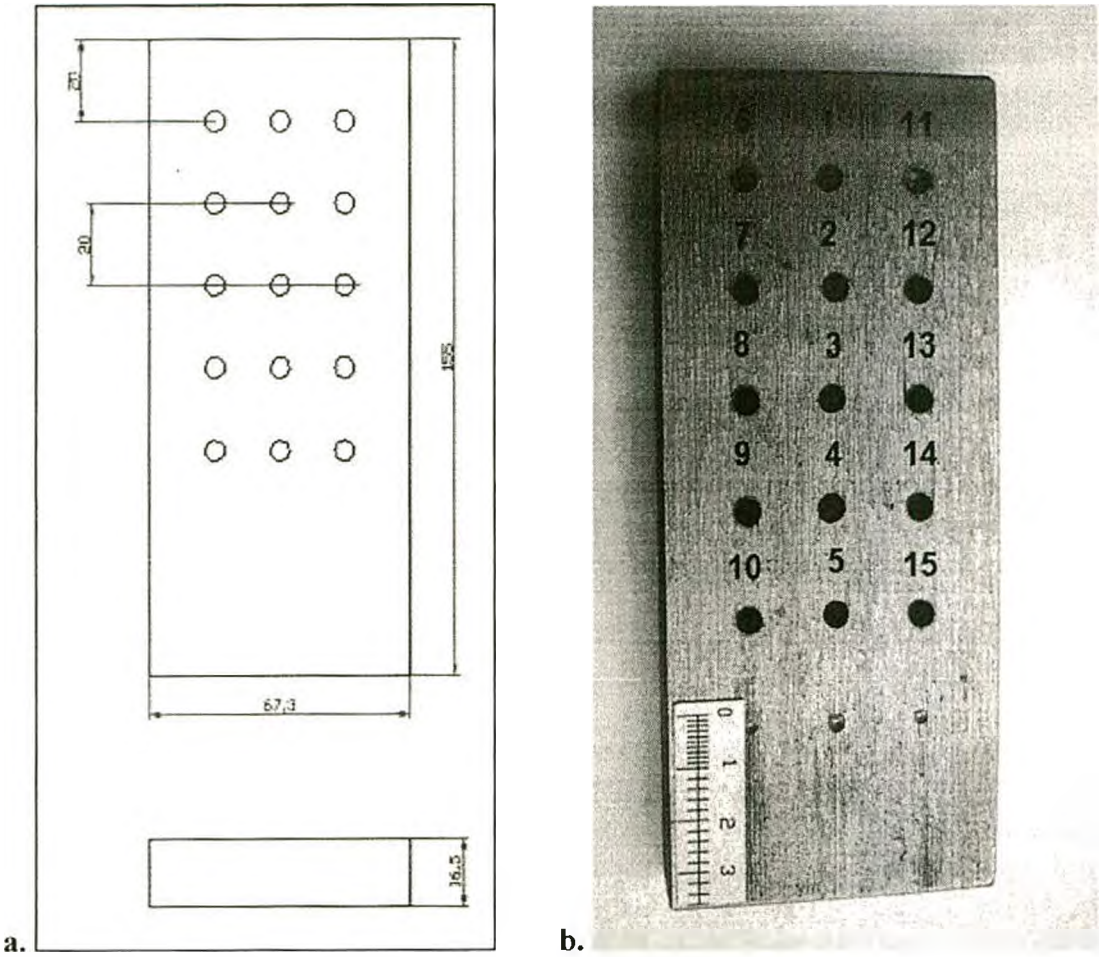


Fig. 5.1. Probeta taladrada. a. croquis (referencias en mm). b. Fotografía (escala en cm).

Tabla V.I Características de las probetas.

Probeta	Tipo de Acero	Microestructura	Dureza Brinell
A	SAE 1010	Poco homogénea	225 ± 25
B	SAE 1010	Poco homogénea	235 ± 25
E	SAE 1020	Homogénea	214 ± 10

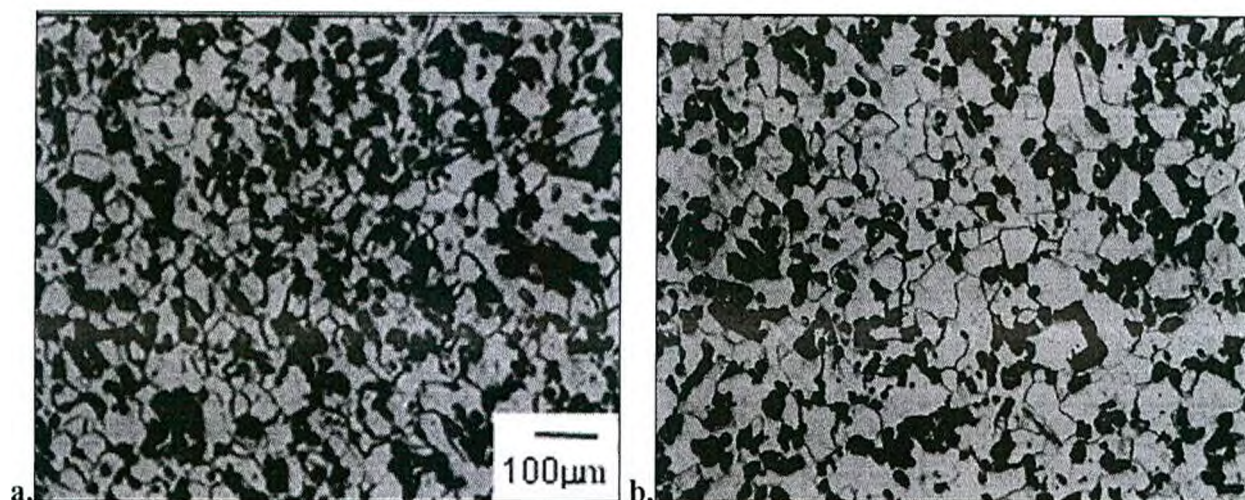


Fig. 5.2. Micrografías del Acero 1010 de las probetas A y B. En a y b se observan dos zonas de la misma muestra, con una distribución poco homogénea de perlita y de tamaño de grano. (Ambas con igual aumento).

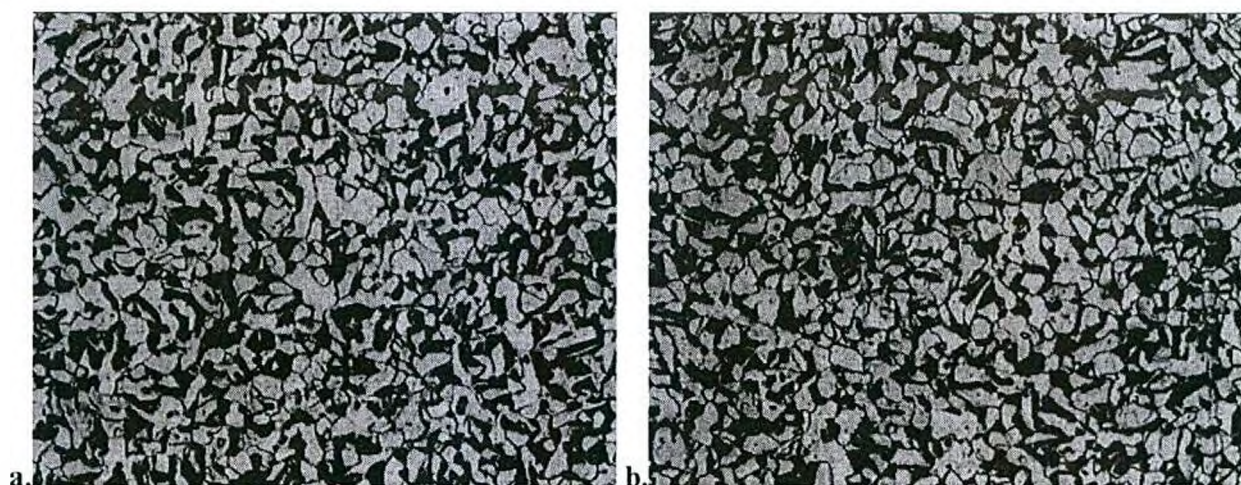


Fig. 5.3. Micrografías del Acero 1020 de la probeta E. En a y b se observan al microscopio dos zonas de la misma muestra, se distingue una distribución más homogénea de perlita y de tamaño de grano. (Igual aumento que la Fig. 5.2)

5.2.1.2 Preparación de las mechas “patrón de desgaste”

Los dos estados de mechas utilizadas en los ensayos representan casos extremos de la evolución del desgaste correspondientes a mechas con los filos de corte nuevos y con los mismos rotos. Durante el trabajo se utilizará la notación N y R para indicar las condiciones de las mechas “Nueva” y “Rota”. Estos casos de mechas fueron denominados “patrones de desgaste” (o “mechas patrón”). Fotografías de ambos estados se pueden observar en la Fig. 5.4 donde se muestran la mecha rota y las tres mechas nuevas utilizadas en el presente capítulo.

Para representar el estado de mecha nueva (con filos sanos) se utilizaron tres mechas en el experimento, y eso correspondía a la mecha tal como resultó de su manufactura. Luego, el estado de mecha rota fue obtenido tal como se describe a continuación. La primera mecha utilizada denominada “mecha 1”, inicialmente sana, comenzó a deteriorarse luego de efectuar el primer agujero, realizado en los ensayos de las probetas de material de peor calidad. A continuación, durante el transcurso del segundo agujero, la mecha sufrió una rotura que le produjo la craterización de sus dos filos. Por tal razón, seguidamente se tomó esa mecha como patrón de mecha rota y se la denominó “mecha R1”. La valiosa información del momento de la rotura luego fue analizada. Las mechas denominadas “N2”, “N3” y “N4” fueron utilizadas para representar el caso de mecha nueva. A continuación al detallar la secuencia de taladrado se dará información más precisa al respecto.

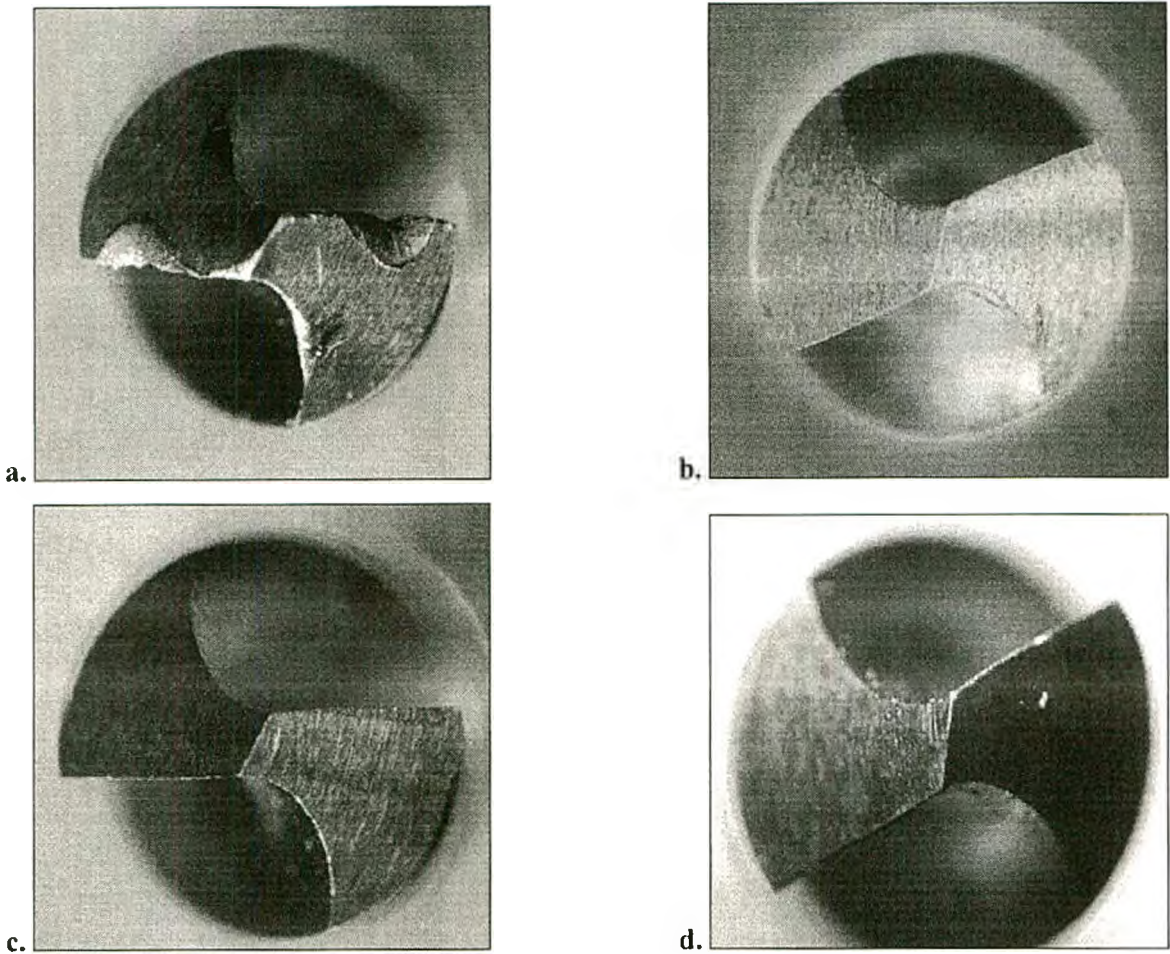


Fig. 5.4. Fotografías de las mechas patrón de 5 mm de diámetro. **a.** Mecha 1 (con filos dañados cráter). **b.** Mecha 2 (Nueva) **c.** Mecha 3 (poco uso). **d.** Mecha 4 (nueva).

5.2.1.3 Equipo de EA

5.2.1.3.1 Hardware

Se utilizó un equipo de EA marca PAC modelo PCI-2, que es un sistema de adquisición de datos de EA y de procesamiento de señales de dos canales. Este se constituye en una placa PCI de tamaño completo que se coloca en una PC de características estándar. La conexión de la placa con la PC es a través de un Bus PCI de 32 bits por el cual cada canal independientemente transfiere datos a alta velocidad con acceso DMA.

La placa adquiere las señales desde las dos entradas, las cuales pueden proveer alimentación a los preamplificadores en un modo denominado “fuente fantasma” de +28 Volts respecto de masa. Las señales son acondicionadas y pueden ser amplificadas (0 dB o +6 dB) por un modulo interno, y luego pasan por bancos de filtros programables, cuatro del tipo pasa alto (de cuarto orden) y hasta seis pasa bajo (de sexto orden). Las señales, hasta este punto analógicas son digitalizadas con un conversor A/D de 18 bits, en cada canal, que provee una muy alta resolución con muy bajo ruido, con un rango dinámico mayor que 85 dB y tasas de muestreo de hasta 40 millones de muestras por segundo. Las señales digitales que salen de los conversores A/D van a una FPGA DSP que procesa los parámetros, extrae las formas de onda en archivos de hasta 15k (15360 puntos) y maneja la información a la interfase PCI.

La transmisión de datos a tiempo real a disco de la PC también es posible a través de un modo denominado “AE data streaming” que permite la grabación continua con una tasa de hasta 10 Mmuestras por segundo en un canal o la mitad en cada uno de los dos canales si se usan en simultáneo.

El sistema también permite la adquisición de dos entradas paramétricas con un conversor A/D de 16 bits y una tasa de muestreo de hasta 10000 lecturas por segundo. La primera provee un canal

con acondicionamiento para instrumentación con control de ganancia, de offset y opciones de filtrado, con una entrada diferencial. La segunda entrada es simple y con un rango de +/- 10 V. La placa consta de conectores BNC para ingresar las señales de EA provenientes de los preamplificadores. También posee un conector de cuarenta pines, que se coloca en la parte trasera de la PC, que permite ingresar señales de parámetros externos, y además admite ocho entradas y salidas digitales.

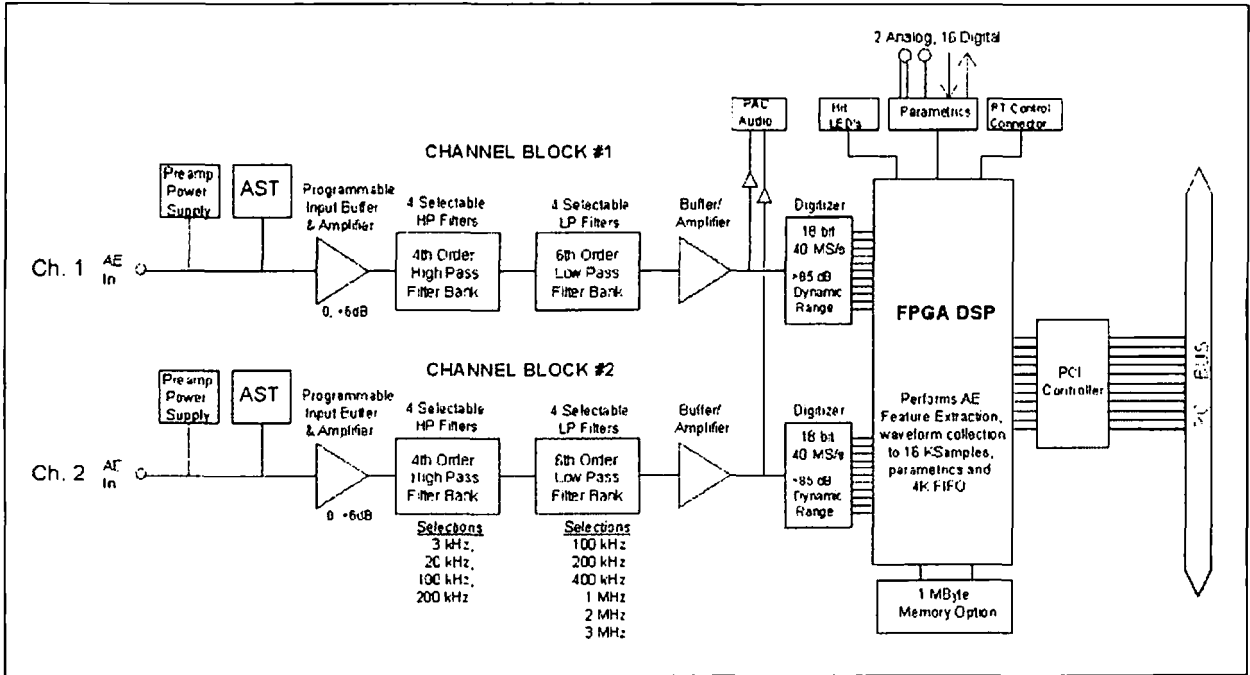


Fig. 5. 5. Diagrama en bloques del sistema de EA. [PAC (2007)]

5.2.1.3.2 Software

El manejo del hardware descrito se realiza por medio de un programa marca PAC modelo AEWIN para PCI-2. Este permite la selección de los dispositivos electrónicos como habilitación de entradas, filtros, alimentación de los preamplificadores, selección de datos a medir: parámetros, formas de onda y “data streaming”, algunos de estos o las tres opciones. Mientras se corre el programa durante la medición, se pueden graficar en la pantalla de la PC los parámetros y las formas de onda, así como tablas de datos que muestran la evolución de los parámetros a tiempo real. Los parámetros entregados por el sistema más comúnmente utilizados están listados en la Tabla V.II. Estos pueden almacenarse en forma de tablas multi-paramétricas en las cuales se detalla el tiempo de ocurrencia de cada hit de EA y los valores de los correspondientes parámetros preseleccionados para cada hit (los cuales están listados en la tabla I). Luego de realizada la medición los datos son guardados en un archivo de extensión “.DTA” que puede ser cargado nuevamente en un modo de repetición, o se pueden extraer los datos del mismo, los parámetros como tablas en ASCII y las formas de onda como listas de caracteres ASCII con los valores del voltaje generado en el sensor luego de ser amplificado. El software permite la configuración del tiempo de muestreo, el tamaño de la forma de onda (la cantidad de puntos), las frecuencias de los filtros, el umbral, la ganancia, los parámetros externos, y que parámetros se quieren medir. Pero también permite configurar unos tiempos característicos de la señal de EA que son el HDT “hit definition time” o tiempo de definición del hit, el HLT “hit lockout time” o tiempo de bloqueo del hit y el PDT “peak definition time” o tiempo de definición del pico del hit. Hay diversos criterios para fijar estos tiempos [PAC (2007)], que actúan como filtros de posibles señales espurias, rebotes o alguna otra clase de ruido.

5.2.1.3.3 Sensor de EA, acoplante y preamplificador

Para detectar las ondas elásticas de EA se utilizó un sensor de EA marca PAC modelo AE 61, el cual se montó sobre cada una de las probetas ensayadas, colocando vaselina de uso comercial como acoplante entre el sensor y la probeta. La salida del sensor fue conectada a un preamplificador marca CISE de 40 dB de ganancia (100x), que acondicionó la señal eléctrica generada por el sensor para ser correctamente recibida por el equipo de EA PCI-2.

TABLA V.II Parámetros característicos de las señales de EA

CARACTERÍSTICA	RESOLUCIÓN	UNIDADES	RANGO
Tiempo del hit	0,250	Microsegundos	0-407 días
Amplitud	1 dB	1 dB	10-100 dB
Energía (PAC)	1 cuenta	10 μ V.s/cuenta	0-65535
Numero de cuentas	1 cuenta	cuentas	0-65535 cuentas
Tiempo de subida	1 μ s	microsegundos	0-65,5 ms
Duración	1 μ s	microsegundos	0-1000 ms
Energía absoluta	1 cuenta	9,31 x 10 ⁻²² Joules	2,61.10 ⁻⁸ J
Fuerza de la señal	1 cuenta	3,05 pV.s	0-1,31.10 ⁸ pV.s
Cuentas hasta el pico	1 cuenta	cuentas	0-32768 cuentas
Potencia parcial	1 cuenta	% de la potencia total	0-100 %
RMS	0,0002V	V	0-6 V
ASL	1 dB	1 dB	0-100 dB
Umbral	1 dB	1 dB	14-99 dB

5.2.2 Realización de la experiencia

La disposición experimental para la medición de la EA durante el taladrado se muestra en el diagrama en bloques de la Fig. 5.6. En la Fig. 5.7 se observa una fotografía del montaje experimental en el taller. Los equipos, componentes y elementos utilizados fueron los siguientes:

- 4 mechas de acero rápido de 5 mm de diámetro marca Dormer.
- Taladradora vertical marca FIRST modelo LC-50 con Avance continuo.
- Sensor de EA marca PAC modelo AE 61.
- Preamplificador 40 dB marca CISE Nro. 20.
- Equipo de EA marca PAC modelo PCI-2.

Los datos importantes de configuración de la medición son:

- Velocidad de rotación del taladro $V_{ROT} = (428 \pm 7)$ RPM= (7,13 $\pm$ 0,12) vueltas/s
- Velocidad de avance $V_{AV} = (0,285 \pm 0,005)$ mm/s
- Profundidad estimada de agujero: 10 mm.
- Tensión de umbral: 27 dB (2,5 mV).
- Tasa muestreo: 5.10⁶ muestras/s.
- Cantidad de muestras para cada hit: 15360 puntos (3 ms).
- Modo de adquisición de EA: parámetros, formas de onda y “streaming”.

La velocidad de rotación de la mecha fue medida con un tacómetro marca Deumo (escala 40-500), arrojando un valor de (428 $\pm$ 2) RPM. Dado que las mediciones debían realizarse en

distintas sesiones en distintos días, se calibró la regleta de la máquina con el instrumento de precisión haciendo una marca a la velocidad de rotación de los ensayos. Luego para cada sesión de ensayos se volvió a ajustar la velocidad, por lo que se estimó un mayor error de aproximadamente ± 7 RPM.

La velocidad de avance fue calculada por una relación de velocidades dada por el fabricante de la maquina fresadora establecida en $V_{AV}(\text{mm/s})=0,04 \text{ mm/vuelta} * V_{ROT}(\text{vueltas/s})$.

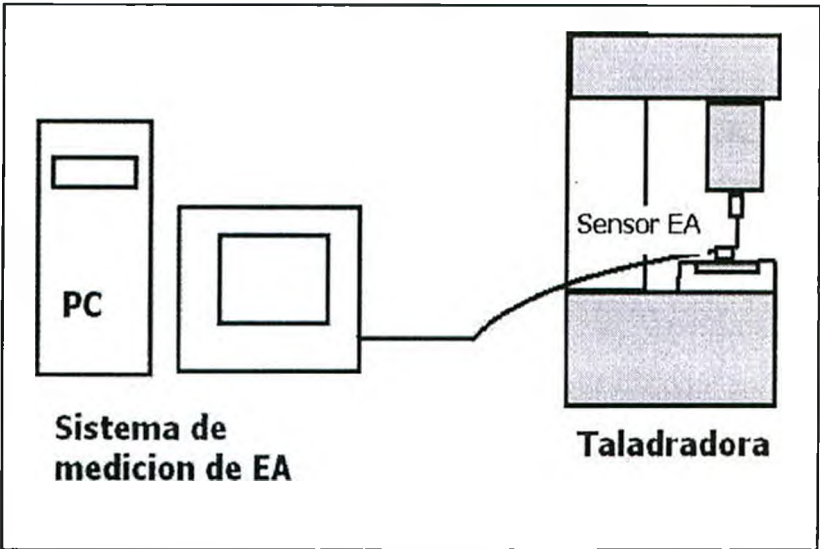


Fig. 5.6. Diagrama en bloques del montaje de la experiencia.

Cada uno de los ensayos fue registrado en video digital con una cámara JVC modelo GV 317, a fin de evaluar el estado del corte, visualizando la salida de la viruta para poder realizar una clasificación del tipo de esta. En la Fig. 5.6 se puede observar la disposición experimental de la cámara.

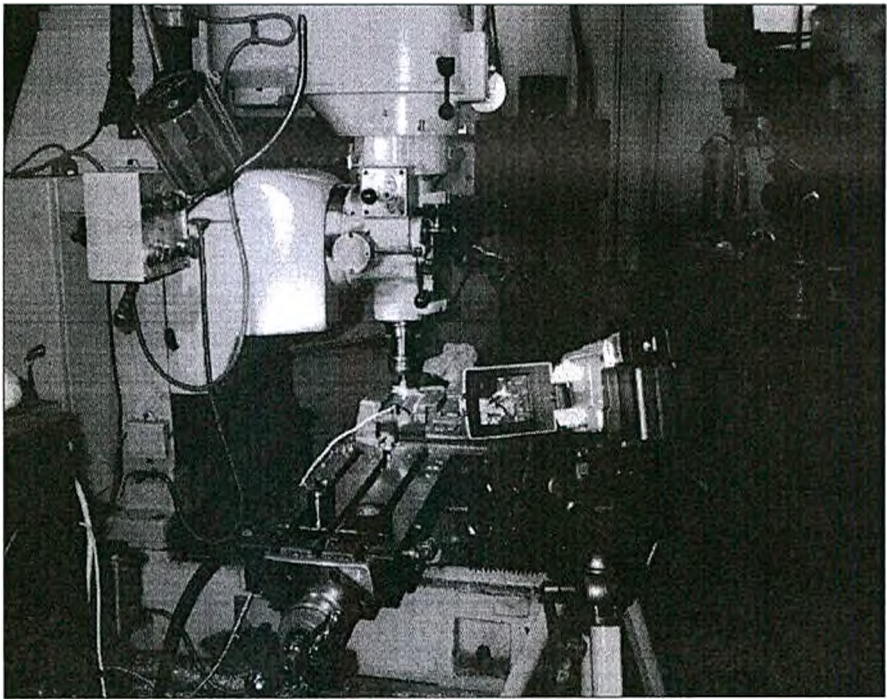


Fig. 5.7. Montaje en el taladro de la probeta instrumentada.

Posteriormente de las mediciones se sincronizó la secuencia de video con las señales de EA tomado como referencia el instante de finalización del ensayo de taladrado que se producía de manera abrupta cuando la máquina subía rápidamente el cabezal en el cual estaba colocada la

mecha. Este transitorio quedaba registrado en la medición de EA lo que facilitó la correcta sincronización de ambas informaciones. La tasa de muestreo de la imagen fue de 20 imágenes por segundo.

5.2.2.1 Secuencia de taladrado

Se taladraron secuencialmente las tres probetas, comenzando la probeta A con la mecha 1, que se comenzó a romper en el primer agujero, y se deterioró notablemente en el segundo pasando de la condición nueva (N1) a rota (R1), mientras se realizaban los agujeros del 1 al 5 de la hilera central. A continuación, con la mecha 2 en condición de nueva (N2), se realizaron en la probeta B los agujeros de las hileras laterales del 6 al 10 y del 11 al 15. Luego con la mecha 4 nueva (N4) se taladró la hilera central de la probeta B. En una siguiente tanda se taladraron la probeta E con la mecha 3 nueva (N3) en la hilera central los agujeros de 1 a 5, y con la mecha 1 rota (R1) los agujeros del 6 al 10, para finalmente con la mecha 3 (N3) agujerear la hilera lateral del 11 al 15. En total se realizaron 35 ensayos, uno por cada agujero.

Durante cada ensayo de taladrado para cada agujero se midió la EA y se registró la señal de video. Posteriormente los datos fueron analizados según los procedimientos descriptos a continuación.

5.2.2.2 Ensayos complementarios

Además de las mediciones anteriores, se realizaron nuevos ensayos con el fin de complementar el estudio de la detección de las etapas del taladrado por medio de la EA, para el caso del agujero pasante. Para esto, en la probeta E, a continuación de los agujeros realizados previamente en las posiciones 11, 12, 13 y 14, se prosiguió el taladrado de los mismos realizando 4 agujeros pasantes. El procedimiento fue centrar la mecha dentro del agujero preexistente y luego retraer la punta de la mecha hasta afuera del mismo, posición desde la cual se largó el ensayo. Luego la mecha se introdujo en la cavidad, impulsada por el avance automático de la máquina hasta llegar a hacer contacto con el material a cortar, para extraerlo y después salir por la cara posterior a la de ingreso. En la Fig. 5.8 se observa un croquis del perfil de la probeta pre-agujereada, y la posición inicial de la mecha para un agujero en el ensayo de agujero pasante.

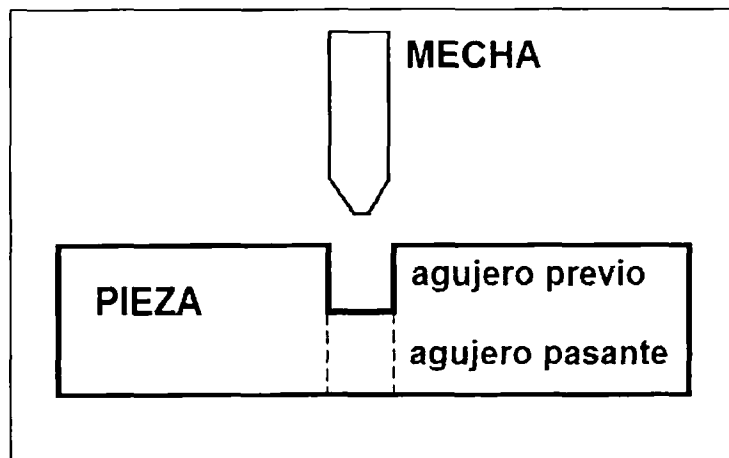


Fig. 5.8. Perfil de la probeta y mecha al comienzo del agujero pasante.

5.2.3 Procedimientos para el análisis de las señales medidas

El análisis de las señales de EA generadas en el proceso de taladrado de distintas probetas, con distintas mechas, realizado en esta parte del trabajo, puede dividirse en tres partes, siendo estas: el análisis de las formas de onda ("waveforms") o fragmentos de señal de EA, el análisis de los parámetros característicos de las señales de EA y el estudio de las señales de "streaming". Estos tres procedimientos son descriptos a continuación.

5.2.3.1 Análisis de las formas de onda

Las formas de onda de la EA, registradas para los 35 ensayos fueron almacenadas en una computadora y procesadas según los algoritmos utilizados en el capítulo anterior para estudiar la evolución del espectro de frecuencias en función del grado de desgaste. En este caso no se estudia la evolución continua del desgaste como en el capítulo previo, sino que se precipitó el desgaste en una de las mechas y se la tomó como patrón o caso de una forma y nivel de desgaste determinado. Entonces se modificó levemente el programa de MATLAB utilizado en el capítulo anterior, y se calcularon los coeficientes onditas para las señales de EA de los casos “nueva” y “rota”. De esa manera se obtuvieron la mediana y la varianza del parámetro S_M ($Med(S_M)$ y $Var(S_M)$) de los patrones de onditas de cada forma de onda de EA de cada ensayo. Luego se graficaron y se analizó el comportamiento en función del estado de la herramienta.

5.2.3.2 Análisis de los parámetros característicos

Además se estudiaron los parámetros característicos de la señal de EA que provee el equipo utilizado, para el caso de los 35 ensayos realizados. Para esto se procesaron los resultados de la Amplitud, el valor cuadrático medio (RMS), la Energía, y la Duración de las señales de EA que superaban el umbral prefijado antes de los ensayos. Por tratarse de señales continuas y transitorias simultáneamente, también se calcularon parámetros complementarios como la Frecuencia Media (FM) y la Potencia Media (PM). Esta última fue definida en el desarrollo de este trabajo, buscando una manera de eliminar la dependencia con el tiempo de la energía MARSE de la EA, para poder representar las señales continuas a partir de un parámetro que no dependiera de la duración de la señal de EA adquirida. Como se ha visto en el Capítulo 1, la frecuencia media se define como el cociente entre el número de cuentas y la duración de los hits, mientras que la potencia media se ha definido como la razón entre la energía y la duración.

Durante la realización de los ensayos, el software del equipo de EA fue configurado para que se graficaran ciertos parámetros característicos de las señales de EA que mostraran la actividad del proceso de corte en la pantalla de la PC que controlaba el hardware de adquisición. Además se almacenaron tablas con los parámetros seleccionados para su medición. Luego del ensayo se extrajeron las tablas de datos en formato ASCII para cada ensayo (cada agujero) y se calcularon a partir de los parámetros medidos: la frecuencia media, la potencia media y la amplitud en milivoltios. Cabe aclarar que la parametrización de la amplitud que entrega el equipo de EA está dada en dB con una resolución de 1 dB, lo que lleva a una muy baja resolución al pasarlo a milivoltios, cosa que no ocurre cuando se digitalizan las formas de onda que tienen una resolución mucho mayor. Una vez obtenidos todos los parámetros característicos necesarios estos fueron graficados para relacionarlos con el estado de las mechas utilizadas para cada caso. Los estudios realizados a los parámetros de las señales de EA en pos del estudio de la caracterización del proceso de taladrado y del estado de la herramienta se detallan a continuación.

5.2.3.2.1 Evaluación de las etapas del taladrado a partir de los gráficos de los parámetros característicos de la EA.

El estudio de los parámetros característicos se inició graficando la amplitud, el valor cuadrático medio, la frecuencia media y la potencia media de la EA, todos en función del tiempo. De esta manera, se pudo extraer información que contenían los datos de la señal de EA, expresada en los gráficos, sobre las distintas etapas del corte de la mecha durante cada ensayo de taladrado. En el análisis se evaluó para qué parámetros era más evidente esta determinación. Las etapas del corte mencionadas son aquellas que han sido descriptas en el Capítulo 2 (sección 2.4.8) [Gong y otros (2005)]. La determinación de las mencionadas etapas a partir de la EA fue útil para seleccionar porciones de las señales medidas en cada ensayo que fueran comparables entre sí. Para la evaluación del desgaste de la mecha a partir de los parámetros estudiados (desarrollado en la sección siguiente) se necesitó determinar el lapso durante el cual el corte se

comportaba de manera estable o “cuasi-estacionaria”, y eso fue realizado con la metodología comenzada en esta sección.

5.2.3.2.2 Evaluación del desgaste a través de los promedios de las amplitudes, del valor cuadrático medio, de la frecuencia media y de la potencia media de la EA.

Para cada ensayo, correspondiente a cada agujero, y para una etapa de corte en régimen estable de cada uno de estos, se calculó un promedio de los valores de los siguientes parámetros característicos: amplitud, valor cuadrático medio (RMS), frecuencia media y potencia media. Con los resultados obtenidos se realizaron gráficos y tablas los cuales fueron evaluados según la mecha utilizada y su grado de desgaste, para buscar una correlación entre estado de la mecha y variación de los parámetros característicos estudiados. Luego se compararon para determinar los más efectivos.

5.2.3.3 Estudio de las señales de “streaming”

Se tomaron las señales de streaming a una tasa de muestreo de $5 \cdot 10^6$ muestras por segundo, lo que implicaba que midiendo en un solo canal el muestreo fuera de $2,5 \cdot 10^6$ muestras por segundo, que se almacenaban en disco rígido en paquetes de 20 segundos de duración. Cada medición de un ensayo constaba en general de dos archivos de 20 segundos, ocupando una cantidad de 200 Mb por archivo. Esos tamaños de archivo eran muy difíciles de manejar con computadoras tipo PC estándar, por lo que se recurrió a elaborar un programa que partiera esos archivos de gran tamaño en otros más pequeños y así poder procesarlos matemáticamente. De esa manera también pudieron graficarse estas señales de streaming y se correlacionaron con las formas de onda, con los parámetros y con la emisión de viruta registrada en el video digital.

5.2.4 Ejemplos de información complementaria acerca del proceso de corte extraída de las señales de EA

En esta sección se explicita de qué manera las señales de EA arrojan información importante respecto del proceso de corte, más allá del estudio del estado de la herramienta que es la parte central del trabajo de tesis. Los casos mostrados a continuación son meramente descriptivos y cualitativos para mostrar la potencialidad del método. Algunos de estos análisis son retomados en el capítulo siguiente con mayor formalidad, ya que en este capítulo fueron solo conceptualizados dadas las limitaciones de las mediciones experimentales que fueron la causa de no profundizar el aspecto cuantitativo de estas líneas. De esta manera se pudieron: inferir el estado de las distintas etapas del corte en función de la evolución temporal, diferenciar el tipo de viruta por distintos métodos, medir las velocidades de rotación y avance de la mecha, y detectar el momento de la rotura de una mecha (craterización de los filos), todo a partir de la EA. La aplicación de estos métodos podría ser de gran utilidad en la automatización de las máquinas herramientas.

5.2.4.1 Detección de la etapa de corte en agujero pasante a partir de los parámetros de la EA

Según los ensayos complementarios descritos en la sección 5.2.2.2, se midió la EA de manera similar a los ensayos previos, tomándose los mismos parámetros característicos. Estos fueron analizados y se los correlacionó con las imágenes obtenidas durante el corte con la cámara de video digital, para corroborar el paso de las etapas del corte hasta que el agujero se hiciera pasante. También se calcularon en función de los parámetros de la EA el tiempo de corte y la velocidad de avance de la mecha. La idea de estas mediciones fue poder determinar a partir del estudio de las señales de EA en que etapa o en qué posición del corte se encontraba la mecha.

5.2.4.2 Diferenciación entre viruta continua y discontinua a partir de la medición de la EA

5.2.4.2.1 Mediante la evaluación de la potencia media de la EA

- A partir del valor medio de la PM

Utilizando el valor medio de la PM de las señales de EA se estudió el tipo de viruta generada en el corte. Esta idea surgió correlacionando los gráficos de los parámetros medidos y las secuencias de emisión de viruta registradas por medio del video digital. De esta manera se pudieron contrastar ambas fuentes de información sobre el corte y se evaluó la posibilidad de que la PM pudiera constituirse en un buen estimador del tipo de viruta generada durante el corte con la mecha.

- A partir de la varianza de la PM

Dado el carácter fluctuante de la PM en las regiones de viruta discontinua, se evaluó la variancia de la PM en función del tiempo de corte, y se contrastó con la información del tipo de viruta, analizándose su efectividad para estimar el carácter continuo o discontinuo de esta.

5.2.4.2.2 Mediante la señal de “streaming”

Se tomaron las señales completas de EA denominadas de “streaming” y se observaron regularidades para los casos de viruta continua y discontinua. Se contabilizaron los picos que se suponen correspondientes a las fracturas de la viruta y se estimó una tasa que se podría relacionar con el tipo de viruta.

5.2.4.3 Cálculo de la velocidad mediante la información generada en choques periódicos del filo de la herramienta con alguna irregularidad de la pieza o del material

En la etapa 1 del corte la mecha interactúa con el material de manera irregular, en un período de características transitorias. Estudiando el inicio de la señal de “streaming” se observaron una colección de picos, en las etapas primera y segunda del corte, algunos de los cuales conservaban una periodicidad, que podría representar el golpe de los filos en alguna irregularidad del material o algún problema geométrico o de centrado de la mecha. Este efecto se hacía más evidente en el comienzo del ensayo, dado que en este lapso aun no se genera una EA significativa del corte. Para cuantificar la posición de los picos a partir de la señal de “streaming” en primer lugar se observó la posición temporal de los picos y se buscó la periodicidad de varios de ellos tomando el tiempo de separación como el período de una o media vuelta de la mecha, con la cual se obtuvo la velocidad de rotación. Luego se optimizó el análisis a partir del cálculo de la autocorrelación de la porción de señal que contenía la información relevante, es decir de los primeros momentos del ensayo, cuando la mecha comienza a tomar contacto con el material, hasta que empieza a cortar. De esa manera se determinó el tiempo entre máximos que correspondería a la rotación de la mecha en un giro o en la mitad de este según si uno o los dos filos interactuaban con las irregularidades. También a partir de la PM en función del tiempo se pudieron visualizar los picos mencionados, generados al comienzo del ensayo, detectados con la señal de streaming.

5.2.4.4 Análisis de la etapa de rotura de la mecha 1

A partir de la señal completa de EA (“streaming”) se estudió el lapso en el cual se produjo la rotura de la mecha 1. Para el análisis de ese tramo de señal, se tomó como referencia la metodología utilizada en la determinación de la velocidad y se realizó la autocorrelación del tramo de la señal correspondiente a la rotura de la mecha, para obtener información relevante. Como ejemplo se cita si era un filo o los dos los que golpeaban contra el elemento que estaba deteriorando la mecha, durante cuánto tiempo de operación la mecha sufrió la sollicitación que la terminó rompiendo y cuanto avanzó en el interior del agujero hasta que la fuente de la rotura fue removida. Esto pudo realizarse conociendo la velocidad de rotación de la mecha y los picos en la señal dados por los impactos de los filos contra la irregularidad que les causó su rotura.

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Análisis en frecuencia de las formas de onda

Para la realización del análisis de la evolución del espectro de frecuencias en función del grado de desgaste de la herramienta se tomaron los datos de las formas de onda de las señales de EA de cada uno de los ensayos. El método utilizado fue aquel desarrollado y detallado en el capítulo anterior, mediante el cual se descompuso la señal en tiempo y frecuencia a partir de la transformada ondita. Se analizó la relación entre el desgaste de la herramienta y el parámetro S_M , es decir la escala correspondiente a la máxima potencia de las onditas. Para esto, se calculó la mediana del S_M ($\text{Med}(S_M)$) la cual fue graficada en las Fig. 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12 para los distintos ensayos que representan los casos estudiados. La estructura del análisis presentado es la siguiente: en primer lugar se estudiaron los casos mecha sana, y mecha rota, actuando sobre las probetas A y B, y luego los casos mecha sana y mecha rota sobre a probeta E.

Las probetas A y B fueron consideradas inicialmente de similares características por provenir de la misma pieza. Complementariamente, los análisis de microestructura y dureza mostraron inhomogeneidades importantes en ambas fracciones del material. Para el caso de “mecha nueva” se tomaron mediciones del taladrado de diez agujeros, realizados sobre la probeta B con la mecha 2, siendo estos casos los B_N2 (donde el guión bajo de la notación corresponde al número de agujero). Los resultados de esos ensayos están mostrados en la Fig. 5.9. En esa figura se puede observar una leve pendiente hacia valores menores de S_M que según lo discutido en el capítulo anterior podría relacionarse con el leve desgaste de la herramienta durante su uso.

El caso de la mecha rota taladrando la probeta A (Ensayo A_R1) muestra en la Fig. 5.10 que la mediana de S_M en función del número de señal decrece levemente como debería esperarse, dado que el aumento del desgaste lleva la EA a frecuencias mayores (o escalas menores). Pero al compararla con el caso de la mecha nueva de la Fig. 5.9 no se observa una diferencia notoria que permita identificar con certeza un caso de otro, pese a ser casos extremos.

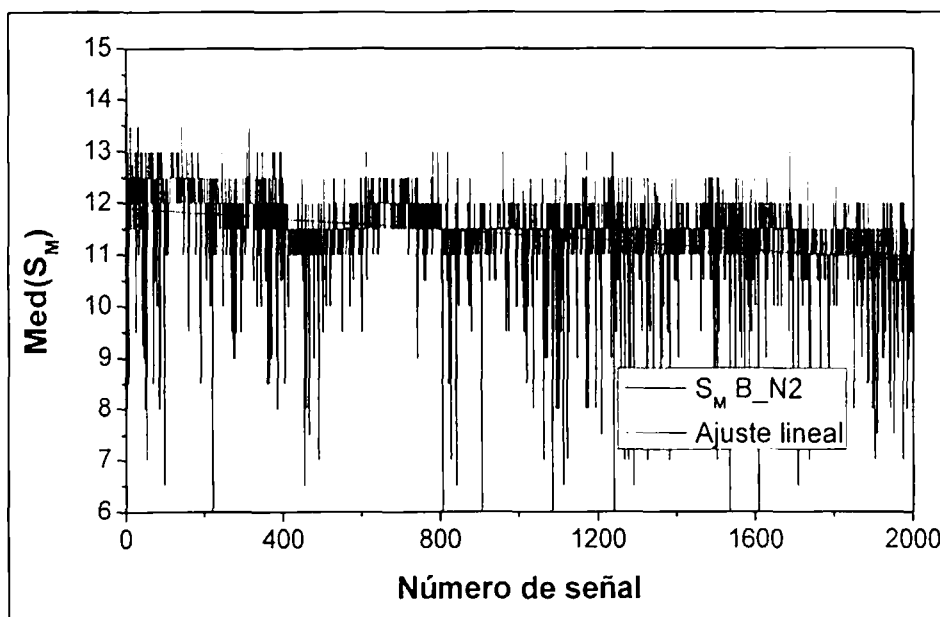


Fig. 5.9. Representación de la mediana de S_M en función del número de señal para la mecha N2 en la probeta B y su ajuste lineal.

Se repitió el estudio para la probeta E de acero comercial y menor inhomogeneidad que las probetas A y B. En este caso se analizaron los casos de la mecha 3 nueva (E_N3) (ver Fig. 5.11) y de la mecha 1 rota (E_R1) (ver Fig. 5.12). De esta forma se obtuvieron nuevamente resultados en si mismos satisfactorios para cada uno de los casos por separado. Al avanzar en el uso de la herramienta, (medido por el número de señal, donde 200 señales correspondían a cada agujero),

para ambos casos el valor de la mediana del parámetro S_M decrecía levemente en concordancia con lo esperado. Además para el caso de la mecha rota, la $Med(S_M)$ mostró un valor menor que para el caso con la mecha nueva.

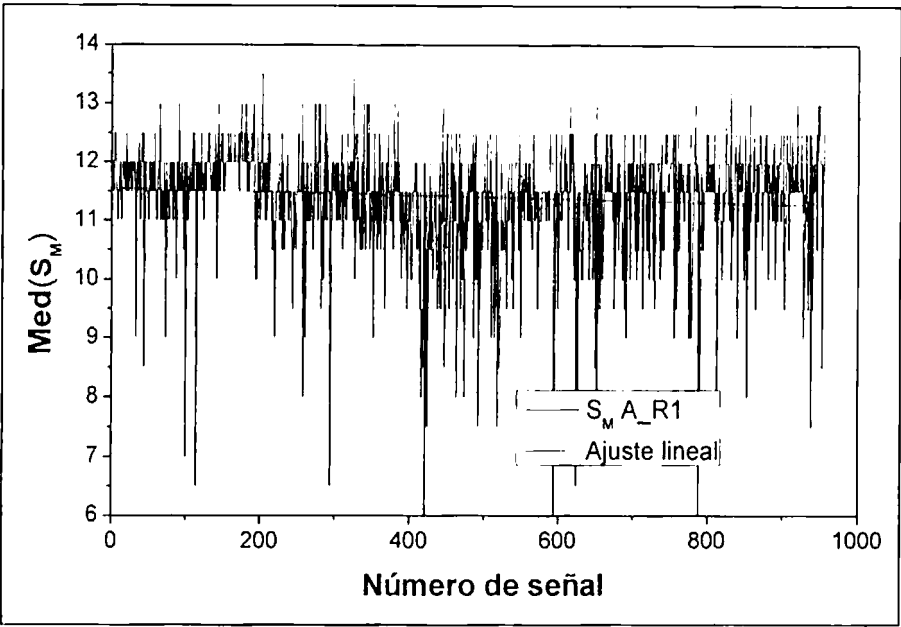


Fig. 5.10. Representación de la mediana de S_M en función del número de señal para la mecha R1 en la probeta A y su ajuste lineal.

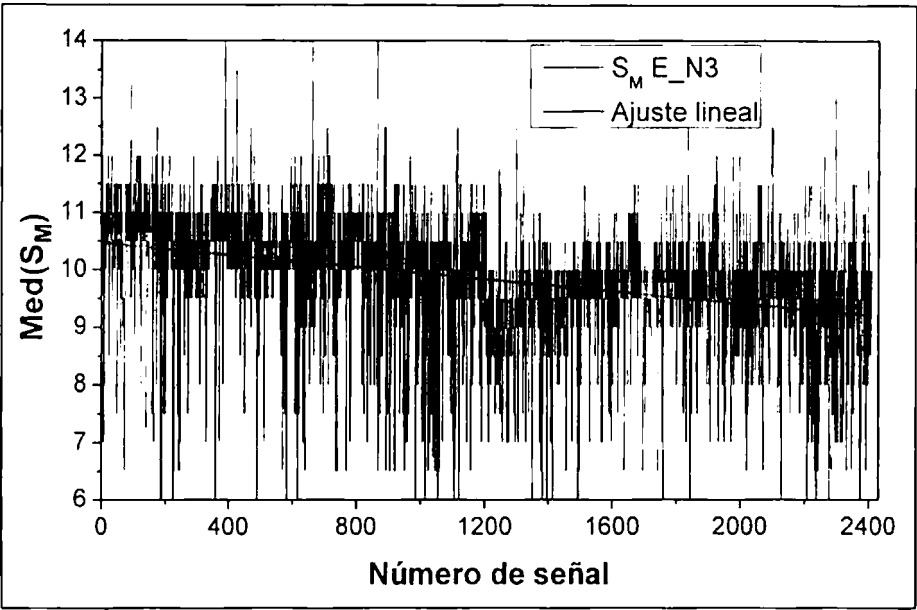


Fig. 5.11. Representación de la mediana de S_M en función del número de señal para la mecha N3 en la probeta E y su ajuste lineal.

Las diferencias para los dos casos al igual que para las probetas A y B, no son demasiado notorias y parecerían depender del material, ya que el valor de $Med(S_M)$ obtenido para la probeta A, taladrada con la mecha rota, es mayor que el de la $Med(S_M)$ obtenido para el taladrado de la probeta E con una mecha sana, lo cual no estaría de acuerdo a lo previsto si no se considera una dependencia con el material. Por este motivo, los resultados cualitativos obtenidos en estas experiencias no son demasiado significativos debido a que las piezas taladradas fueron construidas con un material de muy baja homogeneidad.

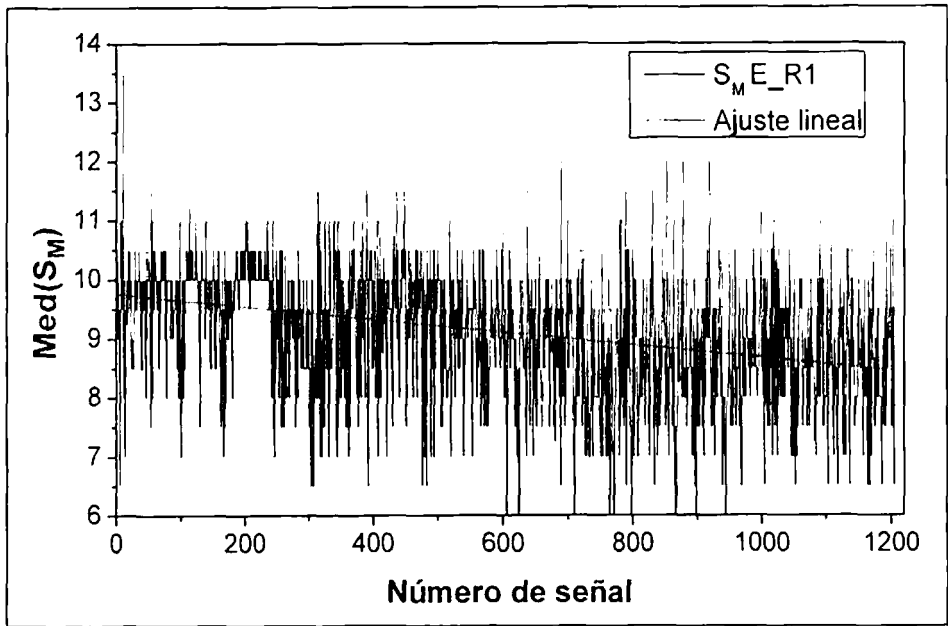


Fig.5.12. Representación de la mediana de S_M en función del número de señal para la mecha R1 en la probeta E y su ajuste lineal.

Respecto de la varianza del parámetro S_M también se presentó una contradicción entre los resultados obtenidos y los esperados, según lo formulado en el capítulo anterior. La falla del método fue mayor que para el caso de la mediana, ya que no se encontró uniformidad en las variaciones. Por ese motivo no se vuelcan a este trabajo los resultados obtenidos ya que su análisis demostró ser infructuoso.

Resumiendo lo observado en este estudio, la aplicación de la metodología del capítulo anterior no parece dar resultados alentadores para el caso de la estimación del desgaste de la herramienta de corte en taladrado. Los motivos de la ineficacia del método irían más allá de las características del material, y estarían relacionados con los mecanismos activos que generan la EA en el taladrado, que son mucho más complejos que para el caso del corte del torno (referencias).

5.3.2 Análisis de los parámetros característicos

5.3.2.1 Evaluación de la etapa del taladrado a partir de los gráficos de los parámetros característicos de la EA.

En la Fig. 5.13 se muestra el gráfico de la amplitud de la señal de EA en función del tiempo para un ensayo típico de taladrado en el cual se pueden distinguir zonas de diferente actividad según la evolución temporal. De la misma manera en la Fig. 5.14 se representan el valor cuadrático medio (RMS) en función del tiempo, mientras que en las Figs. 5.15, 5.16 y 5.17 se muestran la duración, la frecuencia media y la potencia media respectivamente, todas en función del tiempo de ensayo. En todos los gráficos se puede observar cómo evolucionan los parámetros desde el comienzo del ensayo hasta su finalización. En estos pueden distinguirse las etapas del corte descritas en el Capítulo 2 (sección 2.4.8) y que han sido analizadas en la literatura [Gong y otros (2005)] a partir de la medición de parámetros mecánicos como el torque y la fuerza de avance. En condiciones óptimas del ensayo no se detecta la etapa 1 que es la de rotación de la mecha aproximándose al material, comenzando la detección cuando la mecha entra en contacto con la pieza. En este caso por tratarse de taladrado con un agujero guía en el comienzo del proceso, el cincel no entrará en acción inmediatamente, por lo que la etapa 2 o de “resbalamiento” no se presentará. En los primeros 5 segundos la mecha se encontrará en la etapa 3 o de movimiento errático, hasta que su punta ingrese totalmente en la pieza taladrada. A continuación, cuando ya están en acción la esquina externa contra la pared del agujero, y el cincel en el final del agujero guía (de poca profundidad) la mecha se encontrará en la etapa 4 del corte, penetrando hasta aproximadamente los 34 segundos de tiempo de ensayo, cuando el

sistema de corte del taladro levanta el cabezal con la mecha y finaliza la detección de señales de EA.

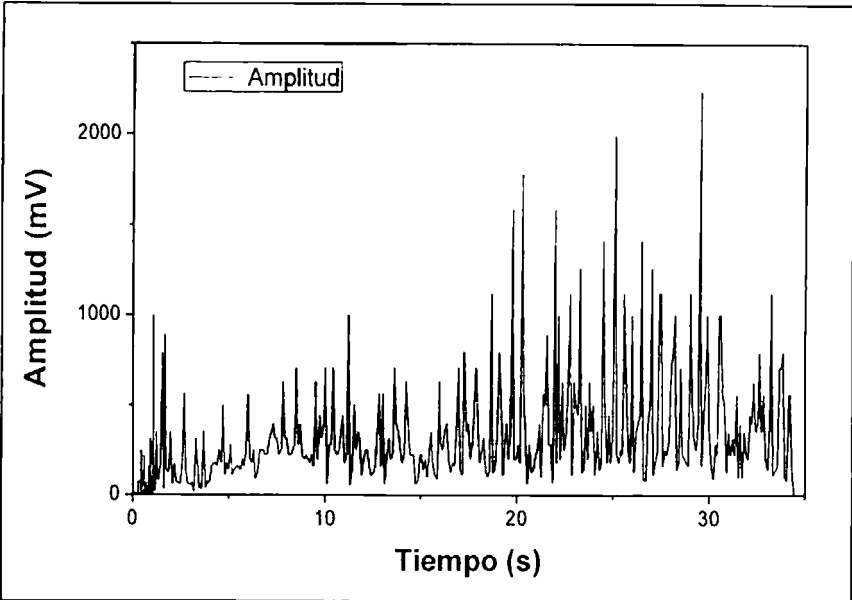


Fig. 5.13. Gráfico de la amplitud de la señal de EA en función del tiempo para un ensayo típico de taladrado

De los cuatro parámetros estudiados, la frecuencia media (Fig. 5.16) y la potencia media (Fig. 5.17) parecerían ser buenos indicadores de las etapas mencionadas. Luego con menos detalle se podrían citar el valor cuadrático medio (Fig. 5.14) y la amplitud (Fig. 5.13) haciendo un ordenamiento de mejor a peor correlación entre la señal y la descripción de las etapas. En la literatura se menciona al RMS EA como uno de los parámetros con mejores resultados para representar el corte [Ravindra y otros (1996)]. En el capítulo siguiente se mostrarán las bondades de la PM frente al RMS.

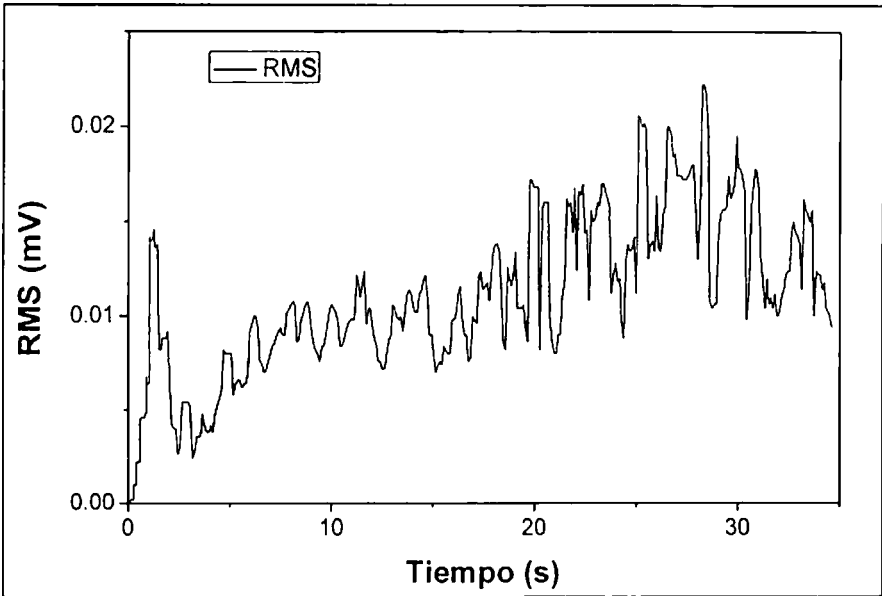


Fig. 5.14. Valor RMS de la señal de EA en función del tiempo (en segundos), para el agujero E1N3 correspondiente a la probeta E (1020 homogéneo) con mecha 3 (poco uso) en la posición de agujero 1.

Tanto en la frecuencia media (FM) como en la potencia media (PM) se observa inicialmente (hasta los 2 segundos en las figuras del ejemplo) una gran fluctuación de ambos valores durante la etapa 2 del corte, cuando la punta de la mecha “golpetea” con la pieza antes de entrar. En esos momentos la emisión acústica es del tipo “burst” o explosión, siendo menor la duración de estos

hits de EA que aquellos emitidos cuando la mecha ya empezó a hacer contacto permanente con la pieza donde los mecanismos de EA continua comienzan a activarse con la fricción y la deformación plástica. Se hizo una correlación entre los resultados de los parámetros medidos respecto a las observaciones experimentales.

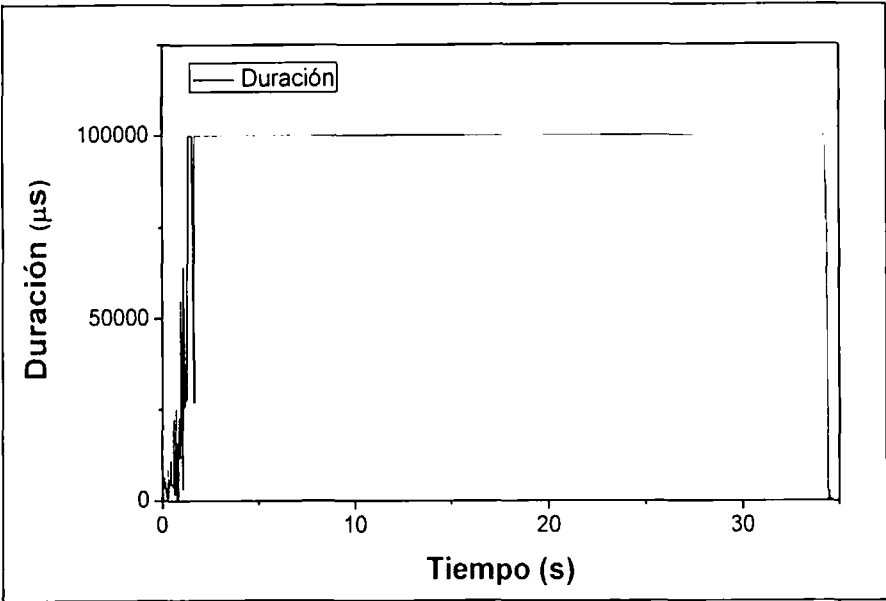


Fig. 5.15. Duración de las señales de EA en función del tiempo (en segundos), para el agujero E1N3 correspondiente a la probeta E (1020 homogéneo) con mecha 3 (poco uso) en la posición de agujero 1.

Tanto en la Fig. 5.14 como en la Fig. 5.17 se puede observar un leve aumento de la media del valor RMS así como de la PM respectivamente, hecho que se asemeja a lo observado en la literatura respecto de la medición de torque en taladrado de agujeros cuya profundidad es algunas veces mayor al diámetro. Este efecto para el torque ha sido mencionado en el Capítulo 2 en el cual se hace referencia a un trabajo de Ke y otros (2006). En ese trabajo se relaciona el incremento del torque a la viruta friccionando en la pared del agujero, que será mayor cuanto más profundo sea el agujero, además esos autores observaron un aumento en el espesor de la viruta en función de la profundidad, que hace más notorio el efecto previamente mencionado.

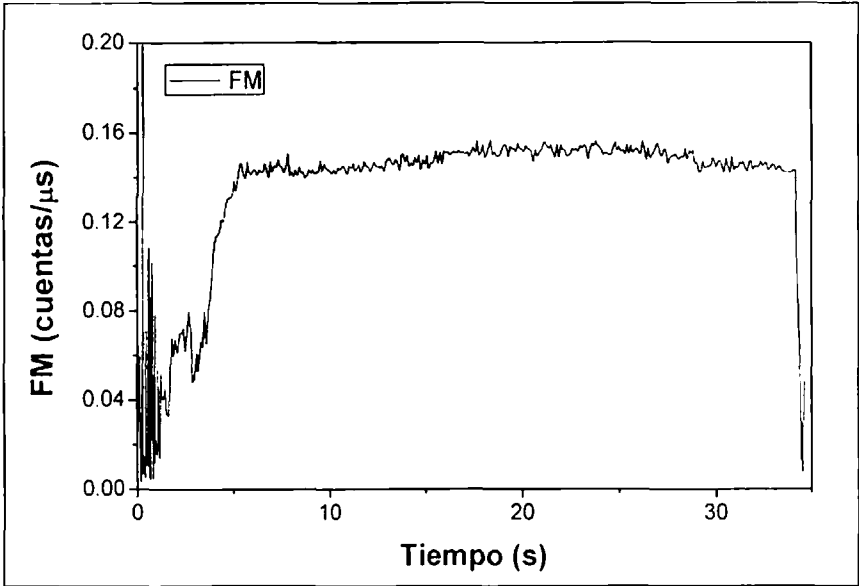


Fig. 5.16. Frecuencia media de las señales de EA en función del tiempo (en segundos), para el agujero E1N3 correspondiente a la probeta E (1020 homogéneo) con mecha 3 (poco uso) en la posición de agujero 1.

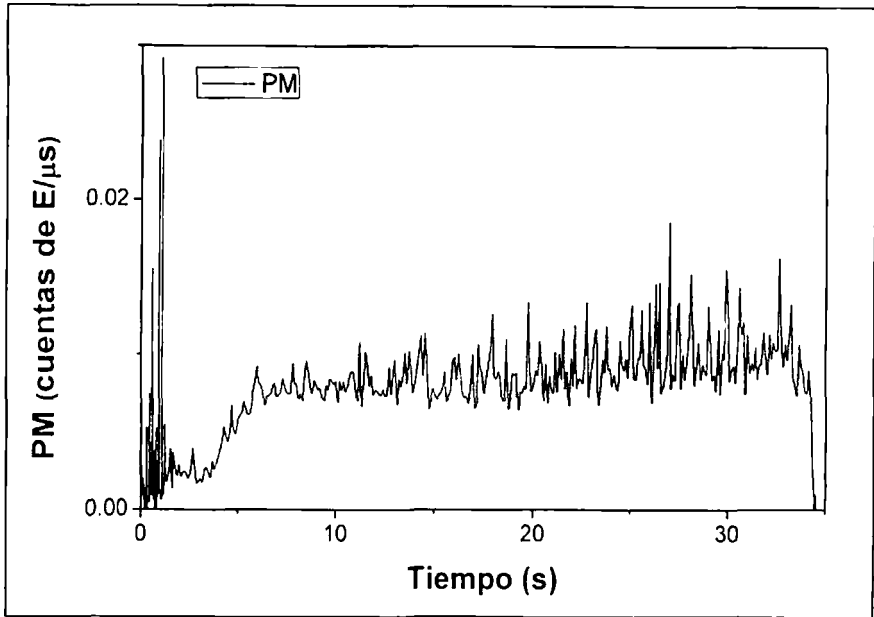


Fig. 5.17. Potencia media de las señales de EA en función del tiempo (en segundos), para el agujero E1N3 correspondiente a la probeta E (1020 homogéneo) con mecha 3 (poco uso) en la posición de agujero 1.

5.3.2.2 Evaluación del estado de la mecha a través de los promedios de los parámetros característicos

En la Fig. 5.18 se grafica el promedio de la Amplitud de las señales de EA para cada ensayo en función del número de ensayo, para los casos de mechas 2 y 4 nuevas, mecha 2 gastada y mecha 1 rota actuando sobre las probetas A y B. Volviendo a la Fig. 5.18, lo primero que se puede destacar en los cuadros a, b, c y d es que, en particular para las probetas A y B, la amplitud no es un buen método para poder detectar cuando la mecha está buena o rota. Esto se puede fundamentar en el hecho que a simple vista se puede observar una gran dispersión de los resultados para ambos casos (sana y rota) y una similitud en el rango de valores obtenidos. La dispersión podría estar justificada en la importante inhomogeneidad del material ensayado. Cabe acotar que hay un punto del gráfico que toma valores notablemente mayores que el resto, que es el correspondiente al agujero 2 de la mecha rota, donde esta termina de deteriorarse gravemente, produciéndose en ese lapso una mayor emisión acústica. En la Fig. 5.18 cuadros e, f y g, se grafica la amplitud para la probeta E constituida de un material de mayor homogeneidad que las anteriores, la cual fue agujereada con las mechas 1 (rota) y 3 (nueva). En estos ensayos se observa que el parámetro estudiado permite diferenciar claramente los casos de mechas buena y rota, dando valores muy diferentes para cada caso, con una media aproximadamente tres veces mayor para el caso de la mecha rota. También se puede observar en la misma figura que la dispersión de las amplitudes promedio para el caso de la mecha buena en la probeta E es menor que en el caso de las probetas A y B, esto seguramente sea consecuencia de la mayor homogeneidad del material utilizado. Por otra parte, la dispersión del caso de mecha rota mostró ser grande frente al caso anterior, tal vez por que la mecha iba aumentando su deterioro en función de su uso, de manera aleatoria.

En la Fig. 5.19 cuadros a, b, c y d se muestra el promedio del valor cuadrático medio (RMS) de las señales de EA para cada ensayo en función del número de ensayo para los casos Probeta B con mecha 2 nueva, Probeta B con mecha 4 nueva y Probeta A con mecha 1 rota. Este parámetro parecería no ser demasiado sensible a la variación del estado de la mecha aunque sí a las inhomogeneidades del material, mostrando una mayor dispersión en el caso de la mecha 4 nueva. En los cuadros e, f, g se presenta el parámetro, para la probeta E, para los casos de mechas nueva y rota, mostrando una importante diferencia entre ambos límites del estado de los filos de las mechas. También se observó una menor dispersión en los resultados que para las probetas A y B.

La Fig. 5.20 muestra el promedio de la Frecuencia Media de las señales de EA para cada ensayo en función del número de ensayo, para los mismos casos que en los parámetros anteriores. Este parámetro está emparentado al concepto de frecuencia de la señal de EA, dado que un mayor número de cruces por el umbral se corresponde con una señal de mayor frecuencia o con la aparición de coeficientes de frecuencias más altas entre los cuales se ira distribuyendo una proporción mayor de la energía de las señales de EA. Con este criterio, se podría decir también que en los cuadros a, b, c y d se podría notar una muy leve diferencia, prácticamente opacada por las incertezas de los resultados entre los casos mecha nueva y rota, respecto del corrimiento hacia mayores frecuencias como fue visto anteriormente. Un análisis similar se puede aplicar a los ensayos sobre la probeta E mostrados en los cuadros e, f, y g de la Fig. 5.20. Aquí también se observa que, más allá de estar en el límite del error, refinando un poco las mediciones se podrían llegar a detectar los casos extremos. Se puede encontrar en este caso una similitud entre estos resultados y los obtenidos a partir del estudio de las formas de onda de la EA por medio de onditas analizado en la sección 5.3.1, viéndose que las tendencias relacionadas con la variación de frecuencia mostradas en las Fig. 5.11 y 5.12 (no como frecuencias sino como escalas) son similares a las expuestas en la Fig. 5.20 cuadros e, f y g.

En la Fig. 5.21 se muestra el promedio de la Potencia Media (PM) de la EA para cada ensayo en función del número de ensayo (para cada material y los dos estados de las mechas), para los mismos casos que se mostraron previamente los demás parámetros estudiados. En los cuadros a, b, c y d se analiza el taladrado de las probetas A y B (material poco homogéneo) con mechas nueva y rota. Para este parámetro se observa que la dispersión relativa de los resultados es menor que para el caso de la amplitud y el RMS. También se observa la detección con mucha claridad del momento de la profundización de la rotura (craterización de la mecha) como consecuencia de alguna imperfección en la probeta A durante el ensayo 2. El gráfico de este ensayo se ha cambiado de escala para poder representar todos los puntos. En la figura del cuadro h se extrae el punto correspondiente al ensayo 2 para mostrar con más detalle la PM luego de la rotura. Comparando la PM de los tres ensayos siguientes a la rotura (mecha rota), con los ensayos realizados sobre la probeta B de iguales características que la A, con mecha sana, se observa la posibilidad de poder determinar el estado de la mecha a partir de la cuantificación de la PM. Igualmente ocurre para el caso de la probeta E de un material más homogéneo cuyos resultados están graficados en los cuadros e, f y g. En este caso la dispersión de las mediciones de la mecha buena es notoriamente menor. Más adelante se tabulan (Tabla V.III) los promedios de la PM con sus respectivos errores que corroboran lo inferido en la observación de los gráficos.

Analizando los valores tabulados se observa que la PM es el mejor parámetro de los evaluados con el cual se pueden distinguir los casos de mechas sana y rota, por lo que fue elegido para seguir utilizándolo en el avance de este trabajo como el más útil estimador del desgaste de la herramienta. El criterio esgrimido fue la correcta separación de ambos casos y con el menor error relativo correspondiente. También en función de los resultados medidos para ambos tipos de material y los dos casos de mechas, se observa cualitativamente que la potencia media no depende notoriamente de la posición del agujero respecto del sensor en coincidencia con Kopac y Sali (2006). Esto podría deberse a la situación de propagación de ondas difusas tratada por donde el pequeño tamaño de la probeta en la cual las ondas elásticas se propagan, es mucho menor que la distancia viajada por la onda durante su tiempo de duración [Dunegan (2003)] [Jemielniak (2000)]. Además puede observarse que la PM de la EA para el caso del taladrado con las mechas nuevas sobre una pieza de material poco homogéneo (probeta B) denota una mayor dispersión que cuando se agujerea un material homogéneo (Probeta E). Esto indicaría una sensibilidad de la PM de la EA a la condición del material.

En la Tabla V.III se muestran los promedios alrededor de los cuales fluctúan los valores de los parámetros característicos de la EA medidos, para cada conjunto de ensayos, para cada caso mostrado (cada gráfico). También se tabulan las desviaciones estándar de cada conjunto de cinco mediciones (excepto para el caso A2R1 indicado oportunamente en la tabla). En los valores de la

tabla se pueden corroborar de manera cuantitativa las aseveraciones cualitativas expuestas previamente sobre el comportamiento de dichos parámetros.

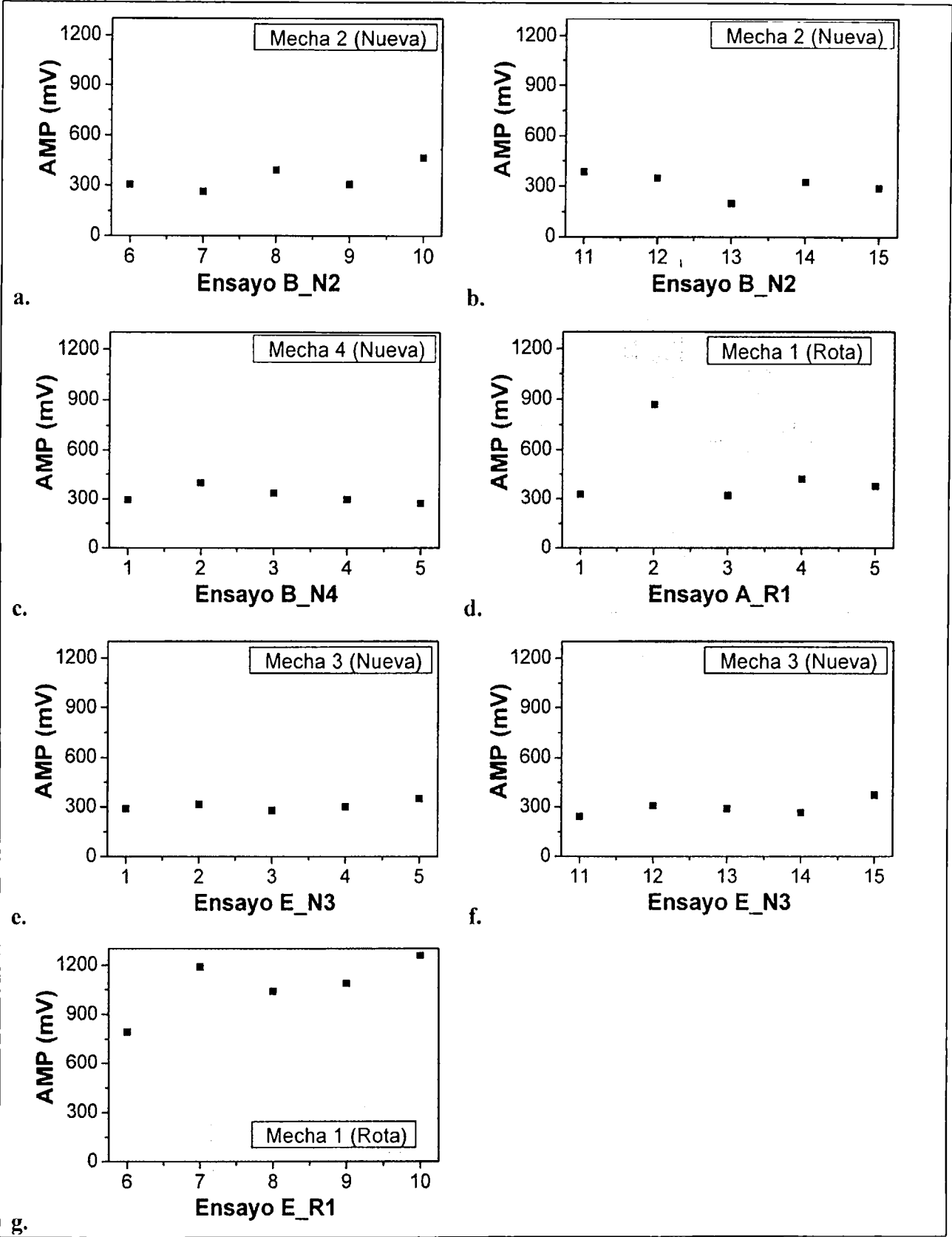


Fig. 5.18. Promedio de la Amplitud de las señales de EA para cada ensayo en función del número de ensayo. a y b. Probeta B mecha 2 nueva. c. Probeta B mecha 4 nueva. d. Probeta A mecha 1 rota. e y f. Probeta E mecha 3 nueva. g. Probeta E mecha 1 rota.

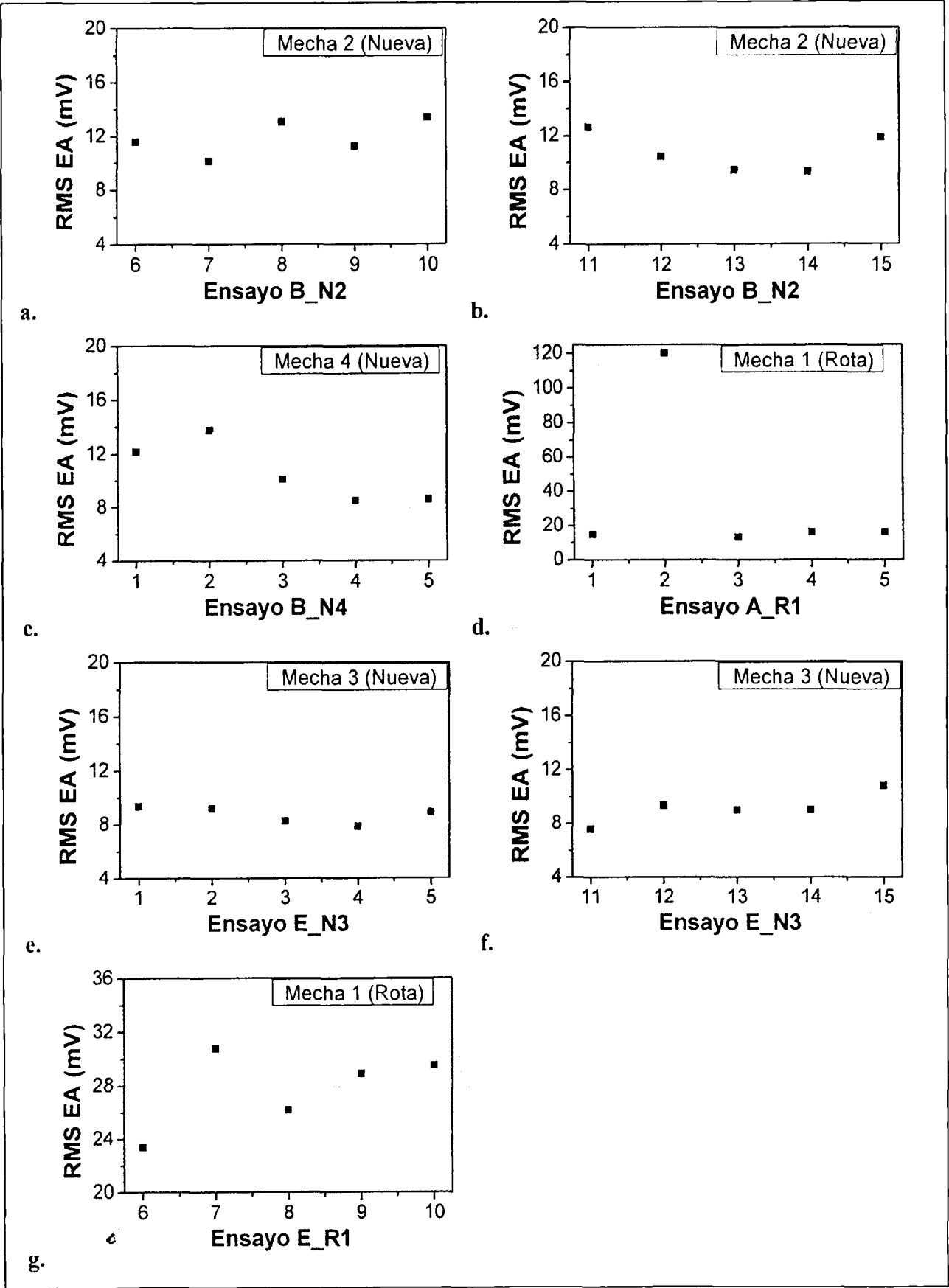


Fig. 5.19. Promedio del Valor cuadrático medio (RMS) de las señales de EA para cada ensayo en función del número de ensayo. a y b. Probeta B mecha 2 nueva. c. Probeta B mecha 4 nueva. d. Probeta A mecha 1 rota. e. Probeta E mecha 3 nueva. f. Probeta E mecha 3 nueva. g. Probeta E mecha 1 rota.

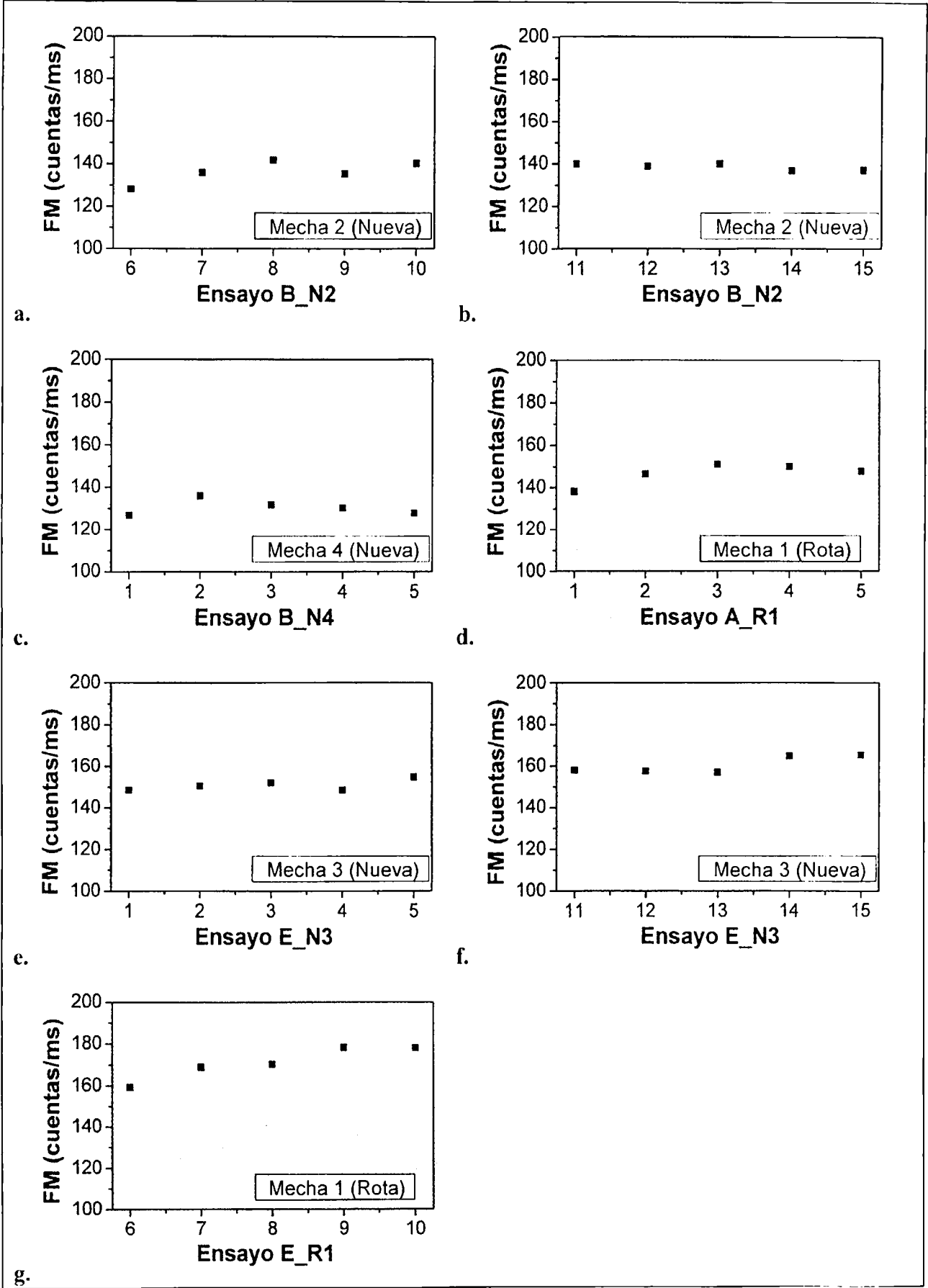


Fig. 5.20. Promedio de la Frecuencia Media de las señales de EA para cada ensayo en función del número de ensayo. a y b. Probeta B mecha 2 nueva. c. Probeta B mecha 4 nueva. d. Probeta A mecha 1 rota. e. Probeta E mecha 3 nueva. f. Probeta E mecha 3 nueva. g. Probeta E mecha 1 rota.

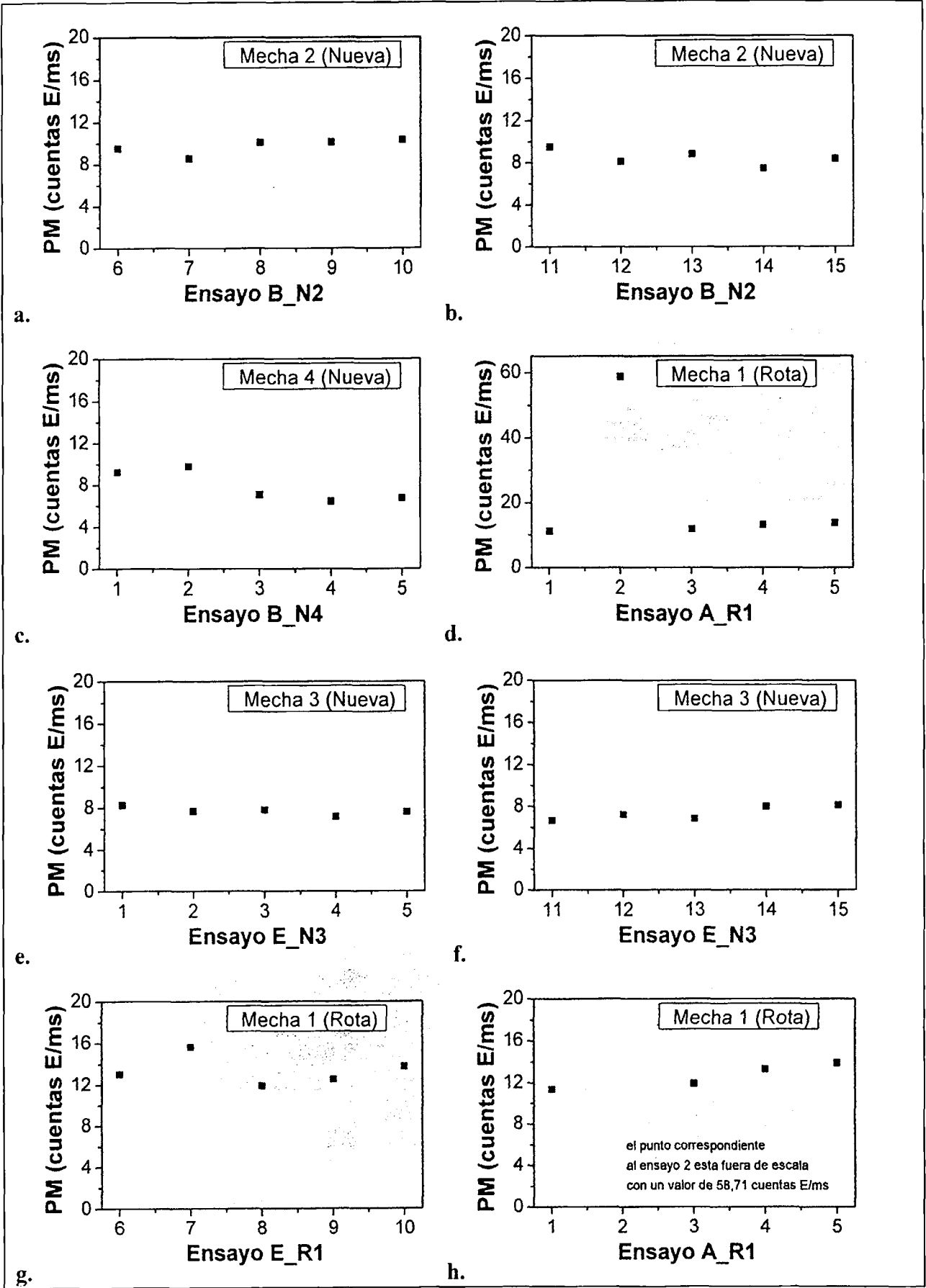


Fig. 5.21. Promedio de la Potencia Media de las señales de EA para cada ensayo en función del número de ensayo. a y b. Probeta B mecha 2 nueva. c. Probeta B mecha 4 nueva. d. Probeta A mecha 1 rota. e y f. Probeta E mecha 3 nueva. g. Probeta E mecha 1 rota. h. Reescalado de la figura d.

Resumiendo, en esta sección se obtuvieron resultados alentadores respecto de la puesta a punto del método de medición de los parámetros, del análisis de las señales, y de la determinación de casos límites de desgaste de la herramienta de corte (mechas), donde se analizaron varios parámetros, de los cuales se observó que la potencia media de la EA era una buena herramienta para caracterizar el proceso de corte. Se vio que este parámetro crece para el caso de la mecha con sus filos craterizados. También se observó una dependencia del material en parámetros como el RMS o la amplitud, que se hacía menor en para la PM.

Tabla V.III. Promedios de los parámetros estudiados para cada tanda de ensayos de 5 agujeros.

ENSAYOS (agujeros)	AMP (mV)	RMS (mV)	FM (Cuentas/ms)	PM (Cuentas E/ms)
BN2 (5 a 10)	346,37 ± 79,84	11,88 ± 1,33	136,23 ± 5,32	9,72 ± 0,713
BN2(11 a 15)	309,90 ± 71,06	10,11 ± 1,51	138,47 ± 1,49	8,47 ± 0,78
BN4 (1 a 5)	318,69 ± 49,67	10,63 ± 2,31	130,55 ± 3,59	7,85 ± 1,55
AR1 (1 a 5)	370,54 ± 49,31 *	15,08 ± 1,74 *	149,54 ± 1,67 *	13,04 ± 0,99 *
EN3(1 a 5)	307,45 ± 28,40	8,72 ± 0,65	150,84 ± 2,64	7,69 ± 0,40
EN3(11 a 15)	296,08 ± 49,65	9,16 ± 1,15	160,59 ± 4,18	7,38 ± 0,61
ER1 (6 a 10)	1073,62 ± 178,86	27,74 ± 2,96	170,91 ± 7,81	13,36 ± 1,42

*valor calculado para los ensayos siguientes a la rotura

5.3.3. Discusión global de los métodos para el estudio del estado de las herramientas de corte

A continuación se plantea una discusión global de lo realizado en las secciones anteriores, en el inicio del estudio del estado de las herramientas de corte para el taladrado de piezas metálicas. De manera resumida, se puede expresar que se examinaron dos líneas metodológicas para la extracción de información de las señales de EA, una a partir de las formas de onda de la EA y su análisis espectral, y otra a partir de los parámetros característicos de la EA extraídos con el procesador de señales intrínseco al equipo de EA utilizado. En primer lugar se recurrió al método de análisis de las señales de EA basado en el estudio del espectro y de los parámetros med(S_M) y var(S_M), presentado en el capítulo anterior. En la utilización de la mediana de S_M como indicador del desgaste se encontró que para los ensayos en las probetas A y B el parámetro no tenía la sensibilidad necesaria para detectar dos casos extremos del filo de la herramienta como son la mecha nueva y la mecha con los filos craterizados (mecha rota). Para el otro caso, de la probeta E se encuentra una pequeña diferencia entre ambos casos del estado de la mecha. Por otra parte el estudio de la varianza de S_M dio resultados irreconciliables con respecto a la condición de la herramienta para los casos límite que fueron mencionados. La argumentación de las posibles dificultades que podrían haber causado la deficiencia del método está mencionada anteriormente en esta sección. Evaluando los resultados se dispuso que para los ensayos de taladrado se pudiera mejorar el desarrollo de los experimentos y luego volver a analizar los espectros de frecuencia en condiciones mas adecuadas, como se mostrará en el próximo capítulo. En segundo lugar se estudiaron los parámetros de la EA, camino por el cual se llegaron a obtener resultados alentadores en la detección de los mencionados estados límites del filo de las mechas utilizadas en pos de orientar el estudio hacia una metodología confiable. Al analizar cuales parámetros de la EA serían buenos descriptores del estado de la mecha, se hizo una modificación de un parámetro ya establecido como la energía MARSE y se generó otro parámetro que se lo

denominó potencia media (PM) el cual en función de sus atributos fue elegido como el mejor descriptor del proceso de corte. Los experimentos y resultados representados en este capítulo fueron una importante base para planificar nuevos experimentos mas descriptivos del fenómeno estudiado desde lo conceptual hasta lo metodológico corrigiendo las dificultades que fueron surgiendo en esta primera aplicación, como se mostrará en el capítulo siguiente.

5.3.4 Ejemplos de obtención de información acerca del estado del proceso de corte a partir del análisis de las señales de EA

A continuación se indican los resultados de otras aplicaciones de la EA para la obtención de información respecto del proceso de corte en el taladrado. Estos experimentos son mostrados en este trabajo con el objetivo de describir la potencialidad del método de EA. Aunque los resultados expuestos no sean lo suficientemente vastos como para justificar fehacientemente los comportamientos descritos, sino meramente ejemplos, detrás de cada caso mostrado como ejemplo hay varios casos analizados que lo validan. Los casos estudiados a continuación son la determinación de las etapas del corte en la realización de un agujero pasante (por medio del análisis de los parámetros de las señales de EA), la diferenciación del tipo de viruta generada en el corte (por tres métodos de análisis de las señales de EA), la determinación de la velocidad de rotación de la mecha a partir de la señal de “streaming”, y el momento de rotura de una mecha observando la señal de “streaming” de la EA.

5.3.4.1 Detección y determinación de las etapas del corte en agujero pasante con EA

En esta parte de la experiencia se midió la EA con el fin de detectar el pasaje de la mecha ingresando por un agujero realizado previamente, hasta llegar al material a ser removido efectuando esta tarea y saliendo por la cara posterior. Se comenzó el análisis midiendo los parámetros que son buenos para la determinación de la etapa del corte tales como lo son la PM y la FM los cuales se graficaron para los cuatro ensayos realizados, y se contrastaron con la información visual en formato digital. Entonces se vio que se obtenía una mayor efectividad en los resultados complementando ambos parámetros por lo cual se construyó un parámetro nuevo efectuando el producto de los anteriores. De esta manera se definió:

$$\text{Parámetro D} = \text{PM} \times \text{FM} \quad (5.1)$$

Luego se graficaron los resultados obtenidos para todos los ensayos de agujero pasante. En la Fig. 5.22 se observa el parámetro D en función del tiempo para ensayo relativo al agujero del ensayo 11. Avanzando en el tiempo, desde los comienzos se observa actividad del parámetro D, mientras la mecha entra en el túnel del agujero previo. Entonces la señal obtenida estará relacionada con la fricción en la cara cilíndrica en la que la mecha incursiona [Carpenter (1992)] [Dornfeld (1991)]. Esto va in crescendo hasta que la punta de la mecha toca la cara dada por el final del agujero previo. Desde el acercamiento en adelante la descripción se hace similar a lo visto en la sección 5.3.2.1 respecto de las etapas del corte. Luego de la etapa de posicionamiento de la mecha comienza nuevamente el proceso de agujereado. Se observa un pico dado por la etapa 1 entre los 25 y los 28 segundos y luego la pendiente crece rápidamente lo que indicaría el comienzo del corte que continuará hasta los 55 segundos cuando se observa un flanco de rápido decaimiento. Luego que la punta de la mecha sale por la cara posterior de la pieza, esta sigue girando dentro del agujero hasta que el sistema de corte automático de la máquina la levanta de manera abrupta. Las fluctuaciones posteriores a los 55 segundos seguramente estén relacionadas con la mecha girando dentro del agujero. En las figuras 5.23 y 5.24 se reproduce lo mismo para los ensayos 12 y 14, mostrándose en ambos gráficos con mayor claridad las etapas descritas: fricción en las paredes, contacto con el material (etapa 1), “resbalamiento” (etapa 2), movimiento errático acotado por la pared del agujero (etapa 3) y corte estacionario (etapa 4) hasta llegar al final del agujero [Gong y otros (2005)]. En la Fig. 5.23 se observa que la fricción posterior al final del agujero 12 es baja, mientras que para el agujero 14 en la Fig. 5.24 es mayor.

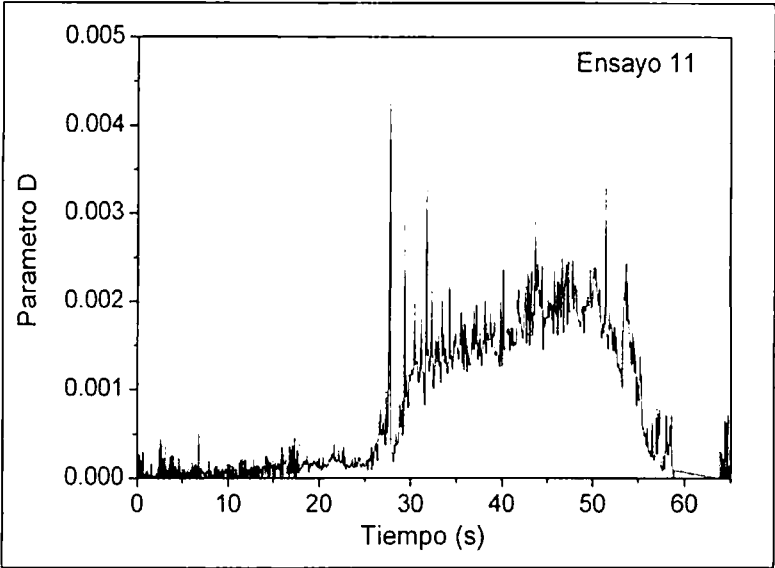


Fig. 5.22. Parámetro D en función del tiempo para el agujero 11.

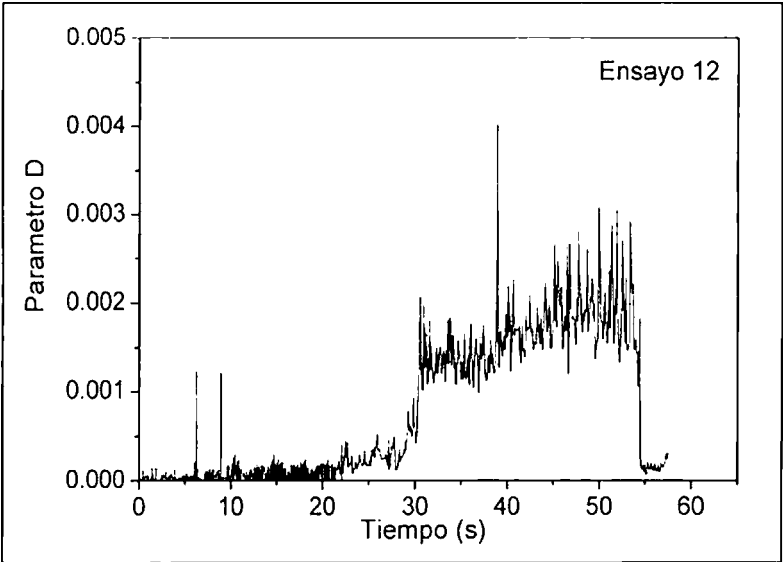


Fig. 5.23. Parámetro D en función del tiempo para el agujero 12.

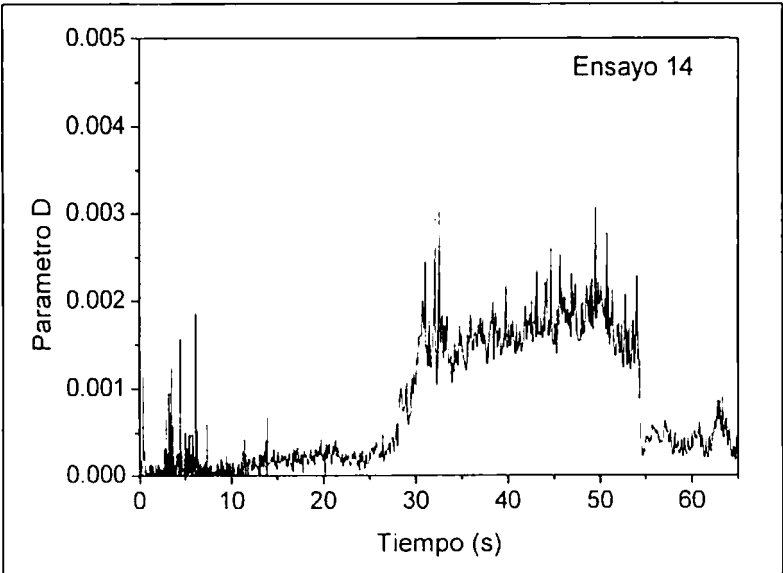


Fig. 5.24. Parámetro D en función del tiempo para el agujero 14.

En las Figs. 5.25 y 5.26 se muestra el parámetro D en función del tiempo para el ensayo 13 pasante, el cual tuvo que realizarse en dos partes, denominadas “parte 1” y “parte 2”. Esto se debió a que en los inicios del ensayo, cuando la mecha entró en contacto con el material a cortar (etapa 1), comenzó a agujerear durante un muy breve lapso (etapas 2, 3 y mínimo inicio de la 4), durante el cual se aflojó el agarre en el mandril y comenzó a resbalar interrumpiendo el corte recién iniciado. Esto último puede observarse en la Fig. 5.25 con el parámetro D a partir de los 32 segundos, en la cual se indica a través de este parámetro que la mecha no está cortando. Entonces se detuvo el ensayo, se retiró la mecha del agujero y se ajustó el agarre para evitar que resbalara. Entonces se volvió a repetir el proceso, ahora denominado como “parte 2” y graficado en la Fig. 5.26. En esta segunda oportunidad la mecha entró en contacto con el material de la pieza a un tiempo de aproximadamente 30 segundos y resbaló hasta pasados los 45 segundos cuando empezó a cortar de manera correcta, mostrando el parámetro medido un comportamiento similar a los casos mostrados anteriormente. La diferencia con los ensayos 11, 12 y 14 es que en el 13 parte 2 el espesor a taladrar fue menor ya que en la parte 1 ya se había disminuido levemente. En la Tabla V.IV se muestran los resultados de la velocidad de avance de la mecha, calculada a partir del espesor taladrado y el tiempo de corte, que fuera determinado por medio del parámetro D. Se encuentra una excelente concordancia entre el valor del avance estipulado previamente de 0,283 mm/s y el determinado experimentalmente a partir de las ondas de EA.

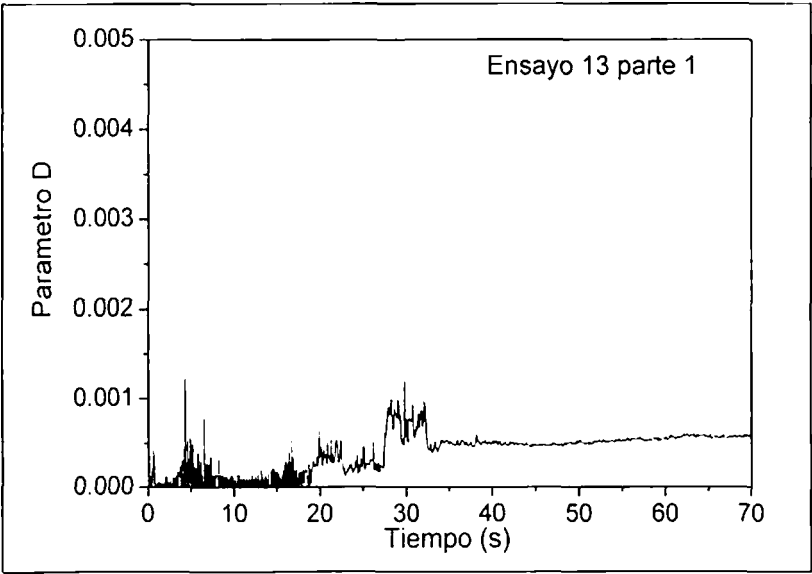


Fig. 5.25. Parámetro D en función del tiempo para el agujero 13 parte 1.

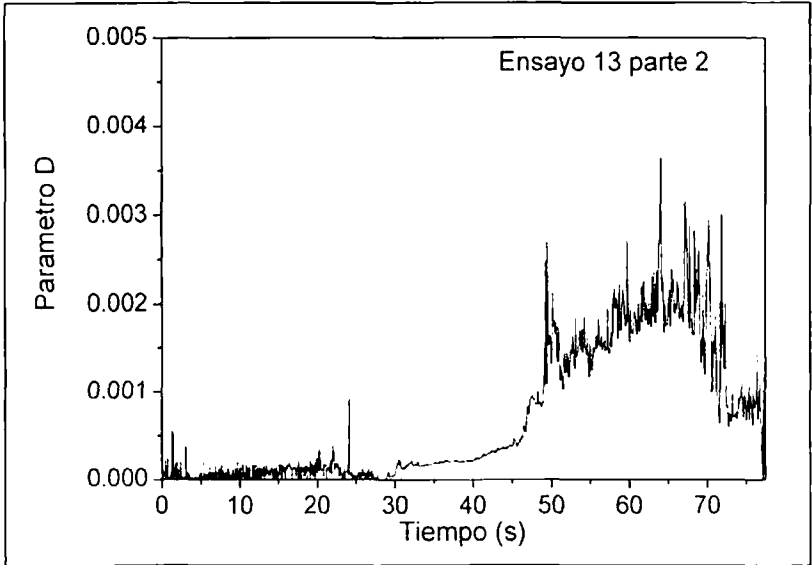


Fig. 5.26. Parámetro D en función del tiempo para el agujero 13 parte 2.

Tabla V.IV Cálculo de la velocidad de avance a partir del espesor cortado y el tiempo de corte determinado con el parámetro D.

Ensayo	Espesor (mm)	Δt corte (s)	Veloc. avance (mm/s)
Ensayo 11 pasante	$7,86 \pm 0,02$	$27,4 \pm 0,1$	$0,287 \pm 0,007$
Ensayo 12 pasante	$7,80 \pm 0,02$	$26,9 \pm 0,1$	$0,290 \pm 0,007$
Ensayo 14 pasante	$7,82 \pm 0,02$	$27,2 \pm 0,1$	$0,288 \pm 0,007$

5.3.4.2 Diferenciación entre Viruta continua y discontinua con EA

5.3.4.2.1 A partir de parámetros

Se estudió la potencia media de las señales de EA en función del tiempo y se correlacionó con el tipo de viruta generada durante el corte. De esta manera, se observó que la aparición de picos de mayor amplitud en la potencia media se podía asociar a la mayor rotura de la viruta, detectada en la sucesión de imágenes registradas de cada ensayo de taladrado. En la Fig. 5.27 se puede observar un caso tomado como ejemplo (ensayo A1R1). En esta figura, la PM de la señal de EA muestra el comienzo de la etapa 4 o de corte estacionario aproximadamente a los 5 segundos. Hasta cerca de los 15 segundos, la PM fluctúa un 20% alrededor de su valor medio. Luego de los 15 segundos de iniciado el contacto mecha-probeta, se observa un incremento notorio en las fluctuaciones de la PM, y también en el valor medio. Estas etapas se correlacionaron con el tipo de viruta que se estaba generando y se pudo detectar que la emisión de viruta continua se correspondía con una menor dispersión de la PM (zona delimitada por las franjas rojas en la figura), mientras que la viruta discontinua lo hacía con una mayor dispersión (delimitada por las franjas verdes). Este comportamiento mostrado para un ensayo fue corroborado en un número considerable de casos analizados. Luego a continuación se presenta una forma de cuantificar este efecto a través de medir la dispersión de la PM.

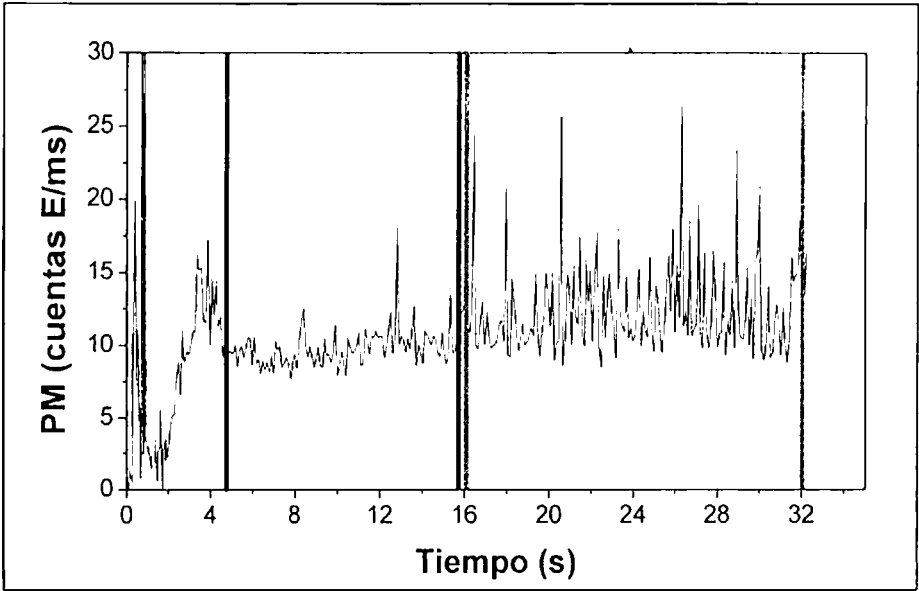


Fig. 5.27. PM de la EA para el ensayo A1R1. Las líneas rojas indican la zona de viruta continua y las verdes la discontinua.

5.3.4.2.2 Usando variancia de la PM

Para estimar la dispersión en la PM se calculó la variancia móvil, entonces se tomaron ventanas de diez puntos que se van desplazando en el tiempo sobre cada una de las cuales se

computó la varianza de la PM. De esta manera, se obtuvo una buena diferenciación de las regiones de viruta continua y discontinua, como se puede observar en la Fig. 5.28. Luego tomando el promedio, o el área bajo la curva de esta nueva función, también se logró detectar una diferencia notable entre un tipo y otro de viruta. La razón de estas fluctuaciones y de la correlación previamente mencionada se muestra a continuación en el análisis de la señal de “streaming”.

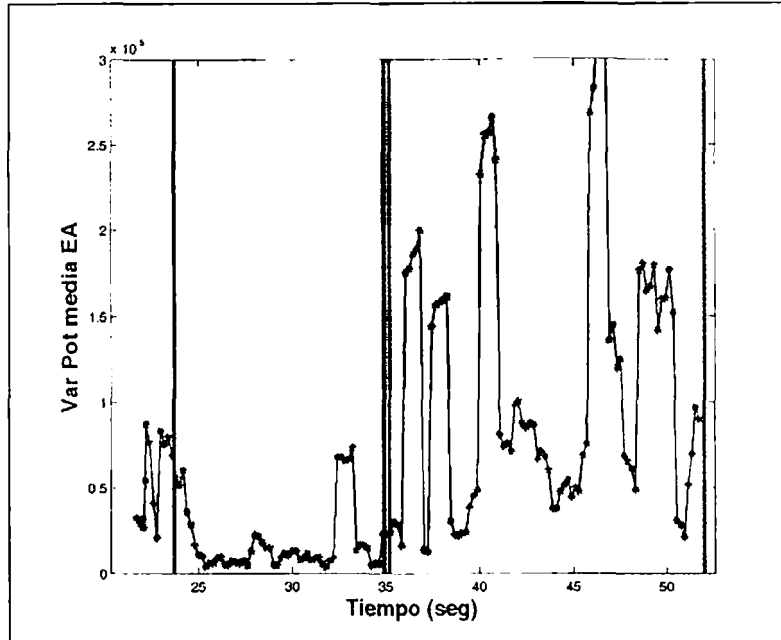


Fig. 5.28. Media móvil de la varianza de la PM para el ensayo A1R1. Las líneas rojas indican la zona de viruta continua y las verdes la discontinua.

5.3.4.2.3 Ejemplo con señal completa “streaming”

En las Fig. 5.29 y 5.30 se grafican los primeros 16 segundos de la señal completa de EA (“streaming”) y de la PM obtenida de la parametrización, ambas en función del tiempo respectivamente, para el ensayo de taladrado denominado como A1R1. La señal completa fue procesada en 2 fragmentos por razones de capacidad de cálculo (la señal completa de 32 segundos constaba de 80 millones de puntos). Las Fig. 5.31 y 5.32 muestran lo mismo para la segunda parte de la señal también de 16 segundos. La amplitud de la señal completa de EA en función del tiempo revela el transcurrir del ensayo. En primer lugar las etapas que corresponden al transitorio inicial en el que se puede observar un primer momento de EA del tipo de explosión, mientras que en cuanto comienza a efectuarse el corte en la señal se va haciendo más notoria la presencia de una señal del tipo continua que se manifiesta como un aumento en el ancho de una traza simétrica, que evoluciona en el tiempo respecto de la amplitud cero. Comparando las Fig. 5.29 y 5.30 se observa una correlación temporal entre los picos de la amplitud las señales del tipo explosión y los de la PM. En la Fig. 5.29 se observa una zona de viruta continua hasta aproximadamente los 16 segundos del tiempo de corte a partir del cual se observa en un registro visual del ensayo que la viruta comienza a ser discontinua hasta aproximadamente los 32 segundos que corresponden al final del ensayo. Luego se puede relacionar la mayor fluctuación de la PM en la zona de viruta discontinua o rota con la gran cantidad de EA tipo explosión observada en la señal completa de EA, lo cual estaría relacionado con la fractura de la viruta.

5.3.4.3. Ejemplo de la determinación de la velocidad de rotación de la mecha con la señal completa de EA “streaming”

En la Fig. 5.33 se muestra el transcurrir del primer segundo de la señal completa de EA del ensayo E1N3 (probeta E agujereada en la posición 1 con la mecha 3 nueva) tomado como ejemplo para describir el método. En esta señal se observan picos, que corresponden a fuentes de EA de tipo explosión de gran amplitud, generadas en las etapas iniciales del corte, debidas al

choque de los filos contra irregularidades en la pieza. Entonces, a partir de una supuesta periodicidad de los picos, se intentó estudiar la velocidad de rotación de la mecha. Las posibles fuentes de EA que presentan los picos podrían ser por ejemplo fragmentos del material que comienza a desprenderse o discontinuidades sobre la superficie de la pieza. Analizando con detalle la figura, la periodicidad se muestra difusa por la existencia de otros picos de carácter estocástico que la enmascaran. Por tal motivo en lugar de comparar las posiciones de los picos de la amplitud de la señal de EA en función del tiempo, se realizó la auto correlación de la misma, con el objetivo de captar periodicidades dentro del “ruido” de los picos desfasados o corridos en el tiempo que conservaran intrínsecamente una regularidad dictaminada por la periodicidad de la rotación de la mecha.

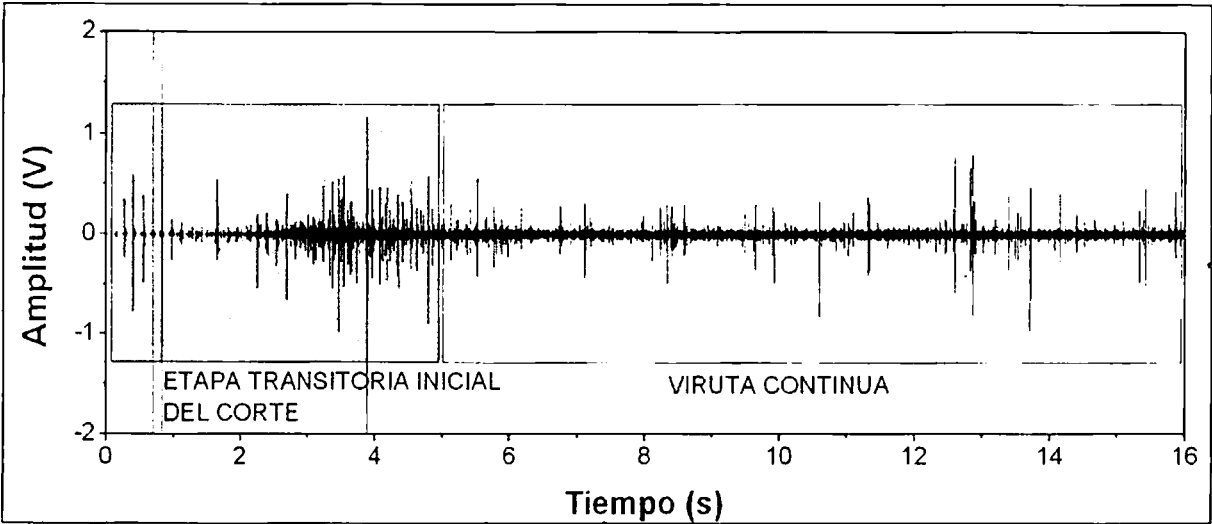


Fig. 5.29. Señal de “streaming” del ensayo A1R1. Parte 1.

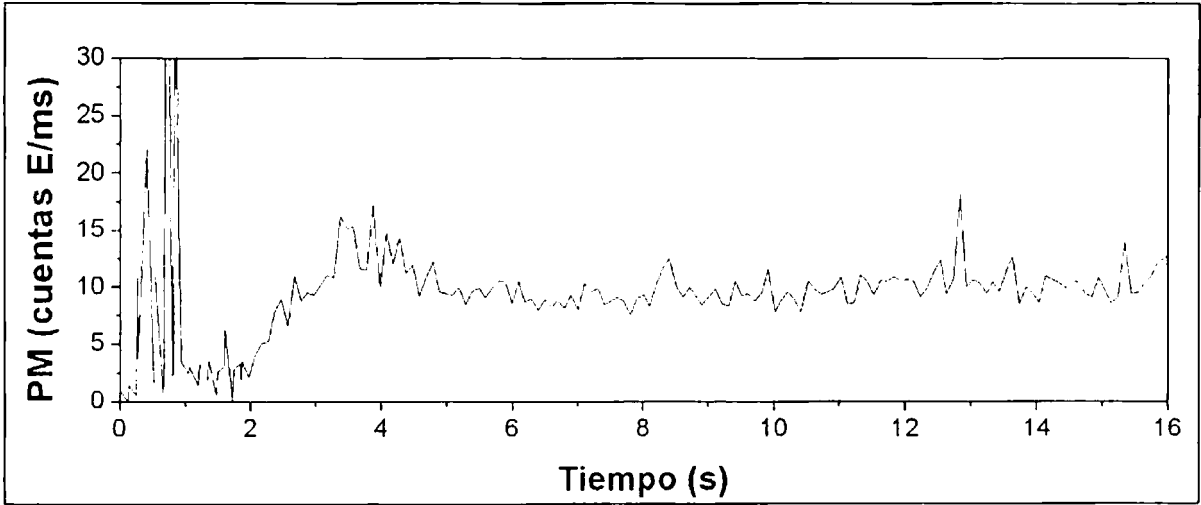


Fig. 5.30. PM en función del tiempo para el ensayo A1R1. Parte 1.

Más detalles y un estudio cualitativo se presentan en el capítulo 6. En la Fig. 5.34 se muestra la auto-correlación de la señal completa (“streaming”) de EA, a partir de la cual se determinó la velocidad de rotación de la mecha para el ensayo E1N3 dando un valor $V_{rot\ EA} = (7,194 \pm 0,005)$ vueltas/s o de $(431,6 \pm 0,3)$ RPM. Como consecuencia del tipo de método utilizado para calcularla, el valor de velocidad obtenido tiene una precisión muy buena que es posible optimizarla aún más, refinando la resolución de los máximos módulos (picos estudiados). La velocidad de rotación medida en el taladro fue de $V_{rot\ med} = (7,13 \pm 0,12)$ vueltas/s o de (428 ± 7) vueltas/minuto, estando muy próximo al valor determinado por la EA, pero con un mayor error en el método de medición.

Nota: A partir de los parámetros, como por ejemplo la PM, también se podrían divisar los picos observados en la señal de “streaming” de EA pero esto sería típicamente con una resolución muy baja. La medición de esta manera no sería muy buena ya que dependería de la detección total de los picos, y a su vez de la configuración del sistema parametrizador de la señal de EA, que involucra parámetros de ajuste como el HDT, HLT, PDT, máxima duración, y umbral. Esta dependencia podría condicionar los resultados de tal manera que no se detectaran la totalidad de los hits, hecho que distorsionaría la estimación. En condiciones normales este método podría servir como un estimador grosero de la velocidad de rotación. En la Fig. 5.35 se muestra el mismo ensayo analizado previamente con la señal de “streaming”, en el cual lo conveniente sería tomar los primeros picos para la estimación de la velocidad. Esto fue corroborado para una cantidad importante de ensayos, que mostraron que el error de la determinación de los picos puede ser considerable. Otra fuente de error de este método es el promedio que realiza la PM cuando calcula la energía MARSE, lo que se puede observar comparando las Fig. 5.33 y 5.35, en la cual varios picos de la señal completa son promediados en uno único en la PM (p.ej.: a los 0,6 segundos en ambos gráficos).

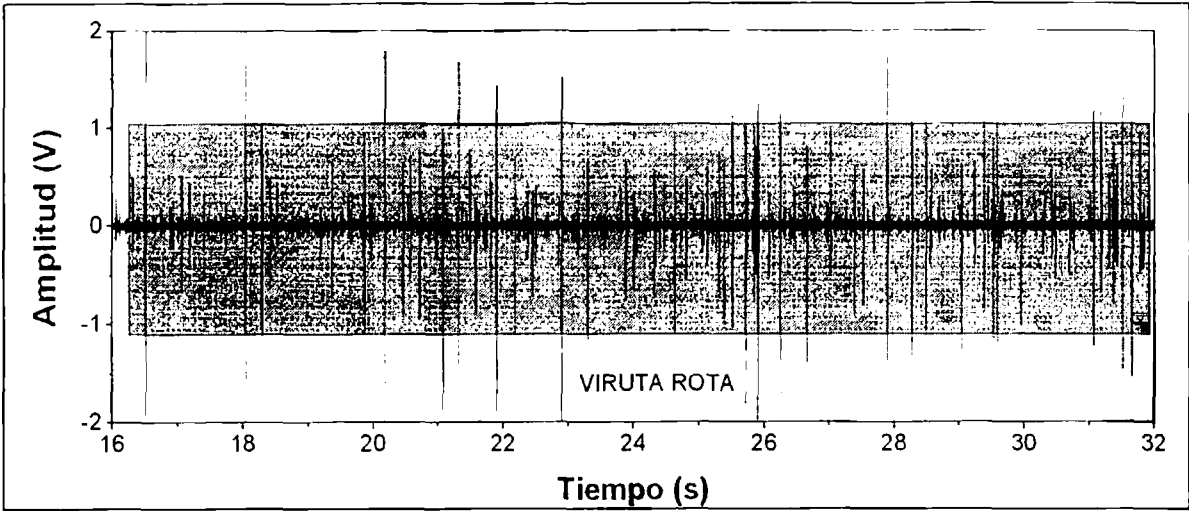


Fig. 5.31. Señal de “streaming” del ensayo A1R1. Parte 2.

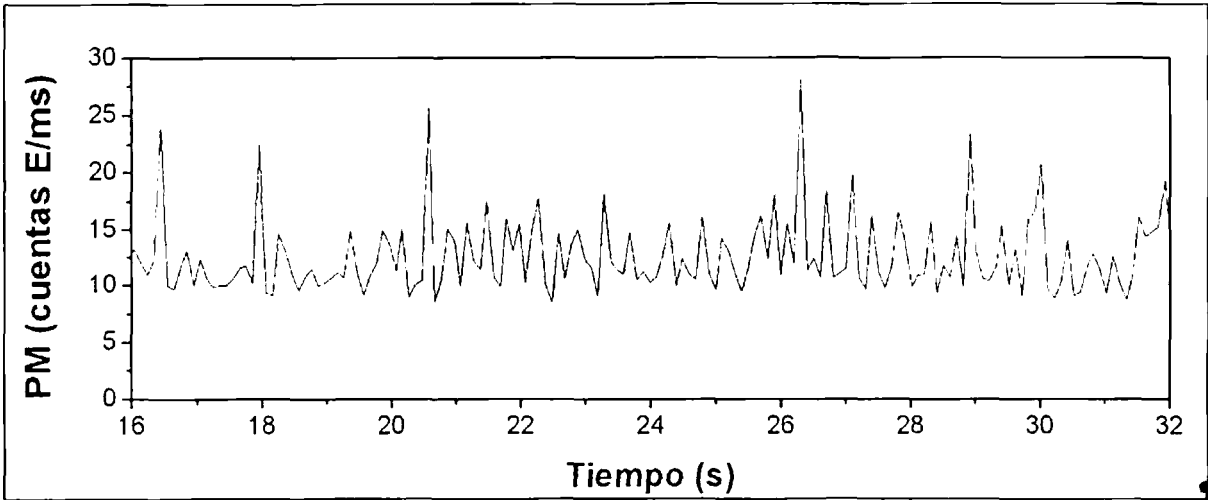


Fig. 5.32. PM en función del tiempo para el ensayo A1R1. Parte 2.

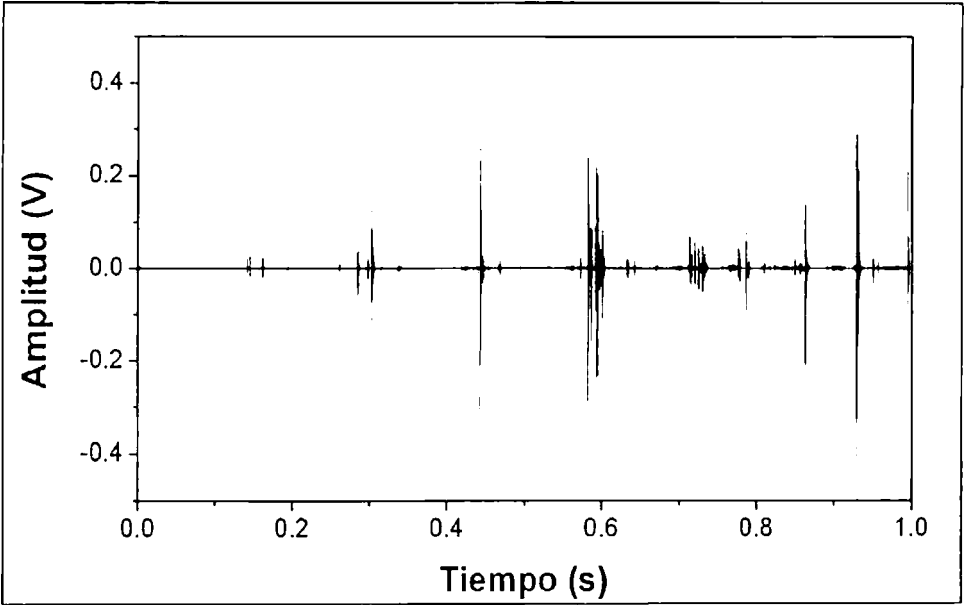


Fig. 5.33. Primer segundo de la señal de “streaming” del ensayo E1N3.

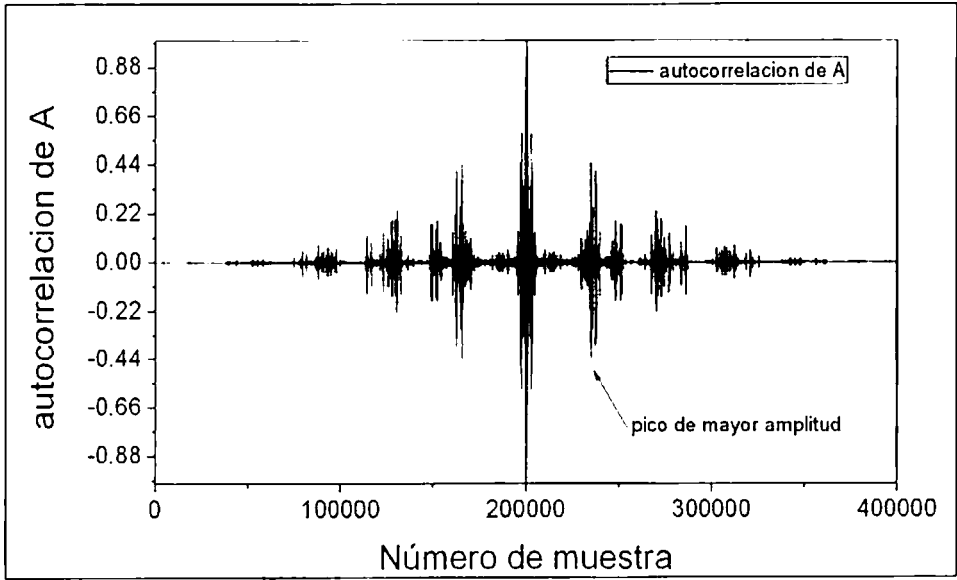


Fig. 5.34. Auto correlación de la señal de “streaming” del ensayo E1N3.

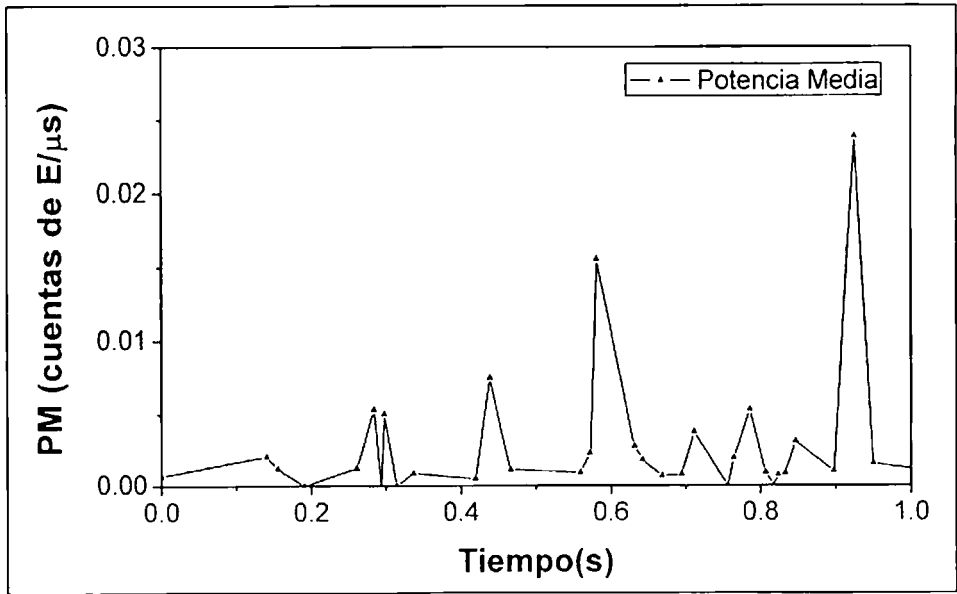


Fig. 5.35. Segundo inicial de la PM en función del tiempo para el ensayo E1N3.

5.3.4.4 Análisis de la etapa de rotura de la mecha 1

En la Fig. 5.36 se grafican 16 segundos de la señal completa de EA (“streaming”) correspondiente a la etapa del corte en la que se pronunció el deterioro de la mecha 1 (ensayo A2R1). A partir de esta señal se puede obtener valiosa información. En este caso se pudo determinar el lapso en el cual la mecha sufrió una sollicitación mecánica inadecuada que la llevó a la craterización de sus filos.

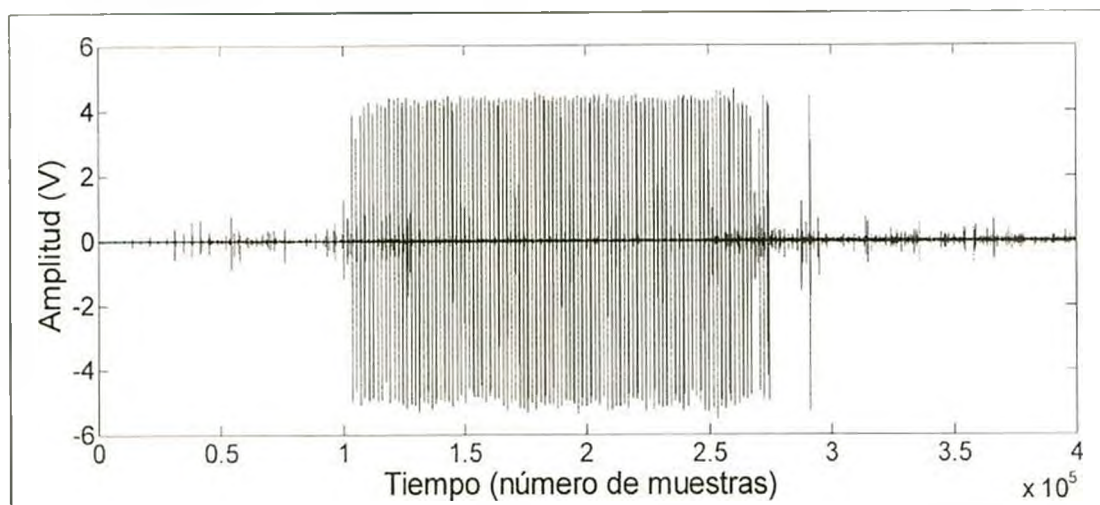


Fig. 5.36. Señal de EA (amplitud vs. tiempo) que muestran 16 segundos de la etapa de deterioro de la mecha. La tasa de muestreo usada para graficar fue de $2,5 \cdot 10^4$ muestras/s.

También se pudo corroborar que ambos filos sufrieron la misma fuente de daño, ya que a partir de la señal se pudieron estimar los tiempos de los golpes de los filos de la mecha contra alguna discontinuidad del material que la fue deteriorando, y con la velocidad de rotación conocida se pudo corroborar que eran los dos filos los que sufrieron la misma acción mecánica, golpeando cada filo una vez por vuelta. El daño fue observado al finalizar el ensayo y se muestra en la fotografía de la Fig. 5.4.a. El tiempo de deterioro fue estimado en 6,8 segundos, mientras que la velocidad de avance de la mecha era de 0,290 mm/s. A partir de una simple cuenta se pudo calcular que la mecha avanzó una distancia de 1,97 mm hasta que eliminó la interferencia en su camino que le causó la rotura. Por otra parte, luego se observó la superficie cilíndrica de la pared del agujero efectuado con la mencionada mecha, y se detectaron irregularidades en forma de rayas profundas y deformación en una zona circunscripta de esa superficie desde el borde hasta una profundidad de aproximadamente tres milímetros, pero no alrededor de todo el círculo que define el cilindro sino solo en una fracción del mismo, que se puede observar en la Fig. 5.37. Este efecto no fue observado en el resto de los agujeros realizados. En este caso también se determinó la velocidad de rotación de la mecha mediante la señal de EA, dando un valor de $(7,231 \pm 0,005)$ vueltas/s, determinando una diferencia de 6 RPM entre los valores de los ensayos de la probeta A y los de la E.

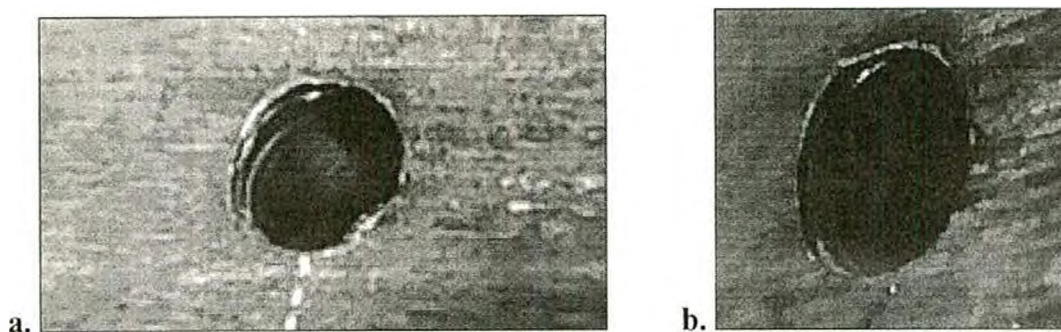


Fig.5.37. a. Rayas profundas y deformación en una parte de la superficie del agujero en el ensayo A2R1.
b. aproximación a la zona dañada.

5.4 Conclusiones del Capítulo 5

De la metodología para el estudio del desgaste de la herramienta

Con la finalidad de comenzar a desarrollar una metodología para el estudio del estado de las herramientas de corte para el taladrado de piezas metálicas, por medio del análisis de las señales de EA, se realizaron experimentos con dos casos extremos de desgaste: mecha nueva y mecha rota. Se examinaron dos líneas de exploración de la información de las señales de EA, una a partir de las formas de onda de la EA y su análisis espectral, y otra a partir de los parámetros característicos de la EA.

En primer lugar se estudiaron la mediana y la varianza de las formas de onda de la EA para los ensayos de taladrado, obteniéndose resultados poco satisfactorios para ambas. Los factores que podrían haber influenciado negativamente al método serían principalmente la complejidad de los mecanismos de EA en el taladrado, y por otro lado la inhomogeneidad de los materiales taladrados.

En segundo término, se estudiaron los parámetros de la EA, llegándose a obtener resultados alentadores en la detección de los dos estados límites del filo evaluados en pos de orientar el análisis hacia una metodología efectiva y confiable. Se evaluaron varios parámetros característicos de la EA, de los cuales se observó que la PM de la EA era el mejor descriptor del estado de la mecha. La PM surgió como una modificación de la energía MARSE, promediada en el tiempo. Se vio que este parámetro crece para el caso de la mecha con sus filos craterizados. También se observó una dependencia del material en parámetros como el RMS o la amplitud, que se hacía menor para la PM.

De los ejemplos de la obtención de información acerca del proceso de corte

Como complemento del eje central del trabajo, se muestra por medio de una serie de ejemplos, la potencialidad del método de EA para la obtención de información relevante del proceso de corte, para el caso particular del taladrado de piezas metálicas. Los casos estudiados fueron: la determinación de las etapas de corte en la realización de un agujero pasante (por medio del análisis de los parámetros de las señales de EA), la diferenciación del tipo de viruta generada en el corte (por tres métodos de análisis de las señales de EA), la determinación de la velocidad de rotación de la mecha a partir de la señal de “streaming”, y un análisis del instante de la rotura de una mecha observando la señal de “streaming” de la EA.

En la ejecución de un agujero pasante con EA se logró la detección y determinación de las etapas del corte, a partir de la construcción de un parámetro de la EA, denominado parámetro D, que permitió monitorear con detalle el pasaje de la mecha durante el taladrado hasta salir por la cara posterior del material.

Respecto a la diferenciación del tipo de viruta generada en el corte se mostró un ejemplo de cómo a partir del estudio de los parámetros de la EA se puede diferenciar cuando se está produciendo viruta continua o discontinua. Se observó que la aparición de picos de mayor amplitud en la potencia media se podía asociar a la mayor rotura de la viruta. Se pudo detectar que la emisión de viruta continua estaba correspondida con una menor dispersión de la PM, utilizándose como parámetro para cuantificar el efecto. Otra forma de visualizar el mismo fenómeno fue a partir de la señal completa de EA (“streaming”) donde se observa, superpuesta a la señal de tipo continuo, la ocurrencia un número considerable de señales tipo explosión en los momentos en que la viruta producida en el corte se rompe y sale fragmentada.

También se expuso la metodología mediante la cual a partir del “ruido” generado por el corte en el inicio del agujero en la señal completa de EA, y empleando la técnica matemática de auto correlación sobre la señal de EA se puede calcular con una gran precisión la velocidad de rotación de la mecha.

Por último se muestra como se puede extraer importante información de la señal completa de EA acerca de la rotura de la mecha ocurrida durante el proceso de corte en uno de los ensayos. De esta manera se podría inferir la ubicación del objeto que causó la rotura, así como si influyó en uno o los dos filos, y durante cuánto tiempo. Este método de estudio además de dar información del proceso de corte y de la herramienta también da idea de la homogeneidad del material.

5.5 Bibliografía del Capítulo 5

- Byrne G., Dornfeld D., Inasaki I., Kettler G., Koenig W., Teti R., "Tool Condition Monitoring (TCM). The Status of Research and Industrial Application", *Annals of CIRP*, 44, 541-567 (1995)
- Carpenter S. H., C.R. Heiple, D.L. Armentrout, F.M. Kustas and J.S. Schwartzberg, "Acoustic Emission Produced by Sliding Friction and Its Relationship to AE from Machining", *Journal of Acoustic Emission*, 10, 97-101 (1992)
- Diei E.N. and D.A. Dornfeld, "Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Face Milling", *ASME Trans., J. Eng. Ind.*, 109, 234-240 (1987)
- Dornfeld D., "Monitoring of the machining process by means of acoustic emission sensors", Acoustic emission" Acoustic Emission: Current Practice and Future directions", ASTM STP, 1077, 328-344 (1991)
- Dornfeld D. "Application of acoustic emission techniques in manufacturing", *NDT & International*, 25, 259-269 (1992)
- Du R., D. Yan and M.A. Elbestawi, "Time-frequency distribution of acoustic emission signals for tool wear detection in turning", Proceedings of the Fourth World Meeting on Acoustic Emission, Boston, MA, 269-285 (1991)
- Dunegan H.L., "Considerations for selection of advanced AE transducers" DECI Report, 1-7 (2003)
- Everson C. and S. Cheraghi, "The application of AE for precision drilling process monitoring", *Intl. J. of Mach. Tools and Manufacture*, 39, 371-387 (1999)
- Gómez M.P., C.E. D'Attellis y J.E. Ruzzante, "Estimación del Estado de la herramienta en taladrado mediante el análisis de la emisión acústica", Actas del 5to. Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, E-GLEA 5, 7-16 (2007a)
- Gómez M.P., R. Piotrkowski, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Estimation of the Tool Condition by Applying the Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals", *Rev. of Prog. in QNDE*, 894, 635-641 (2007b)
- Gong Y., C. Lin and K. Ehmann, "Dynamics of Initial Penetration in Drilling: Part 1- Mechanistic Model for Dynamic Forces", *Transactions of the ASME*, 127, 280-288 (2005)
- Heiple C., S. Carpenter, D. Armentrout and A. Mc Manigle, "Acoustic emission from single point machining: source mechanisms and signal changes with tool wear", *Mat. Eval.*, 590-596 (1994)
- Iwata K. and T. Moriwaki, "An Application of Acoustic Emission Measurement to In- Process Sensing of Tool Wear", *Annals of CIRP*, 25, 21-26 (1977)
- Jantunen E., "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 42, 997-1010 (2002)
- Jemielniak K., "Some aspects of AE application in tool condition monitoring", *Ultrasonics*, 38, 604-608 (2000)
- Kannatey Asibu E., D. Dornfeld, "A study of tool wear using statistical analysis of metal cutting acoustic emission", *Wear*, 76, 247-261 (1982)
- Ke K., J. Ni. and D. Stephenson, "Continuous chip formation in drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1652-1658 (2005)
- Ke K., J. Ni. and D. Stephenson, "Chip thickening in deep hole drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1500-1507 (2006)
- Kopac J. and S. Sali, "Acoustic Emission drilling in carbon steel and nodular gray iron", *J. of Achiev. in Mat. and Manuf. Eng.* 19, 91-95 (2006)
- Li X., "A brief review: acoustic emission for tool wear monitoring during turning", *Intl. J. of Mach. Tools and Manufacture* 42, 157-165 (2002)
- Lin S. and C. Ting, "Drill wear monitoring using neural networks", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 36, 465-475 (1996)

- Miller R.K., Dornfeld D., Hamilton A., Mitchell J., Yee K., "Process Monitoring with Acoustic Emission", NDT handbook, Tomo 5 (EA), ASTM (1987) 480-490.
- Moriwaki T., "Detection for cutting tool fracture by acoustic emission measurement", *Annals of CIRP*, 29, 35-40 (1980)
- Ohtsu M., "Quantitative AE techniques Standardized for Concrete Structures", *Advanced Materials Research*, 13, 183-192 (2006).
- PAC, "PCI-2 Based AE system User Manual Rev. 2", Physical Acoustic Corporation, Princeton, NJ (2004)
- Ravindra H. V., Y. G. Srinivasa and R. Krishnamurthy, "Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting", *Wear*, 212, 78-84 (1997)
- Saini D.P. and Y.J. Park, "A quantitative model of acoustic emissions in orthogonal cutting operations", *J. of Mat. Process Tech.*, 58, 343-350 (1996)
- Subramanian K., and N.H. Cook, "Sensing of drill wear and prediction of drill life" ASME, *Journal of Engineering for Industry*, 103, 295-301 (1977)

Apéndice 5.1. Fotografías de las virutas producidas por las mechas utilizadas

En este apéndice se indica la morfología de virutas producidas por as mechas sana y rota a través de las fotografías mostradas en las Figs. 5.38 y 5.39 respectivamente, actuando sobre la probeta E. La escala corresponde a 1 mm en la menor distancia entre líneas paralelas.

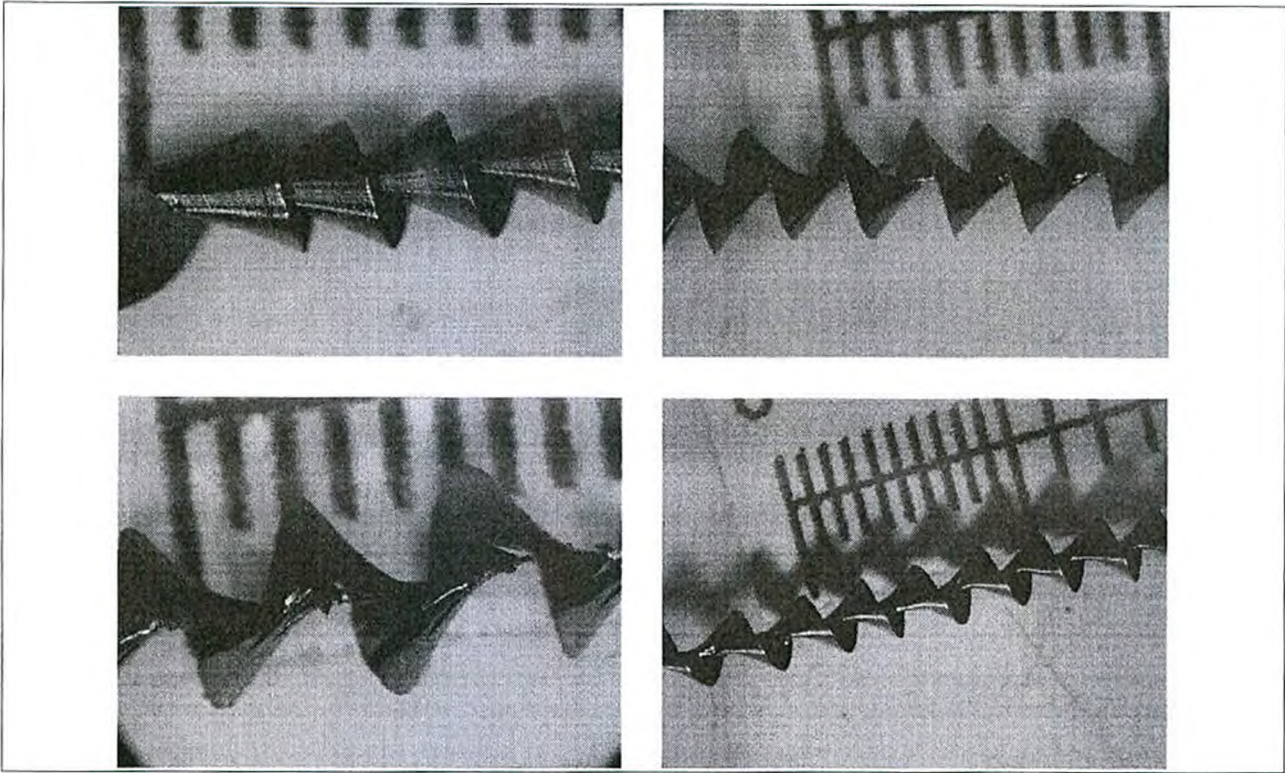


Fig. 5.38. Morfología típica de las virutas producidas por la mecha 3 sana.

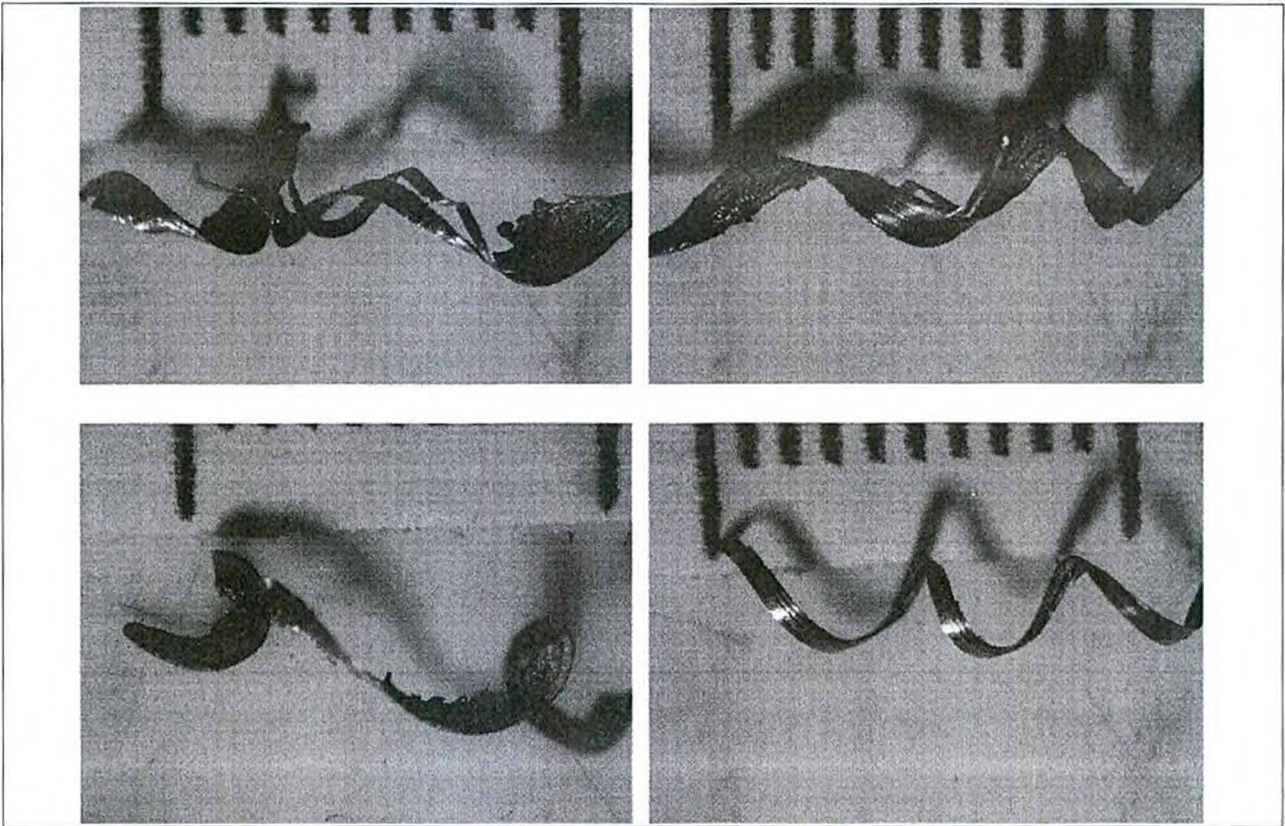


Fig. 5.39. Morfología típica de las virutas producidas por la mecha 1 rota.

Capítulo 6

Ensayos finales de taladrado en probetas hexagonales de acero

En esta etapa del trabajo se prosigue el estudio de las señales de EA generadas en el corte por taladrado, iniciado en el capítulo anterior, con el fin de extraer información relevante referida al estado de la herramienta y a las características del proceso de corte. Continuando la línea de investigación iniciada en los trabajos mostrados previamente, se realizaron mejoras sustanciales en el desarrollo del método experimental para poder obtener resultados concretos. Para esto se eligió un material más homogéneo para la construcción de las probetas a taladrar con el fin de evitar fluctuaciones en los resultados de la EA causados por inhomogeneidades. Por parte de las mechas con desgaste, se construyeron nuevos casos de daño en los filos en forma controlada, por electroerosión, de manera tal que la operación fuera repetible. Además se realizó el seguimiento del estado de desgaste de las mechas por microscopía electrónica de barrido (MEB). Otro avance importante fue la medición del torque como indicador alternativo del estado del proceso de corte y de la herramienta. Luego se buscó la relación de este parámetro mecánico con los parámetros característicos de las señales de EA.

Se continuó la utilización y evaluación del parámetro de la EA definido en el capítulo anterior, denominado “potencia MARSE media” (PM), el cual representa la energía MARSE dividida por la duración del hit. Se observó que para cada caso de estado de la herramienta estudiado, además del valor medio podía extraerse importante información de la dispersión de la PM medida en un mismo ensayo. Con tal fin se tomó como parámetro de estudio a la variancia móvil que fue representada en función de la media móvil, ambas de la PM de la EA, obteniéndose un mapa en el cual se distribuyeron en zonas bien definidas los resultados para cada uno de los distintos tipos de desgaste de las mecha.

Luego, se completó el estudio del proceso de corte a partir del análisis en frecuencia de las formas de onda de las señales de EA que se había iniciado correctamente en el Capítulo 4, para señales de ensayos de torneado; y que en el Capítulo 5 mostraron resultados poco satisfactorios para el caso del taladrado, tal vez como consecuencia de una mayor complejidad de los procesos de emisión de ondas elásticas en ese tipo de corte. En pos de solucionar la dificultad se halló una metodología alternativa que permitió abordar el problema a partir de seleccionar para el análisis en frecuencia únicamente las señales de EA denominadas “estacionarias”. Analizando la potencia espectral de las señales, calculada a partir de la FFT, se realizó una separación en bandas de frecuencia y se evaluó el comportamiento de cada banda para cada caso de desgaste de la herramienta. La utilización de la FFT en lugar de onditas (“wavelets”) se efectuó por las características de “estacionariedad” de las señales estudiadas.

Por último para una tanda de diez ensayos de taladrado se calculó la velocidad de rotación de la mecha por dos caminos. Por un lado a partir de los parámetros de la EA y por otro utilizando la señal completa de EA (de “streaming”).

6.1 Introducción

En capítulos anteriores se han exhibido los objetivos del estudio de esta tesis, y en particular en el capítulo pasado, en el cual se muestra la puesta en marcha de una etapa preliminar del estudio del desgaste de la herramienta de corte para el caso del proceso de taladrado de piezas metálicas. Para esto, se ha elegido como método indirecto de evaluación del desgaste de la herramienta de corte a la EA, la cual ha mostrado desde hace poco más de tres décadas su utilidad al respecto.

El objetivo del trabajo emprendido en este capítulo apunta a fortalecer las líneas esbozadas en los capítulos anteriores respecto de la búsqueda de parámetros de la señales de EA que condensen información relevante del estado de la herramienta y del proceso de corte, la cual pueda extraerse mediante un análisis sencillo. Diferenciándose de muchos trabajos contemporáneos en los cuales se toman los parámetros tradicionales de la EA y se les aplican sofisticados artificios para el análisis de las señales [Zhu y otros (2009)] [Teti y otros (2010)], en este trabajo se vuelve al origen y se replantea el tipo de parámetro a estudiar, más que la metodología de exploración.

Durante el corte en el taladrado, la mecha le entrega trabajo a la pieza, y se activan diversos mecanismos que generan ondas elásticas (EA), con frecuencias en el rango del ultrasonido [Stephens y Pollock (1971)] [Jantunen (2002)]. Junto a otros métodos indirectos, estudiando la EA se busca obtener información del estado de la herramienta de corte a tiempo real [Byrne (1995)] [Dornfeld (1992)]. Como ya se ha visto, la señal de EA puede ser clasificada según su evolución temporal como tipo “estallido” (“Burst”) o tipo “continua”. La ocurrencia de ambos tipos de señal estará condicionada por los mecanismos involucrados en cada caso específico de corte [Moriwaki (1980)] [Li (2002)]. Estas señales provienen de procesos estocásticos [Diei y Dornfeld (1987)] en especial las que se generan por la rotura de la viruta, y se pueden estudiar a partir de parámetros característicos o de las formas de onda propiamente dichas. Cabe aclarar que el carácter estocástico del proceso de corte también puede estar relacionado con la distribución de características del material como la resistencia y la dureza que pueden causar fluctuaciones aleatorias tanto en las fuerzas relacionadas con el corte como en la EA [Grabec y Leskovar (1977)]. Chungchoo y Saini (2000) observaron que para el torneado, la EA permite detectar la rotura de la viruta, mientras que las señales de las fuerzas no.

En el presente capítulo se toma la experiencia adquirida en los experimentos previos, que han sido realizados para poner a punto el método de ensayo, los cuales por ser primeras pruebas adolecieron de algunas deficiencias en su implementación. Esta experiencia ha sido capitalizada como parte del aprendizaje para la presente ejecución, permitiendo la realización de sustanciales cambios en los procedimientos a seguir, como ser un mayor control de los parámetros relacionados con los materiales y con la ejecución de los experimentos.

Retomando las conclusiones del capítulo anterior se avanzó sobre la mejora de la elección del material a maquinar, la forma de las probetas, el tipo de desgaste inducido en las mechas, y el método para realizarlo (que permitiera repetitividad para su construcción). También se incorporó la medición de algún parámetro alternativo a los ya analizados de la EA, como por ejemplo el torque, y el seguimiento y control de los casos de mechas gastadas por microscopía electrónica. Por otro lado se prosiguieron los ensayos en condiciones similares a los del capítulo anterior respecto de la máquina herramienta utilizada y del equipo de EA y su configuración, pero intensificando el control de procedimientos claves para el ensayo como por ejemplo la adhesión del sensor de EA a la probeta, o la uniformidad del caudal del fluido lubricante para el corte.

Profundizando lo mencionado en el párrafo anterior, se buscó que las características del material taladrado no interfirieran en la determinación de cada caso o estado de la herramienta, con el fin de evitar confusiones respecto de los resultados obtenidos. De este modo, se seleccionó, para la construcción de las piezas a taladrar, un acero comercial de composición certificada, con una buena homogeneidad en su tamaño de grano y dureza, y que además mostrara baja cantidad de inclusiones, preferentemente blandas. La morfología de las probetas estuvo condicionada al requerimiento anterior, dependiente del proceso de manufactura del material elegido. Con esos

argumentos, se supuso que el acero proveniente de una barra hexagonal trefilada podría cumplir en la región del centro de la barra los requisitos pedidos. Por tal motivo se diagramó un experimento de taladrado de solo un agujero en el centro de probetas hexagonales, una para cada ensayo.

Respecto de la mejora en la calidad de la representación de estados concretos de desgaste de la herramienta, se deterioraron mechas sanas y se construyeron distintos casos adicionándoles defectos controlados por medio de un proceso de electroerosión. Aplicando esta forma de eliminar material de la mecha se pueden simular defectos reales. En la realización de la experiencia se diseñaron procedimientos destinados a construir casos de desgaste de los filos que pudieran ser repetidos con mucha precisión, con el objetivo de poder replicar similares condiciones a demanda. De esta manera, fueron generados patrones de pérdida de filo y de craterización de las mechas. Además se sumaron casos adicionales de mechas nuevas.

Para verificar la correcta fabricación de los casos de mechas “gastadas” y el control de los casos de mechas nuevas se recurrió a la utilización de microscopía electrónica de barrido, dada la gran profundidad de campo de este método, mediante el cual se pueden registrar los perfiles de las mechas a distintos aumentos, antes y después de los ensayos. Este método permite realizar una amplia evaluación del desgaste como seguimiento de la condición de las mechas.

Como ha sido discutido en el Capítulo 2, un parámetro que en la literatura muestra su utilidad para obtener información de la dinámica del proceso durante la ejecución de un proceso de maquinado de corte, es el torque realizado por la mecha sobre la pieza. Así, se podría correlacionar la información obtenida por la EA para distintos casos de degradación de la herramienta a los resultados del torque, para comparar ambos resultados y darles un marco de referencia mecánico a los parámetros de las señales de EA medidas. En el capítulo 2 también se ha citado bibliografía que estudia modelos de torque para el taladrado, tema que hasta la actualidad se encuentra en permanente evolución [Watson (1985)] [Elhachimi (1999)] [Zhang (2001)] [Ke (2006)]. De este modo, se pueden relacionar las características de la mecha, del material y del proceso de corte, y ver cómo estas influyen sobre el torque.

Ya habiéndose descrito hasta aquí las posibles vías de avance en el método experimental, se prosigue con un repaso de los objetivos buscados y de los procedimientos que se utilizarán en el procesamiento de las señales de EA y del torque.

En el capítulo anterior se estudiaron casos extremos del estado de las mechas, planteándose dos formas de abordar el problema, por un lado a partir del espectro tiempo-frecuencia, y por el otro utilizando los parámetros de la EA. Entonces, se verificó que el camino de los parámetros de la EA llevaba a resultados alentadores, encontrándose uno denominado potencia MARSE media (PM) definida como el cociente entre la energía MARSE y la duración del hit, que era buen descriptor de estas diferencias. La PM además permitió obtener otra información extra relativa al proceso de corte como por ejemplo el tipo de viruta generada. Por esta razón, en el presente capítulo se comienza la clasificación de los distintos tipos de casos de desgaste de las mechas basándola en la información extraída de la PM de la EA [Gómez y otros (2007a)] [Gómez y otros (2009)]. También se estudia y se relaciona con la PM el torque producido durante el corte. [Gómez y otros (2010)] [Gómez y otros (2011)]

Luego haciendo referencia al estudio en frecuencia de las formas de onda de la EA, se evaluó la causa del fallido análisis ocurrido en el Capítulo 5 con la idea de modificar el procedimiento. La EA puede considerarse un proceso estocástico y estudiarse como tal. De tal forma las señales denominadas tipo “estallido” se comportan de forma notoriamente “no estacionaria” mientras que las de tipo “continuas” podrían ser estacionarias o mejor dicho “cuasi estacionarias”. Por tal motivo, teniendo en cuenta que las señales de tipo estallido provienen de la rotura de la viruta y de los golpes de esta con otros cuerpos, se podrían extraer del análisis, dejando solo las señales continuas que representan a los fenómenos de fricción y deformación, que están íntimamente ligados al estado del filo de la herramienta. Por lo tanto, en la descomposición de las señales cuasi estacionarias, que de aquí en adelante serán denominadas “estacionarias” en el espectro de frecuencias, una alternativa viable sería la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT).

En partes previas del trabajo (Cap. 4 y 5) se tomaron ambos tipos de señales de EA por lo que se debía emplear un método más abarcador como las onditas (“wavelets”). Para estudiar la estacionariedad de las señales se puede hacer estadística de segundo orden, seleccionando las señales estacionarias a través de la demostración de la invariancia de los momentos de primer y segundo orden de estas [Franks (2000)].

6.2 Método experimental

Los experimentos realizados apuntaron en primer lugar a la caracterización del desgaste de la herramienta y del proceso de corte a partir del estudio de los parámetros de la EA, el torque, las formas de onda y la señal completa de EA (streaming), en el taladrado de probetas hexagonales de acero. Para la realización de los ensayos se estableció una uniformidad en la velocidad de rotación de la mecha, la velocidad de avance, la lubricación, el tipo de mecha y su diámetro, así como la geometría original y el material de los filos de corte.

En esta sección se describe la preparación y la metodología para la ejecución de los experimentos, así como los métodos de análisis de las señales registradas.

6.2.1 Preparación de los experimentos

6.2.1.1 Construcción de las Probetas

Para la realización de los ensayos expuestos en este capítulo, se preparó un universo de 40 probetas hexagonales de acero SAE 1040 de 95 mm de longitud y 14 mm de ancho (entre caras opuestas del prisma hexagonal). En la Fig. 6.1 se puede observar la forma de una de las probetas a taladrar. Se realizaron estudios para corroborar la homogeneidad y la uniformidad del tamaño de grano y la dureza del material seleccionado para ser taladrado, así como el bajo contenido de inclusiones. Esas características fueron esenciales para garantizar la repetitividad de los ensayos y resultados.

Se cortaron sistemáticamente porciones de las barras de acero comerciales de formato hexagonal de las cuales se extrajeron las probetas, que fueron numeradas de manera sucesiva según su posición original en la barra. Se midió la dureza Rockwell B en seis puntos de las barras, arrojando un valor de $98,5 \pm 1,5$. El tamaño de grano también fue medido en 6 puntos de las barras extrayéndose un valor promedio de 7-8 según la norma ASTM E112 para todas las muestras, mostrando una similitud para todos los casos. En la Fig. 6.2 se puede observar como ejemplo la microestructura en el plano formado por el eje principal de la pieza y otro perpendicular al mismo, en una zona correspondiente al núcleo de la barra, por donde transcurre el agujero. En el ejemplo se muestran la primera probeta y la número 40. En estas figuras se puede observar además del tipo y tamaño de grano la dirección dada por el trefilado.

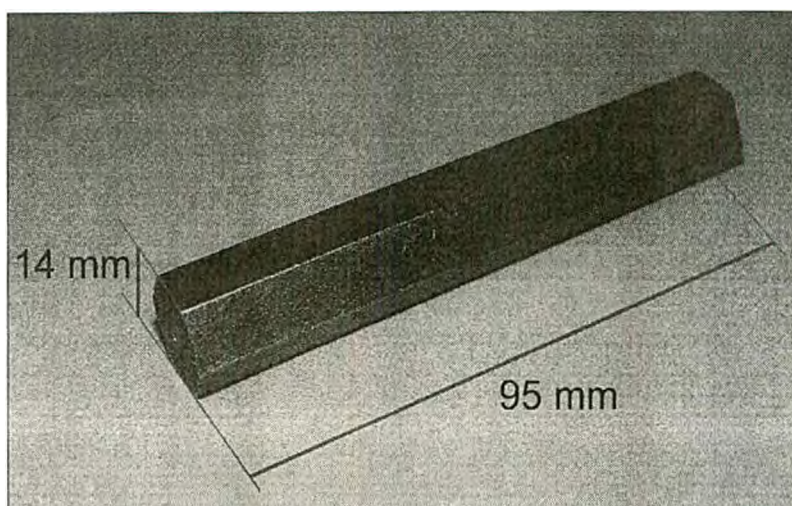


Fig. 6.1. Probeta hexagonal de acero SAE 1040. En la superficie hexagonal transversal se observa el agujero guía.

La composición química del acero utilizado en las probetas, dada por el fabricante es:

C: 0.40 Mn: 0.72 Si: 0.29 P: 0.011 S: 0.012

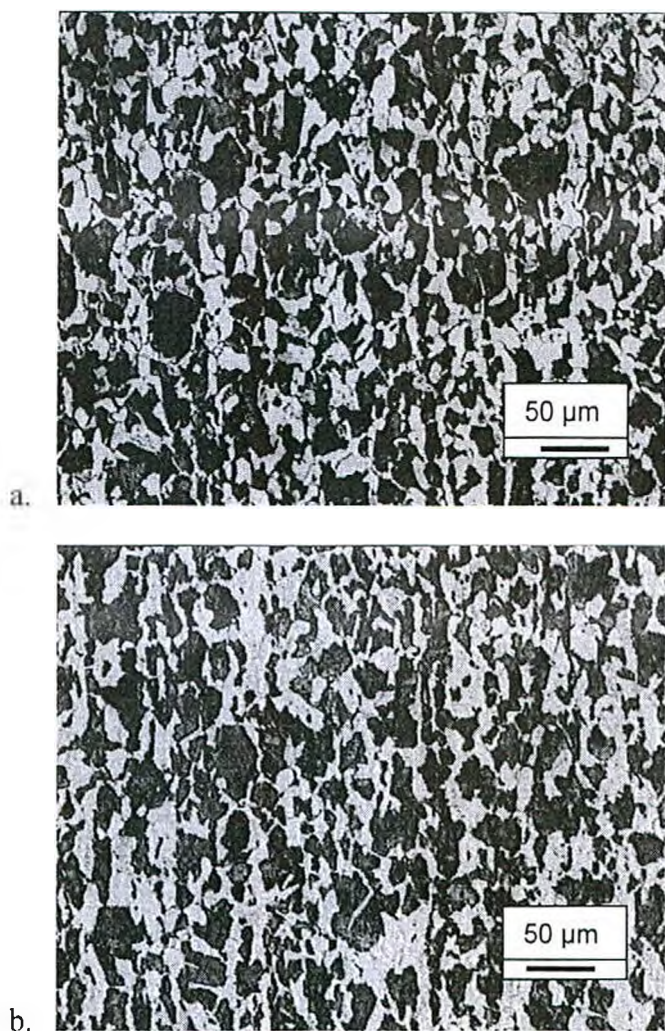


Fig. 6.2. Micrografías del material de las probetas en dos lugares distantes. a. Probeta 1.
b. Probeta 40.

Inclusiones

Se realizaron metalografías para la búsqueda de inclusiones y precipitados, no habiéndose encontrado ese tipo de discontinuidades del material, en cantidad y tamaño que pudieran afectar el estado de las mechas o alterado la tasa de la emisión de señales de EA.

Agujero guía

Previamente al ensayo de taladrado, se realizó en cada una de las probetas un agujero guía de 1,5 mm de diámetro y de 10 mm de profundidad. El objetivo del mismo fue estudiar dos situaciones de corte, una evitando la acción del cincel de la punta de la mecha y posteriormente dejando que esta actúe en el trayecto final del agujero correspondiente a la profundidad mayor de 10 mm. En la última etapa operó la punta completa de la mecha. Por otra parte, el comienzo del corte con agujero guía facilitó el ingreso de la mecha en el sentido de sus etapas preliminares del corte discutidas en capítulos anteriores.

6.2.1.2 Mechas con desgaste inducido artificialmente

Las herramientas de corte utilizadas en los ensayos correspondientes al presente experimento fueron mechas de acero rápido HSS de uso comercial de 5 mm de diámetro. En la Fig. 6.3 se observa el espectro por EDAX del material de la mecha. En esta se observan elementos como el tungsteno, el vanadio, el cromo que la optimizan en sus propiedades mecánicas, así como de azufre que mejora su afilabilidad.

Los estados de desgaste de las mechas fueron:

- sin deterioro con muy poco uso
- sin deterioro pero con deficiencias de fabricación
- con filo eliminado
- con esquina externa gastada (redondeada)
- con filos craterizados mecánicamente
- con filos craterizados por electroerosión

Siendo ocho los patrones utilizados en los experimentos, el detalle de los desgastes y la nomenclatura pueden encontrarse en la Tabla VI.I.

Para el deterioro artificial de las mechas se utilizaron métodos mecánicos y electroerosión. En algún caso de mecha sin deterioro se hace la distinción de defectos de terminación en su fabricación, respecto de las mechas nuevas bien manufacturadas. Para los denominados filos eliminados, se realizó por electroerosión un plano perpendicular sobre cada filo.

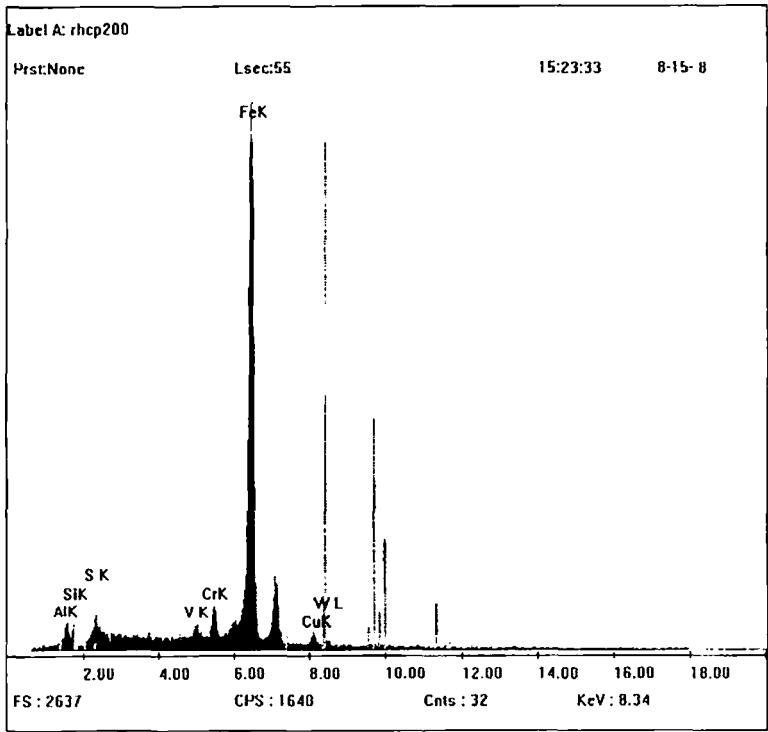


Fig. 6.3 Espectro EDAX para una de las mechas utilizadas.

6.2.1.2.1 Seguimiento del estado de las mechas con microscopía electrónica de barrido

Para comprobar el estado de cada unas de las mechas, tanto de su integridad completa como la específica de sus filos, se utilizó microscopía electrónica de barrido (MEB), realizando un seguimiento de la evolución de las mismas. La ventaja de este tipo de observación, más allá de la posibilidad de obtener un mayor aumento, reside en su gran campo focal, muy útil para la visualización global de un cuerpo de tamaño macroscópico y forma tridimensional como lo es una mecha, y en particular su punta que es el objeto del estudio. En el Capítulo 3, se ha mencionado que este método comenzó a utilizarse en los años 70 como lo indica la bibliografía [Casey y Wilks (1976)]. En el presente trabajo, dado que las mechas con y sin defectos han sido utilizadas en más de un agujero, se realizó un seguimiento del desgaste de los filos por medio de la MEB a distintos aumentos. La excelente versatilidad respecto de la focalización de objetos tridimensionales, se puede ver en la Fig. 6.4 donde se muestra el caso de una mecha nueva. También la posibilidad de variar muchos órdenes de magnitud el aumento de la imagen fue utilizada en la presente investigación, así como la identificación de elementos en la composición de los especímenes estudiados (mechas, probetas, viruta, etc.) a partir de un módulo de análisis de espectroscopía EDAX (por dispersión de rayos X) solidario al MEB.

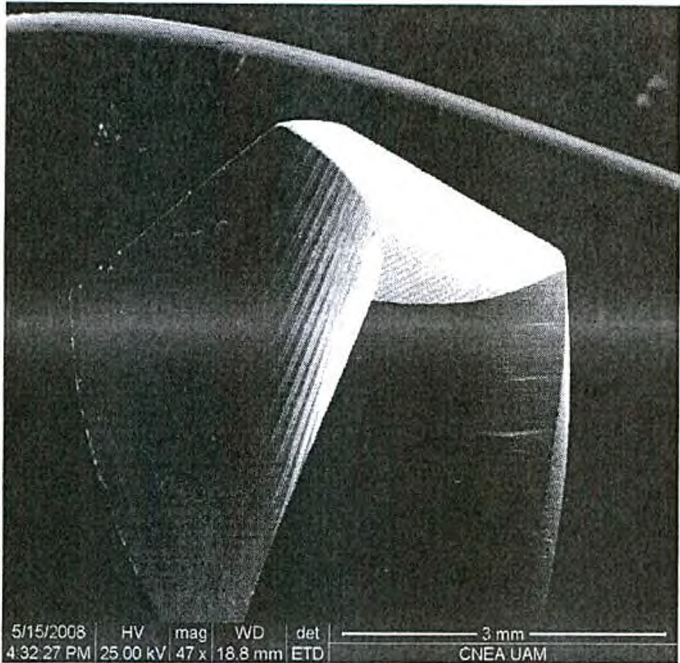


Fig. 6.4. Imagen por MEB de una mecha nueva. Se observa toda la mecha en foco.

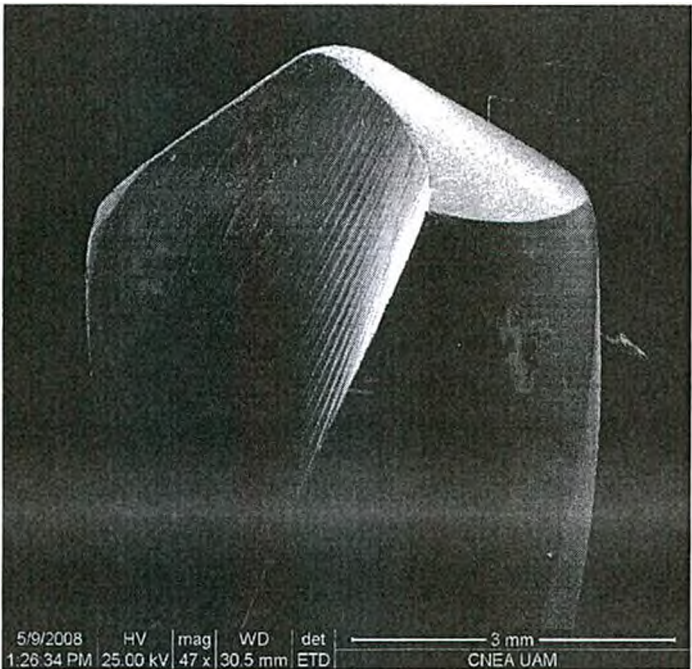


Fig. 6.5. Ejemplo de deterioro mecánico de la mecha en la esquina externa.

6.2.1.2.2 Deterioro no controlado de las mechas (método mecánico)

Las mechas correspondientes al caso de deterioro mecánico fueron dos, habiendo sido una de estas utilizada en el capítulo anterior. La mecha mencionada había sufrido la craterización de sus filos de manera natural y mecánica, cuando estaba efectuando una operación de taladrado. La segunda mecha deteriorada mecánicamente fue gastada en las esquinas externas por medio de una piedra de desbaste tal como se puede observar en la Fig. 6.4. Debido a que el modelo de la mecha rota no era fácilmente reproducible ya que era muy poco probable conseguir una rotura semejante, se añadieron al estudio casos que si pudieran ser fácilmente imitados. De tal forma, se pasó a la construcción de casos “modelo” de desgaste de las mechas que fueron realizados en situaciones de mayor control del proceso de deterioro. A continuación se detallará como se efectuó la modificación de los filos de corte de tres mechas por electroerosión.

6.2.1.2.3 Deterioro controlado del filo de las mechas por electroerosión

En este caso se modificaron características de los filos de las mechas utilizando una máquina de electroerosión, con la cual se construyeron dos tipos de defectos en los filos de corte, siendo el mismo tipo de defecto para los dos filos de la mecha. Los defectos inducidos fueron por un lado la eliminación del filo agudo de corte a partir de aplicarle un plano perpendicular a la bisectriz del ángulo del filo, realizando el plano a dos ángulos distintos, y por otro la realización de cráteres en los filos. A continuación se detalla el procedimiento seguido.

Método para deteriorar el filo de las mechas con electroerosión.

Para la electroerosión de los filos de las mechas se utilizó una máquina marca CT, modelo DI 25 la cual se puede observar en la Fig. 6.6. Este equipo posee dos partes principales que son la cuba de electroerosión adonde se coloca la pieza a erosionar (Fig. 6.6.a), y por otro el módulo de control en el cual se encuentran los ajustes para comandar la tarea (Fig. 6.6.b).

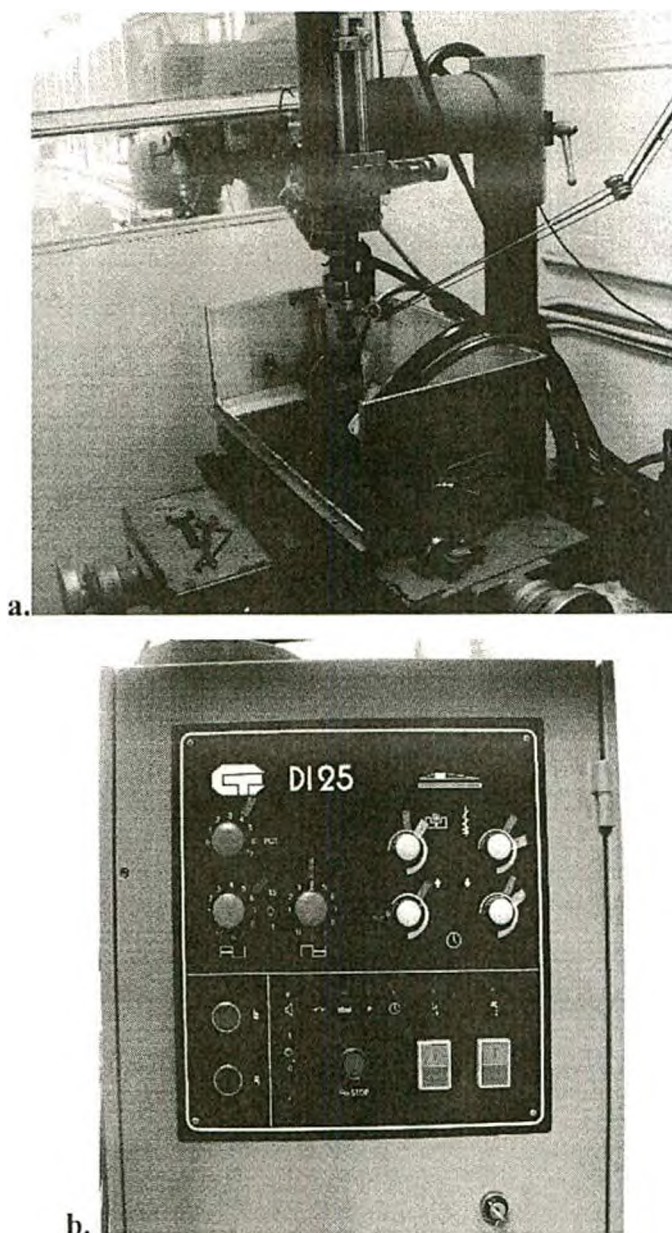


Fig. 6.6. Máquina de electroerosión. a. Cuba de electroerosión. b. Panel de control.

La electroerosión consiste en el arranque de partículas de una pieza por parte de un arco eléctrico formado entre un electrodo y la pieza, los cuales están separados por un dieléctrico. En este caso se utilizó como dieléctrico querosén de uso aeronáutico.

Deterioro de los filos con un plano por electroerosión

Se detalla a continuación el procedimiento seguido para las dos mechas las cuales fueron deterioradas por la electroerosión de sus filos. Se colocó la mecha en una morsa dentro de la cuba de la máquina de electroerosión (Fig. 6.7), en la posición correcta para realizarle un plano sobre cada uno de los filos (Fig. 6.7). Para el primer caso, se llevó el ángulo entre la mecha y la horizontal dada por la morsa a un valor de (30 ± 2) grados, colocando el filo a deteriorar paralelo a la superficie horizontal de la base. Luego se ajustó la máquina de electroerosión a los valores mínimos posibles de corriente y de tiempo de acción, siendo estos de 3,3 A y 2 μ s respectivamente. El pulso cuadrado activo se reactivó cada 1,5 μ s de inactividad. El voltaje de los pulsos fue de 80 V, siendo la energía de los pulsos de 0,5 mJ con una potencia de 264 W. Se utilizó un electrodo cilíndrico con forma de hongo de aproximadamente 6 cm de diámetro (Fig. 6.7). Se bajó el electrodo tal que su superficie inferior quedara paralela al filo a erosionar. Se operó la máquina por 90 segundos. En la Fig. 6.8 se observa uno de los planos obtenidos, que quedo definido por el filo y la perpendicular a la bisectriz interna del ángulo entre el filo de la mecha y la flauta. Para la segunda mecha se repitió el procedimiento cambiando el ángulo entre la mecha y la horizontal dada por la morsa a un valor de (40 ± 2) grados.

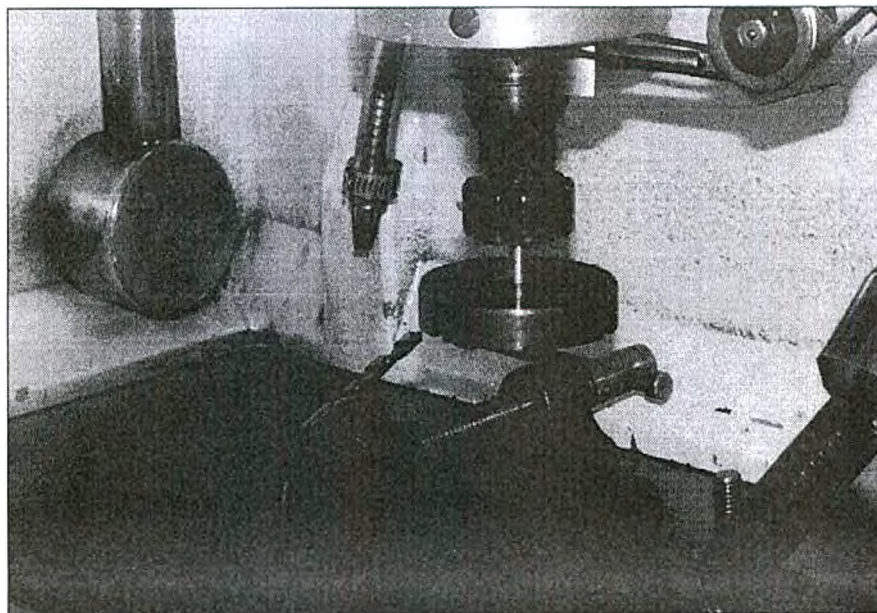


Fig. 6.7. Montaje para el aplanado del filo de la mecha.

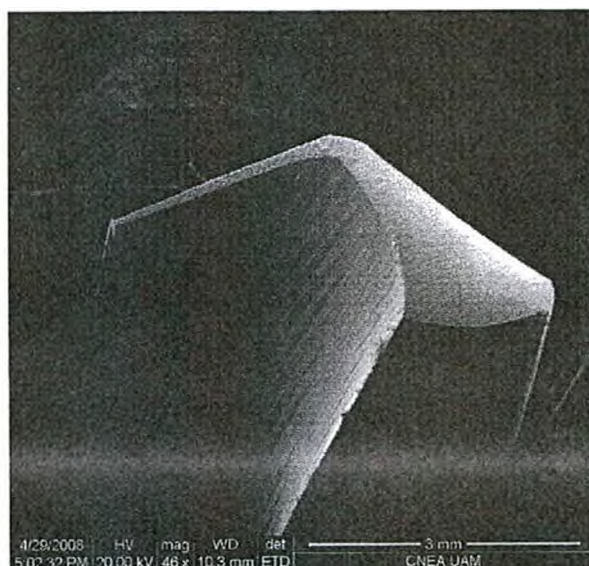


Fig. 6.8. SEM de mecha con filo gastado por electroerosión.

Deterioro de los filos con cráter cilíndrico de 500 μm de diámetro.

Para la realización de los cráteres cilíndricos de 500 micrones de diámetro se colocó la mecha en una morsa en la cuba de electroerosión de manera similar que en el caso anterior. También de manera oblicua a 35 grados de la horizontal, con uno de los filos apuntando hacia arriba y paralelo a la superficie horizontal. Se ajustó la máquina de electroerosión a valores de corriente tiempo de activación y voltaje similares que en el caso anterior. El electrodo consistió en un alambre móvil que se desplazaba por un sistema de poleas transmitiendo la corriente (Fig. 6.9). Se utilizó un alambre de 0,3 mm de diámetro. Se bajó el alambre de forma tal que intersecara el filo de la mecha en la mitad, siendo ambos perpendiculares. Nuevamente se operó por 90 segundos. Se repitió el procedimiento para el otro filo, y para ambos filos de otra mecha en el último caso con alambre más fino. En la Fig. 6.10 se puede observar la imagen MEB de uno de los filos con un cráter artificial por electroerosión.



Fig. 6.9. Montaje para craterización de la mecha.

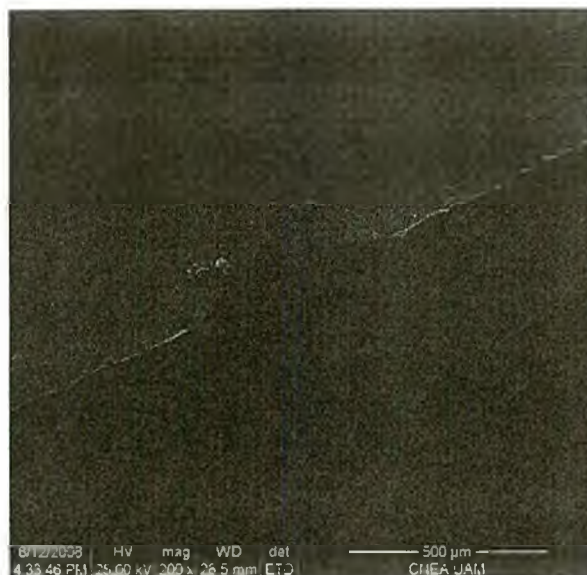


Fig. 6.10. MEB de un filo de mecha con cráter artificial por electroerosión.

6.2.1.2.4 Condición de las mechas. Nomenclatura

En la Tabla VI.I se describen los ocho casos de mechas utilizadas en el presente trabajo. La información vertida se refiere por un lado al estado de cada mecha con o sin daño “real” o artificial. Por otra parte la condición se refiere a la descripción de cada caso puntual. Cabe aclarar que en esta nomenclatura, cuando se trata el caso de las mechas sin daño artificial se describen tres casos para los cuales se utiliza la denominación “filos nuevos”, uno para el de mecha “Nueva” (FN1), otro para “mecha con muy poco uso” (FN2) y otro para “mecha con defectos de terminación en su manufactura” (FN3). La utilización de la terminología “filos nuevos” se refiere a que las mechas han sido utilizadas en un número de agujeros menor que 15 en total desde su estreno. Las mechas de los dos primeros casos son provenientes de un mismo fabricante mientras que las del tercer caso son de otro. Estas últimas mostraron notorias deficiencias en la terminación de los filos, que produjeron ciertos efectos que luego se evidenciaron en los resultados de las mediciones de la EA. La nomenclatura utilizada es cercana al acrónimo de cada condición. En la Fig. 6.11 se pueden observar las puntas de las mechas para los ocho distintos estados de desgaste, las imágenes fueron obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB). Las figuras a, b, c y d corresponden a los casos de menor desgaste mientras que las f, g, h, e i son aquellas con mayor daño (de los filos las tres primeras y de la esquina externa la última). En la figura se detallan la escala de cada micrografía y si la punta de la mecha está hacia arriba o abajo.

Tabla VI.I. Condición de las mechas.

Mecha	Estado	Condición	Nomenclatura
1	Sin daño artificial	Nueva con filos nuevos buenos.	FN1
2	Sin daño artificial	Muy poco uso con filos nuevos buenos.	FN2
3	Sin daño artificial	Nueva con filos nuevos defectuosos por fabricación.	FN3
4	Dañada artificial	Filos con cráteres por electroerosión.	FCE
5	Dañada artificial	Filos dañados por electroerosión (caso 1).	FE1
6	Dañada artificial	Filos dañados electroerosión (caso 2).	FE2
8	Dañada artificial	Esquinas externas gastadas mecánicamente.	EGM

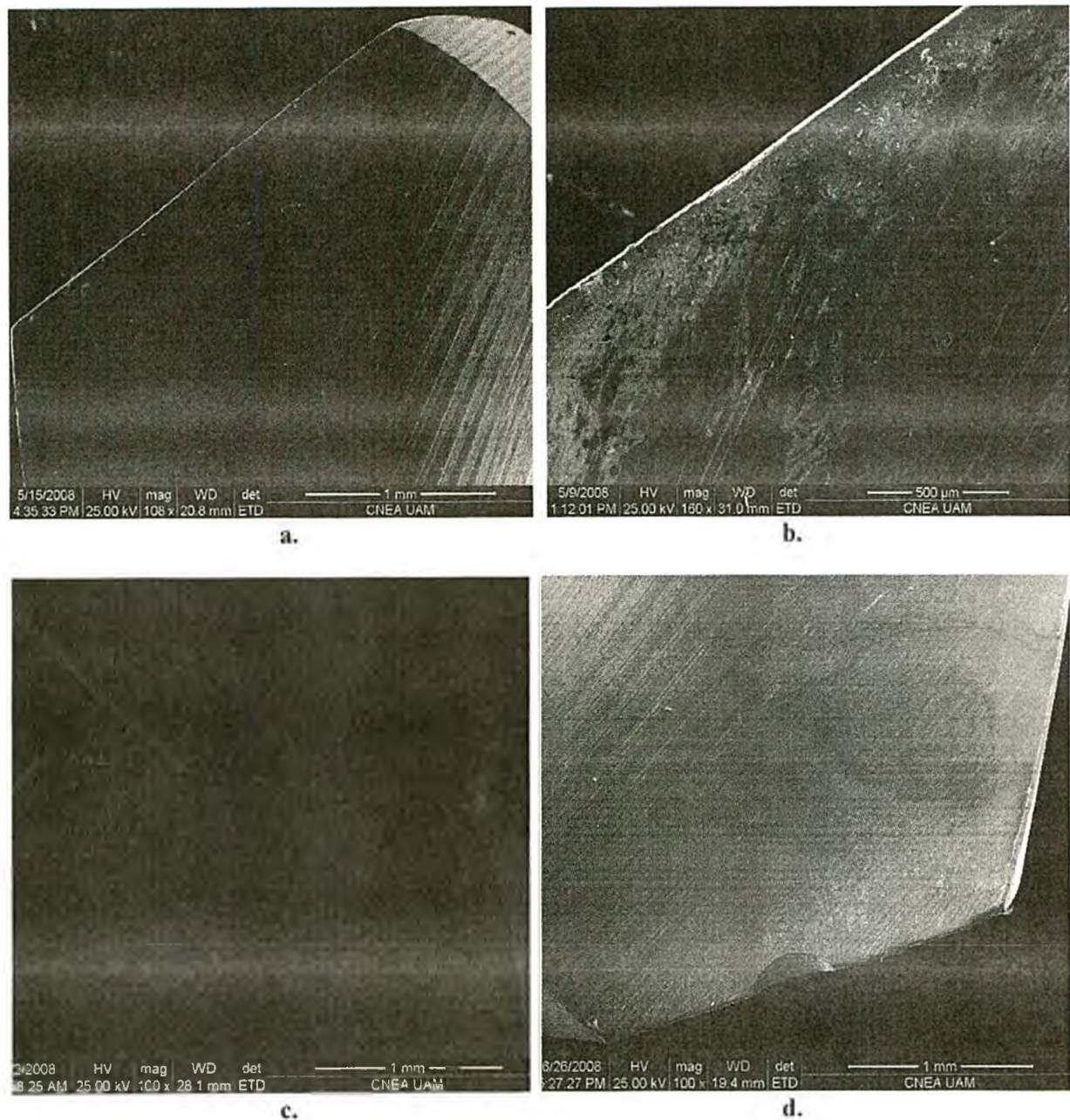
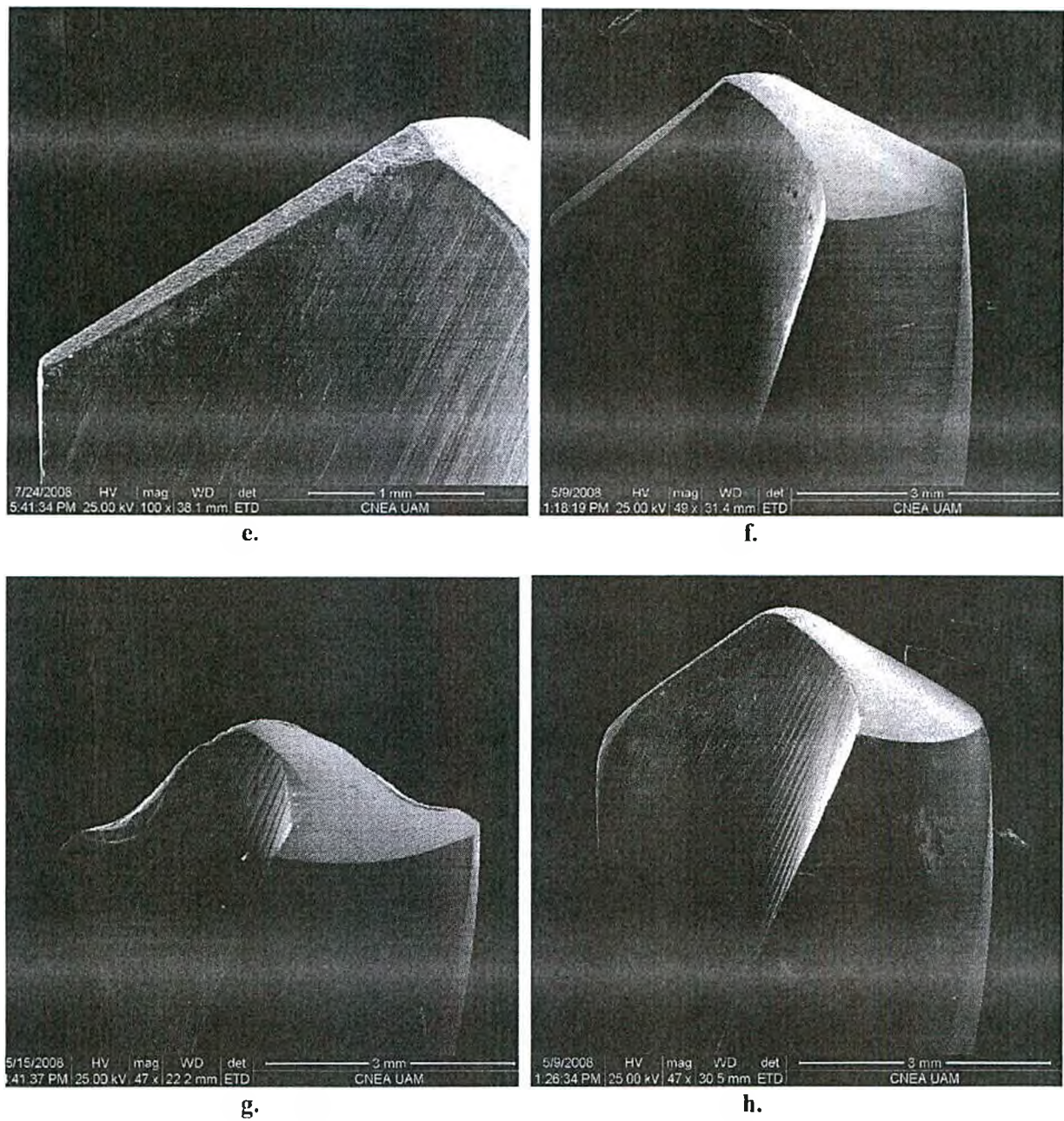


Fig. 6.11. Puntas de las Mechas con distintos estados de desgaste. Imágenes de MEB de los ocho casos analizados.



e. Mecha FE1. Filo eliminado 1. (Escala 1 mm) (Vista hacia arriba)
f. Mecha FE2. Filo eliminado 2. (Escala 3 mm) (Vista hacia arriba)
g. Mecha FCM. Filo con cráter mecánico. (Escala 3 mm) (Vista hacia arriba)
h. Mecha EGM Esquina gastada. (Escala 3 mm) (Vista hacia arriba)

Fig. 6.11. (cont.). Puntas de las Mechas con distintos estados de desgaste. Imágenes de MEB de los ocho casos analizados.

6.2.1.3 Máquina para el taladrado

En los ensayos, la operación de taladrado fue realizada con una fresadora vertical automática marca FIRST modelo LC 50RS, en el modo de avance continuo. La máquina utilizada permitía la regulación de la velocidad de rotación por medio de un ajuste que podía seleccionarse utilizando como referencia una regleta marcada para tal fin. Por otra parte la velocidad de avance del cabezal de la máquina estaba determinada por la velocidad de rotación y por engranajes que conectaban la rotación con el avance, con los cuales la máquina permitía tres posibilidades de avance: bajo medio y alto.

Los ensayos se efectuaron en iguales condiciones de corte. El valor de la velocidad de rotación (V_{ROT}) elegido fue de (530 ± 8) RPM, y la velocidad de avance (V_{AV}) de la mecha de $(0,353 \pm 0,005)$ mm/s. La relación entre la velocidad de rotación y la de avance es similar a la detallada en el cap. anterior.

Lubricación

Los ensayos con lubricación fueron realizados utilizando aceite soluble para maquinado marca Kansaco en una dilución de 20 partes de agua y una de lubricante. La lubricación continua fue implementada a partir de la presión hidrostática de la columna de fluido. Para esto se utilizó un recipiente de diámetro grande tal que la variación del nivel de la columna para cada ensayo fuera pequeño. Se repitieron las condiciones iniciales volviendo a llenar el recipiente para cada ensayo. De esta manera, se estimó un caudal de lubricante (para cada ensayo con lubricación) de aproximadamente $250 \text{ cm}^3/\text{minuto}$, con una variación de la velocidad del orden del 10% como cota máxima de error.

6.2.1.4 Sistema de Emisión Acústica

El sistema de EA utilizado en los ensayos de taladrado de las probetas hexagonales fue similar al detallado en el capítulo anterior. En las Fig. 6.12 se ve un esquema del montaje del equipo de EA mientras que en la Fig. 6.13 se muestra una fotografía del mismo. Para detectar las ondas elásticas de EA generadas en el corte se recurrió a un sensor de EA de banda ancha marca PAC, que las convirtió en señales eléctricas que luego fueron amplificadas en 100 veces o 40 dB con un pre-amplificador marca CISE, también de banda ancha. A continuación, un equipo de dos canales marca PAC modelo PCI-2, de 18 bits de resolución en amplitud fue el encargado de adquirir, digitalizar, parametrizar y almacenar las mediciones de EA [PAC (2004)]. En estos experimentos la frecuencia de muestreo en la digitalización de la señal fue de 5 millones de muestras por segundo (Ms/s), siendo la longitud de cada forma de onda digitalizada de 15360 puntos o muestras (15 ksamples), correspondiendo a un lapso de 3 ms de la señal. El umbral de detección de la EA fue fijado en 27 dB_{EA} con el objetivo de evitar el ruido del entorno del experimento, tanto mecánico como electromagnético. Para cada ensayo se registraron varios miles de hits, correspondientes a la realización de cada uno de los agujeros.

El registro de las mediciones, para todos los ensayos, consistió en la adquisición simultánea de los parámetros característicos, las formas de onda y la señal completa (streaming) de la EA, así como de la señal dada por la celda de torque. Los parámetros característicos de la EA medidos fueron: la energía (MARSE), el número de cuentas, la duración, la amplitud y el valor cuadrático medio (RMS). Luego, en vista a lo discutido en el capítulo anterior, y dado que la EA en el taladrado tiene una importante componente de EA de tipo continuo, los primeros tres parámetros mencionados fueron utilizados para el cálculo de dos parámetros derivados tales como la PM y la FM, que han mostrado su utilidad para el análisis de este tipo de señales. La señal completa fue digitalizada a una tasa de muestreo de 2,5 Ms/s.

Calibración del sistema de EA.

Antes de la ejecución de cada ensayo de EA, y con la finalidad de poder obtener una repetitividad de los resultados medidos, se corroboró según normas [IRAM (2005)] a partir del medio del método de Hsu-Nielsen [IRAM (2005)] la igualdad de condiciones del canal de EA

una vez colocado el sensor, verificando el correcto funcionamiento y el acople del mismo a la probeta.

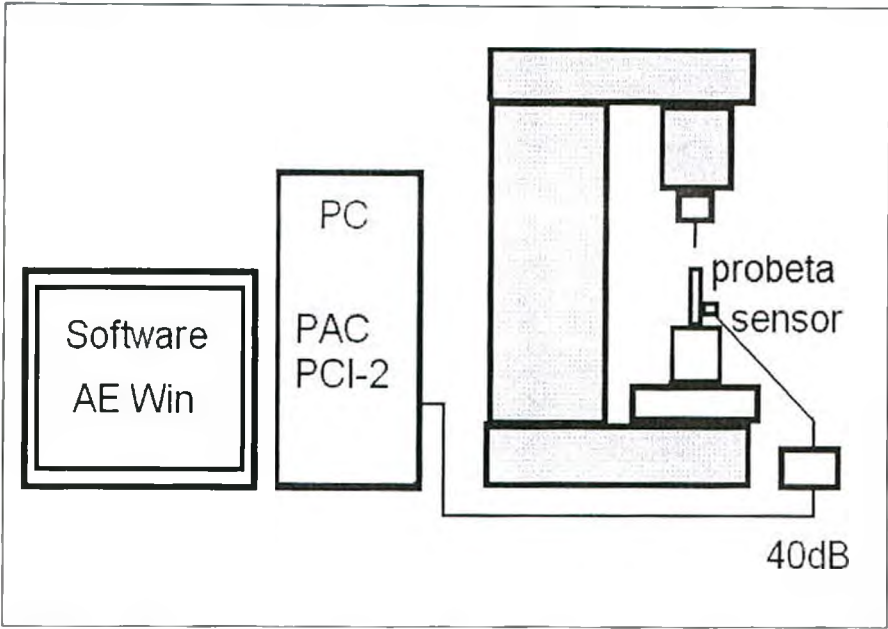


Fig. 6.12. Diagrama en bloques del sistema de EA en un ensayo de taladrado.

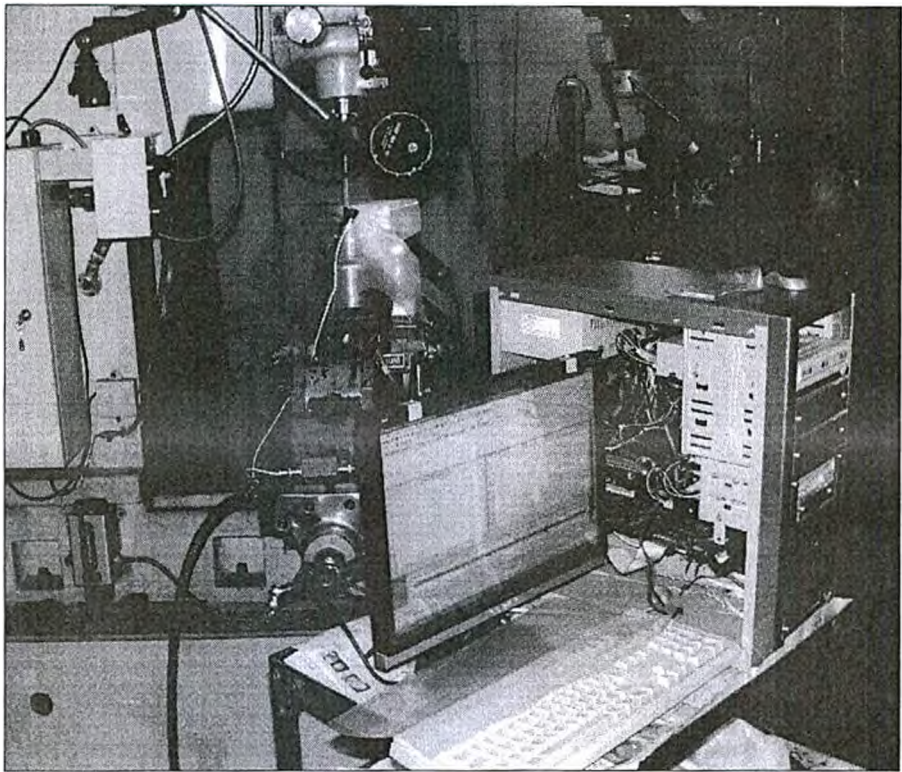


Fig. 6.13. Sistema de EA PAC PCI-2 basado en PC.

6.2.1.5 Medición del Torque

El torque efectuado por la mecha sobre la probeta se midió con una celda de torque rotatoria marca Instron, la cual estaba acondicionada por una fuente y un amplificador marca CNEA. La señal adquirida fue tomada como parámetro externo del sistema de EA marca PAC y fue digitalizada con una resolución de 16 bits en la amplitud y con una tasa de muestreo de 10000 muestras por segundo. Cada probeta fue montada sobre la celda de la forma indicada en las fotografías de la Fig. 6.14. El montaje de la probeta en la celda fue a través de un mandril. La geometría del agarre aseguró la imposibilidad del resbalamiento entre mandril y probeta, hecho

beneficioso para reducir los factores de error. La calibración de la celda fue testeada en reiteradas oportunidades colocando una barra horizontal de longitud conocida a la cual se le cargó un peso conocido, calculándose teóricamente el torque, el cual fue medido con un error menor al 5%. Durante las pruebas realizadas se observó que la calibración no varió, a menos de un valor de tensión continua o en realidad muy lentamente fluctuante que desplazaba el valor del cero. Esta variación era notable a tiempos grandes pudiéndose considerar constante en el lapso correspondiente a cada ensayo. Luego, como metodología, se corrigió ese corrimiento del cero para todos los ensayos. La medición del torque se ajustó a sus unidades correspondientes en el equipo de EA por medio de una constante de proporcionalidad entre el voltaje entregado y el torque medido. Luego se midió y graficó el torque a la par de los parámetros de EA en las mismas pantallas y tablas de datos.

En las fotografías de la Fig. 6.14 se puede observar un film plástico transparente el cual formó parte de una de las dos protecciones que se le colocaron a la celda en cada ensayo para evitar que el lubricante hiciera contacto con esta. El segundo resguardo consistió en una bandeja plástica cilíndrica con un orificio hexagonal en su centro, que permitió montarla alrededor de la probeta, la cual se conectó mediante un conducto (tipo manguera de pequeño diámetro) a un recipiente de mayor volumen, con el fin de drenar el lubricante acumulado por esta protección. Esta barrera fue diseñada de forma tal que no causara ningún tipo de perturbación sobre las mediciones, tanto en la EA como en lo mecánico (torque) lo que fue corroborado en todos los ensayos.

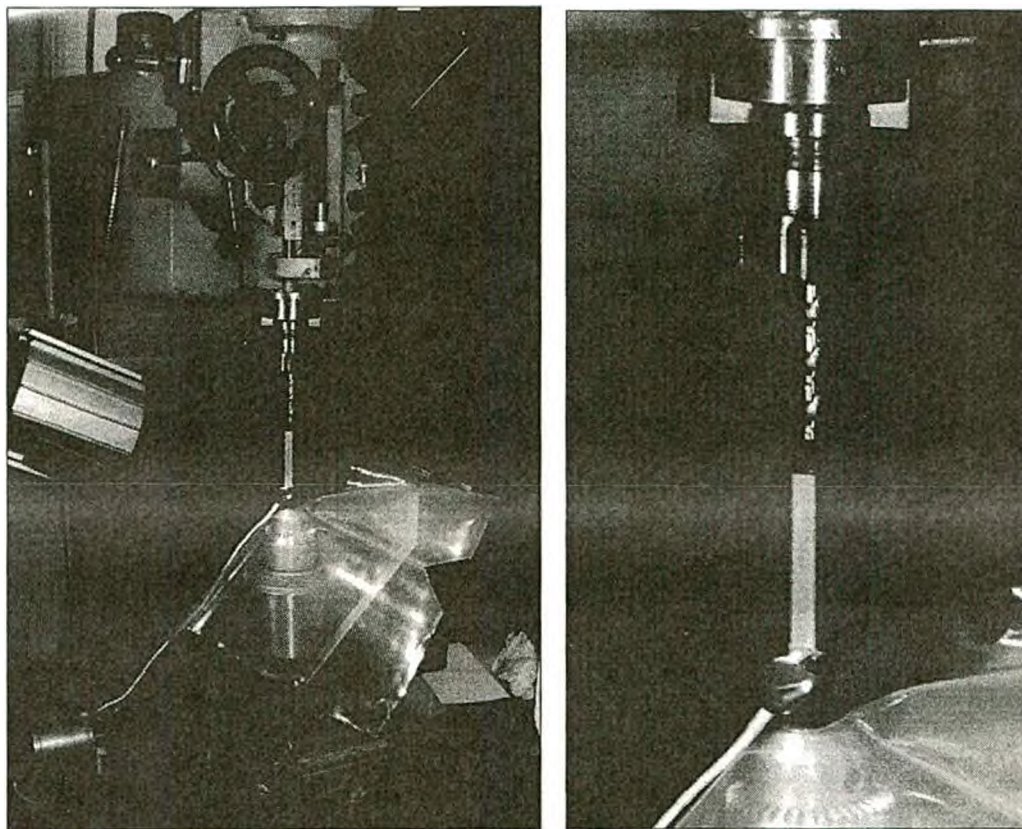


Fig. 6.14. Montaje de la probeta para el taladrado.

6.2.1.6 Registro de los ensayos con video digital

La ejecución los ensayos de taladrado fue registrada en video digital con una cámara marca JVC modelo GR DVL 310 UM, a fin de tener una referencia y mayor información para la evaluación del estado del corte. Esto permitió por ejemplo la evaluación del tipo de viruta generada en el corte para poder relacionarla con la demás información obtenida por otros medios en las mediciones.

6.2.2 Realización de los ensayos de taladrado

6.2.2.1 Planificación y condiciones de los ensayos

En la búsqueda de una correlación entre el estado de la herramienta y la información extraída de las señales de EA, se ejecutó una serie de ensayos de taladrado según los lineamientos generales expuestos previamente. El ajuste de las condiciones de corte, definidas por parámetros tales como las velocidades de rotación y avance, o por procedimientos adicionales como la lubricación, fue realizado de manera tal de reproducir un caso típico de taladrado en el contexto de un taller tradicional. Este tipo de elección se ha encontrado también en la bibliografía [Yang y otros (2002)] [Chen y Liao (2003)] [Li y Tso (1999)] [Lin y Ting (1996)] en algunos trabajos en los cuales se han elegido con similares argumentos velocidades de corte y avance cercanas a las utilizadas en este capítulo de la tesis. Entonces se realizaron 32 ensayos en los cuales se varió el estado de la herramienta, siendo 8 los casos o estados de los filos de las mechas utilizadas (expuestos en la sección 6.2.1.2). Los detalles de las velocidades de avance y de rotación, y de la lubricación fueron dados en la sección 6.2.1.3.

Respecto de la ejecución de los ensayos, estos fueron efectuados en numerosas sesiones, en cada una de las cuales se montó el experimento en el taller, tratando de mantener al extremo la igualdad de las condiciones que debían ser ajustadas en cada sesión. De este modo, en la fragmentación de la ejecución en distintas oportunidades y con un nuevo armado del experimento para cada vez, se buscó mejorar la independencia del muestreo estadístico de la totalidad de los experimentos, los cuales fueron programados para ejecutar los casos de desgaste estudiados de manera cuasi-aleatoria, en cada una de las sesiones de taladrado.

6.2.2.2 Procedimiento y etapas del taladrado

Por cada una de las probetas se realizó un solo agujero. Además cada uno de los agujeros fue taladrado con una única mecha que representaba un estado específico de los filos. Se realizaron al menos tres ensayos para cada condición de desgaste con el objeto de obtener resultados representativos. En la Fig. 6.15 se puede observar un esquema del instante previo al comienzo del ensayo, en el cual la mecha está fuera del material y comienza a aproximarse. En esta figura se muestra un corte de la probeta en el que se representa el agujero guía y en color naranja se detalla el material de la pieza que será extraído por la mecha durante el proceso de corte completo. En el Apéndice 6.1 se puede observar una imagen tomada con MEB de una parte de la pared y el fondo de uno de los agujeros efectuados en los ensayos.

Cada ensayo de taladrado se dividió en siete etapas, según los lineamientos detallados en Gong y otros (2005) y en el Cap. 2 sección 2.4.8. La descripción de cada una de estas etapas se describe a continuación.

Primera etapa: aproximación de la mecha a la muestra, rotación libre de la mecha.

Segunda etapa: contacto entre la mecha y la pieza, resbalamiento.

Tercera etapa: comienzo del corte de la mecha, hasta que su punta entra completamente en el agujero. El cincel de la mecha no toma contacto con la pieza ya que gira dentro del agujero guía, la mecha oscila al comienzo del corte hasta que se estabiliza.

Cuarta etapa: Las esquinas externas quedan contenidas por las paredes del agujero. La mecha entra en un régimen cuasi-estacionario de corte (luego del transitorio inicial) en la región con agujero guía.

Quinta etapa: choque del cincel con el final (fondo) del agujero guía. Descarga del torque en los filos.

Sexta etapa: reinicio de la acción de los filos de corte (transitorio).

Séptima etapa: régimen cuasi-estacionario de taladrado alcanzado en la zona del material más profunda que el agujero guía.

Al final de la séptima etapa el taladrado finaliza de manera abrupta con la rápida extracción de la mecha del agujero.

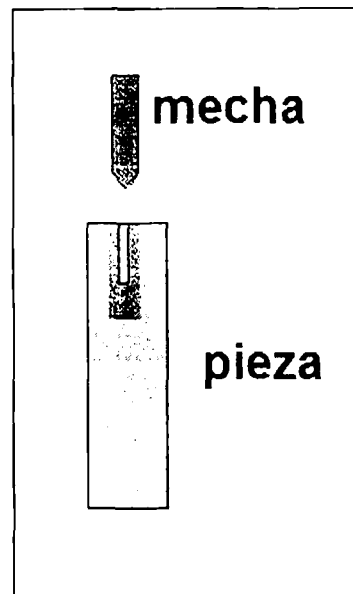


Fig. 6.15. Esquema de la zona de taladrado. En color naranja se observa el material que será extraído por la mecha.

6.2.2.3 Procedimiento para la ejecución de los ensayos

Un esquema del procedimiento seguido para la realización de cada ensayo de taladrado fue el siguiente:

- Se instalaron y prepararon el equipo de EA, la celda de torque y la máquina de taladrado.
- Se colocó la probeta en la mordaza de la celda de torque.
- Se montó sobre la probeta el sensor de EA colocando el correspondiente acoplante acústico entre ambos.
- Se corroboró con la máquina en funcionamiento que no eran detectadas fuentes de ruido mecánico y eléctrico con el umbral seleccionado para la señal de EA (para esto se activó el equipo de EA y se observó la ausencia de señales detectadas).
- Se realizó una prueba del acople de los sensores por el método de Hsu-Nielsen.
- Se instalaron las protecciones para evitar el acceso del lubricante a la celda de torque.
- Se ajustaron las velocidades de rotación y avance de la máquina.
- Se colocó la cámara de video y se preparó para la grabación.
- Se llenó el depósito de lubricante y se dirigió el fluido hacia la zona a ser taladrada.
- Se encendió nuevamente la máquina y luego se comenzó la grabación del video.
- Se inició la adquisición de la EA (y el torque) a la vez que se activó el avance del cabezal con la mecha, la cual en un momento comenzó a cortar la pieza agujereándola.
- Se taladró la probeta hasta la profundidad prevista por el corte automático, que al accionarse retraía rápidamente la mecha hasta la posición de partida.
- Se finalizó la adquisición de la EA.
- Se cortó el flujo de lubricante.
- Se apagaron la máquina herramienta y la cámara de video.
- Se extrajo la protección de la celda de torque, el sensor y la probeta taladrada.
- Se midió la profundidad del agujero.

Luego se repitió el procedimiento para cada uno de los ensayos.

6.2.3 Metodología para el procesamiento de los datos obtenidos en los ensayos. Análisis de las señales

Tanto el estudio exhaustivo de los parámetros de la EA, la correlación de estos con el torque, y la aplicación de parámetros derivados de la PM, así como la evolución del espectro en frecuencia, todos en función de las distintas condiciones de la herramienta (mecha), fueron realizados considerando los experimentos en un contexto particular de aplicación el cual fue elegido como caso principal de estudio para el núcleo del trabajo.

6.2.3.1 Análisis de los parámetros de la EA y el torque

6.2.3.1.1 Primer análisis de los parámetros de EA

Se tomaron los archivos generados por el sistema de EA según los ajustes indicados, y en primer lugar se graficaron los parámetros característicos de las señales de EA para cada uno de los ensayos efectuados. De ese modo, se visualizó el comportamiento de cada uno de estos en función de la evolución temporal del proceso de corte y del tipo de desgaste de las herramientas empleadas en cada ensayo. Luego para la amplitud, el RMS, la PM y la FM de las señales de EA se graficó el promedio del parámetro analizado en función del estado de desgaste de la mecha.

6.2.3.1.2 Análisis del torque para la totalidad de los ensayos

A partir de los valores del torque registrados para los 32 ensayos realizados en igualdad de condiciones, como fue contemplado previamente se efectuó el análisis descrito a continuación. Se consideraron para cada ensayo solamente los datos pertenecientes a la cuarta etapa del proceso, correspondiente al taladrado cuasi-estacionario con agujero guía, la cual tuvo una duración de 20 segundos. En función de las primeras observaciones de los resultados obtenidos se propuso como metodología el cálculo del promedio del torque, como parámetro de comparación para cada caso de estado de las mechas. De esta manera, se volcó en un gráfico la información obtenida, representándose el torque en función del estado de la mecha, para todos los casos de condiciones de mecha estudiados.

6.2.3.1.3 Correlación entre el torque y los parámetros de la EA

Dado que la medición del torque ha mostrado en la literatura ser un antiguo y buen indicador de la mecánica del corte, habiendo sido utilizado en múltiples trabajos como parámetro predictor del estado del proceso para herramientas rotantes (como el taladrado o el fresado) [Jantunen (2002)] [Lin y Ting (1996)] [Subramanian y Cook (1977)], se hace en esta etapa del trabajo una correlación de este con los parámetros característicos de la EA. Observando algunos resultados previos en gráficos que representaban para un mismo ensayo algunos parámetros de la EA y el torque, se observó cierta similitud, principalmente entre el torque con el RMS y la PM. Por tal motivo se procedió al análisis de la correlación entre el torque y algunos de los parámetros característicos de las señales de EA medidos en este trabajo. Para los ensayos de la parte principal del trabajo, realizados a las velocidades de rotación y avance estipuladas ($V_{ROT}=530$ vueltas/s y $V_{AV}=0,352$ mm/s) y con lubricación, se calculó la correlación lineal del torque con los parámetros característicos de la EA, es decir con la amplitud, el RMS, la frecuencia media (FM) y la potencia media (PM). Dada la rápida variación de la PM, para el cálculo de la correlación se utilizó en su lugar su media móvil (MMPM) con el objetivo de suavizar la función extrayéndole las altas frecuencias, y llevándola a un rango de frecuencias cercano al del torque. La MM fue calculada con ventanas de 10 puntos vecinos y actuó como filtro pasa bajos. Los resultados fueron graficados e interpretados. Respecto de la metodología seguida, se midieron los parámetros característicos y el torque en función de la evolución de cada agujero, que a la vez es función del tiempo. Luego se tomaron uno a uno los datos de los parámetros para cada ensayo y se los correlacionó con el torque mediante un programa en MATLAB. Entonces, para cada correlación se extrajo un número entre 0 y 1, indicando el grado de similitud entre pares de

funciones. Luego se graficó el número que representa el grado de correlación de cada parámetro de la EA con el torque para cada caso de desgaste estudiado.

6.2.3.1.4 Estudio de la PM de la EA. Diagramas MMPM-VMPM.

Por las razones expresadas en el capítulo anterior y por los resultados obtenidos con las metodologías expresadas en párrafos previos, se tomó a la PM de las señales de EA como principal parámetro a ser evaluado, como posible indicador del desgaste de la herramienta. Respecto de los resultados mencionados, en este tramo del estudio se hace una modificación del método de análisis para buscar extraer mayor cantidad de información de dicho parámetro de la EA. En las exploraciones previas se realizó el promedio de la PM de todos los hits de cada ensayo, y de esa manera se perdía información valiosa relacionada con el carácter estocástico de la EA durante el proceso de corte. Analizando los gráficos de la PM se detectó que por un lado era importante el valor que esta tomaba este parámetro, que mostraba ser mayor o menor para distintas condiciones de la herramienta. Pero a la vez, se observó que para algunos casos la fluctuación de estos valores era mayor o menor, también para cada caso de desgaste. Este hecho mostraba una posible regularidad que fue estudiada de las maneras que se expondrán a continuación, en las cuales se utilizó por un lado la media móvil y la varianza móvil de la PM y por otro la media total y la varianza total.

Gráficos VMPM vs. MMPM

Para la presente metodología, en lugar de tomar el promedio total de la PM para cada ensayo, se construyeron dos nuevos indicadores a partir de la media móvil (MM) y de la varianza móvil (VM) de la PM. A continuación se describe la implementación del método. En primer lugar, se tomó para cada hit un promedio local entre la PM del hit estudiado y la PM de los puntos vecinos a este y correspondientes a una ventana temporal móvil que se desplaza en el tiempo. Cabe aclarar que la determinación del tamaño de la ventana móvil formó parte del desarrollo del método, haciéndose el estudio para distintos tamaños de ventana, buscando el más eficiente en función del objetivo del trabajo. Así, se efectuó la media móvil para cada uno de los hits del ensayo, obteniéndose el parámetro denominado MMPM, que da información sobre el valor local de la PM en función de la evolución del ensayo en una zona supuestamente estacionaria del proceso de corte en la cual todos los hits pueden considerarse como una representación aleatoria de los tipos de “emisiones” detectadas. De tal modo, se podría considerar a un fragmento de la señal de un ensayo como una muestra aleatoria para un tipo determinado de estado de la herramienta. Por otro lado se calculó la varianza móvil de la PM para los hits de cada ensayo, tomando también ventanas con la misma cantidad de puntos vecinos utilizada en la MMPM, y entonces en cada una de estas ventanas se calculó la varianza para ese conjunto de datos.

Resumiendo, se podría decir que buscando un método que permita una rápida y certera interpretación de la variación del parámetro PM en función del desgaste de la herramienta, se aplicó sobre la PM un filtrado basado en la media móvil, obteniendo la MMPM que da una idea de la magnitud de la energía de la señal emitida. Por otro lado se tuvo en cuenta la variabilidad de la PM cuantificando el grado de variación, midiendo la varianza local de cada región de la PM en función del tiempo con la varianza móvil de la potencia media (MVMP).

Una vez obtenidas la VMPM y la MMPM se graficaron una en función de la otra, para cada hit y para distintos tamaños de las ventanas en las cuales se efectuó el promedio con los valores de sus vecinos. De esa manera, se obtuvieron representaciones en las que se graficaron un número grande de hits para cada ensayo que representaba cada caso de desgaste de la herramienta, repitiendo en más de una oportunidad cada uno de los casos para tener una estadística correcta.

Gráficos VPM vs. MPM

Otra representación de los resultados fue obtenida graficando el promedio total de la MP (AMP) y la varianza total de la MP (VMP) para cada ensayo de taladrado. El término “total” se refiere a la PM calculada para todos los hits de la etapa considerada de corte estacionario, con agujero guía, para cada uno de los ensayos, correspondientes a cada caso de desgaste de la mecha.

6.2.3.2 Análisis en frecuencia de las señales de EA

6.2.3.2.1 Características de las señales analizadas

Para 25 ensayos correspondientes a la parte principal del trabajo en “condiciones típicas de taladrado en taller”, a las velocidades de rotación y avance estipuladas ($V_{ROT}= 530$ vueltas/s y $V_{AV}=0,352$ mm/s) y con lubricación, se efectuó un análisis de la evolución del espectro de frecuencias de las formas de onda de las señales de EA en función del estado de la mecha. Con este fin se capturaron las formas de onda en el transcurso de cada ensayo para distintos estados de las mechas. Una cantidad muy grande de ondas fueron capturadas durante el taladrado de cada probeta en un proceso de aproximadamente un minuto de duración. En función de los tiempos de medición ajustados en el equipo de EA, se determinó que para el lapso del ensayo se adquirieran típicamente entre 2000 y 2500 señales las cuales fueron almacenadas para su posterior análisis.

Como se ha indicado en secciones previas, en todos los ensayos la trayectoria de la mecha fue guiada en la primera mitad de su recorrido por un agujero piloto (también denominado guía), siendo esta etapa la abarcada en este estudio. Por lo tanto, siguiendo la denominación estipulada en este capítulo, el presente análisis fue efectuado con las señales obtenidas en la tercera etapa del ensayo de taladrado. La finalidad de esta elección tuvo el fin de establecer el estudio bajo condiciones estacionarias del proceso de corte, sin tener en cuenta los transitorios del comienzo y del final de la excursión de la mecha en su camino guiado por el agujero piloto.

6.2.3.2.2 Test de estacionariedad

Una vez recolectadas todas las formas de onda de todos los casos estudiados, se procedió a separar, para cada ensayo, las señales de EA “cuasi-estacionarias” de las que no lo eran. La idea de la cuasi-estacionariedad está referida en el sentido que le dieron Jenkins y Watts (1968) respecto de una señal que se mantiene estacionaria en periodos cortos de tiempo.

El objetivo de la clasificación efectuada era diferenciar los distintos mecanismos actuantes como generadores de la EA. Según la bibliografía las señales tipo estallido (“burst”), fuertemente transitorias (no estacionarias) son producidas en la rotura de la viruta, o por golpes de la viruta contra la herramienta o el material [Moriwaki (1980)] [Li (2002)]. Mientras que las señales continuas (posiblemente cuasi-estacionarias) son generadas principalmente por la fricción y por la deformación plástica del material cortado [Heiple y otros (1994)] [Dornfeld (1991)]. Para esta tarea, considerando a la generación de la EA como un proceso estocástico, se escribió un programa en MATLAB, que sirvió para analizar la invariancia de los momentos de primer y segundo orden, a través de la media y la auto-correlación de la señal. De esta forma, se tomaron miles de señales de EA (formas de onda) de 15360 muestras cada una. A cada señal se la dividió en 15 tramos de 1024 muestras (o 200 μ s) y se le calculó la auto-correlación en cada tramo. Las señales que mostraban una regularidad en su valor en todos los tramos, fueron consideradas como “cuasi-estacionarias”, y fueron denominadas como “estacionarias”, siendo ese el significado que se le dará a esa palabra a continuación en el trabajo. Contrariamente, las formas de onda que mostraban variaciones eran tomadas como “no estacionarias”.

Para cada caso de desgaste se contabilizaron las formas de onda estacionarias emitidas, identificando a esa cantidad como N_{est} . Además se definió un coeficiente llamado tasa de emisión de señales estacionarias (TEE) que indica el número de señales estacionarias emitidas por segundo (NSE/s).

6.2.3.2.3 Análisis espectral con FFT

Luego de seleccionadas las señales estacionarias para cada caso, se calculó la potencia espectral (PE) en función de la frecuencia mediante la FFT y se analizaron los espectros de todas las señales. En estos se detectaron tres bandas en los rangos de frecuencias de (50-150) kHz, (150-250) KHz y (250-350) kHz, las cuales variaban con el estado de desgaste de las

herramientas de corte (mechas). Para cuantificar las variaciones, se sumaron todas las contribuciones (cada componente de frecuencia discreto) de la potencia espectral a cada banda, y se las dividió por el número de componentes de frecuencia sumadas (ancho de cada banda), dando un valor denominado potencia espectral promedio (PEP) para cada banda. Esto se realizó para cada mecha con y sin daño, para todas las formas de onda estacionarias obtenidas en los ensayos correspondientes a ese caso. A continuación se graficó la potencia espectral promedio de cada banda, para cada forma de onda (numeradas por orden de aparición). Para todos los casos de desgaste, identificados como FN1, FN2,..., ECM, se calcularon para cada banda el valor medio y la desviación estándar de la potencia espectral promedio, denominados PEP_M y σ_{PEP} respectivamente. La generación de las señales de EA durante el corte con la herramienta corresponde a un proceso estocástico, es decir que los valores de señales individuales son aleatorios con un alto grado de dispersión en muchos de los casos, que dependerá de los mecanismos de emisión. Por esta razón, estimar el error de manera convencional no es simple. Los errores de los aparatos de medición y de los métodos de cálculo son despreciables frente a la incertidumbre mencionada. Por tal motivo se estimó el error del método con la desviación estándar.

6.2.3.3 Determinación de la velocidad de rotación de la mecha a partir del análisis de la señal completa de EA (streaming)

En el capítulo anterior se expusieron métodos para determinar la velocidad de rotación y de avance de la mecha, a partir del análisis de las señales de EA. En el presente capítulo se corroboró la efectividad de estos métodos. Con tal fin se tomaron las señales de EA obtenidas en una tanda de 10 ensayos realizados en una misma sesión (con un único ajuste de la velocidad en la máquina). Luego por un lado, a partir del parámetro D de las señales de EA (definido en el capítulo 5) se calculó la velocidad de avance, y con esta, la velocidad de rotación. Por otro lado, también se calculó la velocidad de rotación a partir del estudio de la señal completa de EA, también denominada señal de “streaming”. Luego los resultados de ambos métodos fueron comparados.

6.2.3.3.1 Método basado en el cálculo de la velocidad de avance con el parámetro D

Tal como fue planteado y discutido en las secciones 5.3.4.1, la velocidad media de avance de la mecha puede ser estimada a partir del cociente entre la longitud del agujero y el tiempo insumido para su realización. Para cada probeta, es decir para cada ensayo, se midió la profundidad del agujero efectuado. También se midió, en el parámetro llamado “D” de las señales de EA, el tiempo desde el inicio del taladrado hasta el final del mismo. Se realizó el cociente para cada caso, y se obtuvo la velocidad de avance. Luego, conociendo el coeficiente de la relación de engranajes de la caja reductora de la máquina fresadora dado por el fabricante se pudo calcular la velocidad de rotación a partir de la de avance. El coeficiente multiplicativo para relacionar las velocidades utilizadas en los ensayos es de 0,04. Finalmente se graficaron los resultados para su análisis.

6.2.3.3.2 Método basado en la autocorrelación de la señal de streaming

Para el cálculo de la velocidad de rotación se tomó la señal de EA generada en los primeros segundos del corte del material por la herramienta, para cada ensayo de taladrado, y se calculó la auto-correlación de la señal. De esa manera, se extrajo la información del período de un giro de la herramienta, del cual se calculó la cantidad de vueltas por segundo. La metodología del análisis ya ha sido previamente tratada en las secciones 5.2.4.3 y 5.3.4.3. Las presentes mediciones fueron realizadas para corroborar el método con una mayor estadística y para verificar la velocidad medida mecánicamente para el ajuste de los parámetros del corte. En el capítulo anterior se observó que los golpeteos de la mecha con irregularidades de la pieza y con residuos del corte producían una periodicidad de pocos ciclos que ocurrían de manera estocástica ya que además las discontinuidades actuantes como fuentes en los choques podrían estar moviéndose como consecuencia del arrastre de la mecha. Esta regularidad parcial motivó la

utilización de la auto-correlación de la señal completa de EA (o streaming), con el objetivo de captar la periodicidad de esos picos desfasados o corridos en el tiempo con una regularidad parcial dictaminada por la periodicidad de la rotación de la mecha.

El método seguido fue tomar la señal de EA y mediante un programa en MATLAB calcular la autocorrelación para luego buscar los picos de mayor amplitud más allá del central, y extraer los tiempos a los cuales ocurren. En la Fig. 6.16 se muestra un ejemplo de cómo se determina el período de revolución de la mecha por auto-correlación de un fragmento de 1,2 s de la señal de streaming. Entonces, se obtuvo el tiempo entre choques de la mecha con irregularidades del material, que podrán corresponder a procesos que involucren media vuelta si golpean los dos filos, una vuelta si lo hace uno solo, etc. Luego con esta información se calculó cuántos ciclos se midieron por unidad de tiempo.

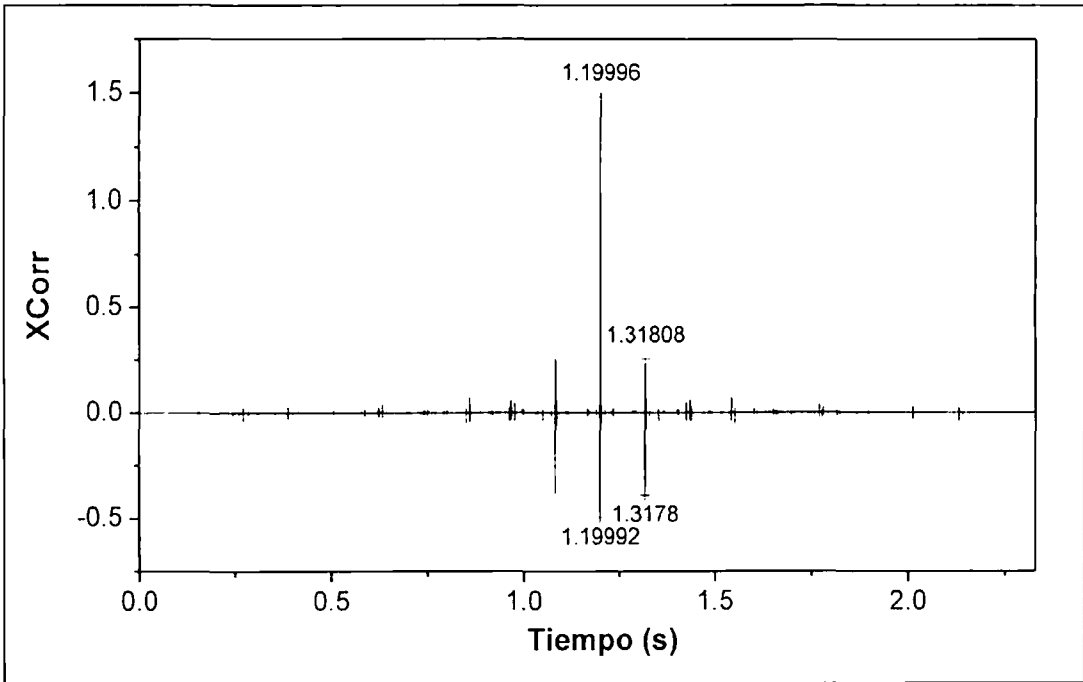


Fig. 6.16. Ejemplo de la determinación de los tiempos de giro de la mecha por auto-correlación de un fragmento de 1,2 segundos de la señal de streaming.

6.3 Resultados y discusión

A continuación se muestran los resultados de los distintos análisis realizados sobre las señales y parámetros, obtenidos en los experimentos efectuados con mechas con distintos estados de desgaste, en procesos realizados a igualdad de condiciones de corte (velocidades de rotación y avance fijas y con lubricación).

6.3.1 Parámetros de la EA

En las Fig. 6.17, 6.18, 6.19 y 6.20 se puede observar el comportamiento de los parámetros característicos de la EA evaluados para los diferentes estados de desgaste de las mechas. Cabe recordar que en este estudio no toma participación el filo cincel de la punta de la mecha, ya que las señales analizadas corresponden a la etapa estacionaria de corte con agujero guía.

En primer lugar, en la Fig. 6.17, se graficó el promedio de la amplitud máxima de los hits de EA, el cual fue realizado sobre todas las mediciones para cada estado de la herramienta. En este se puede observar el crecimiento del parámetro en función del desgaste de los filos de corte. También se representa en el gráfico el caso de las esquinas externas gastadas (caso EGM) en el cual el promedio de la amplitud máxima de las señales de EA disminuye respecto de los casos de mayor desgaste de los filos.

En la Fig. 6.18 el promedio de la “potencia MARSE media” (PM) muestra tres tipos de comportamientos según se avance en la variable “estado de la mecha”. En primer lugar se observa el caso correspondiente a las mechas nuevas (FN1) con un muy bajo valor de PM. Luego una meseta con tres casos con poco daño o desgaste (FN2, FN3 y FCE). Entonces, no se observa diferencia en la PM entre las mechas con poco uso, con mala terminación de fabricación, y con el filo con un pequeño cráter por electroerosión. El tercer conjunto corresponde a los casos de mayor deterioro (FE1, FE2, FCM y EGM) para los cuales se puede visualizar un comportamiento monótono creciente aproximadamente lineal, que podría utilizarse para la discriminación del grado de daño. Para el análisis, se puede separar del resto el caso de la mecha con deterioro de su esquina externa (EGM), que no corresponde a un daño en los filos de corte. Para este caso particular el promedio de la PM muestra un valor mayor que para la mecha con FCM que corresponde al caso estudiado con mayor daño en sus filos (altamente craterizados mecánicamente). En las condiciones planteadas previamente, el promedio de la PM de las señales de EA medidas en los ensayos de taladrado, sería un buen indicador del estado de la herramienta a partir de niveles intermedios de desgaste.

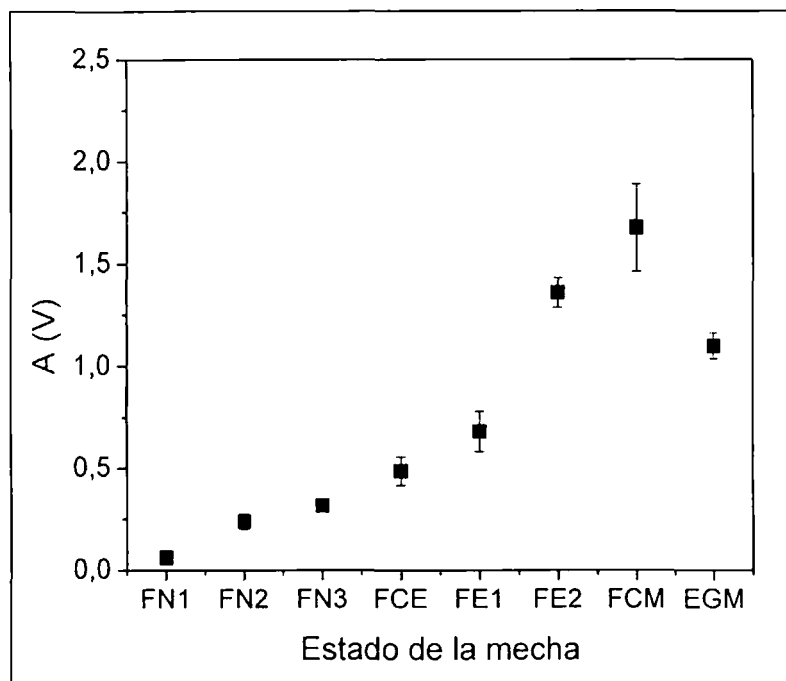


Fig. 6.17. Promedio de la Amplitud máxima (A) de cada señal de EA en función del estado de la mecha.

En un siguiente gráfico (Fig. 6.19) se muestra la evolución del promedio del valor RMS de la EA como función del estado de la herramienta. En esta figura se puede observar que tanto a bajo como a alto desgaste el comportamiento de este parámetro es similar al de la PM, excepto para el caso de la EGM. De esta forma, existe una relación entre el RMS y la PM correspondiente a los casos con daño en los filos. Respecto del caso de la esquina externa gastada, la conducta se asemeja mayormente a lo ocurrido para el estudio de la Amplitud de la EA.

El promedio de la FM de la EA graficada en la Fig. 6.20 también muestra un comportamiento en el cual se distinguen tres zonas, una inicial con la mecha nueva, otra intermedia con las mechas poco dañadas, y una tercera con las mechas más dañadas, las dos últimas en forma de dos mesetas poco separadas dentro de las cuales no se pueden distinguir los distintos casos pertenecientes a estas. Esto indicaría que en las condiciones de los ensayos, la FM no sería un buen parámetro para clasificar el desgaste.

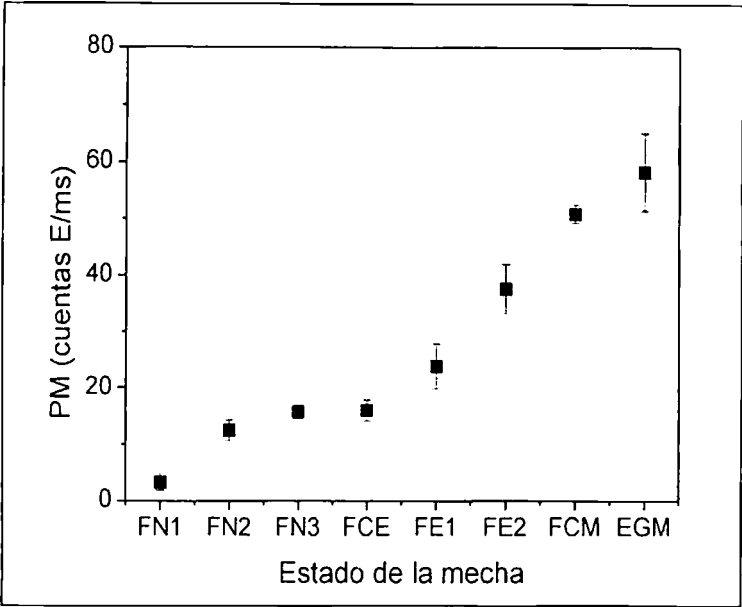


Fig. 6.18. Promedio de la Potencia media (PM) de la señal de EA en función del estado de la mecha.

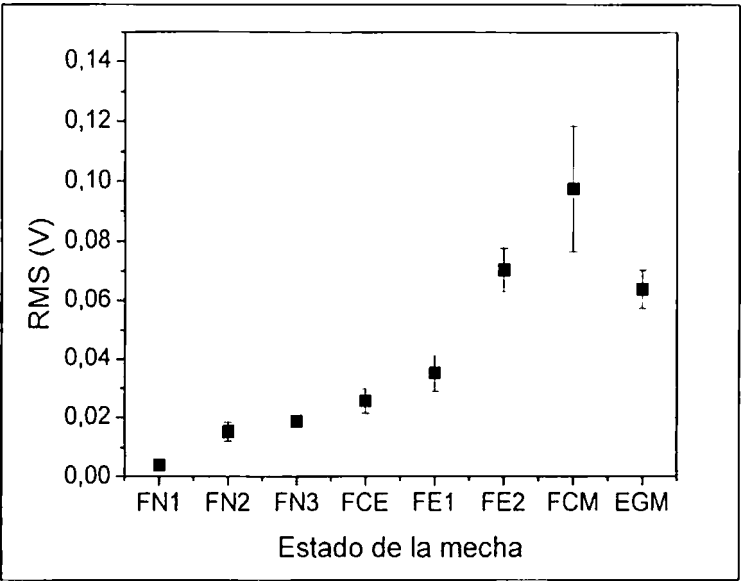


Fig. 6.19. Promedio del valor cuadrático medio (RMS) de la señal de EA en función del estado de la mecha.

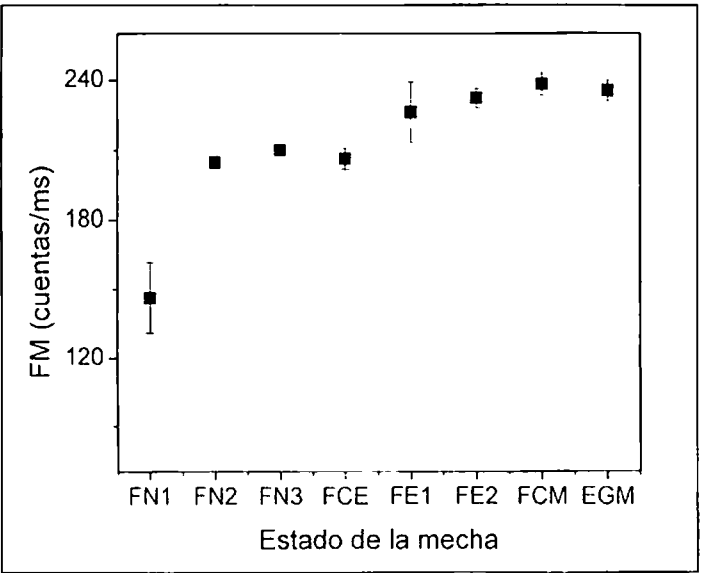


Fig. 6.20. Promedio de la FM de la señal de EA en función del estado de la mecha.

6.3.2 Medición del torque

En la Fig. 6.21 se puede observar la representación del valor medio del torque para cada estado de la mecha con su respectiva desviación estándar. Análogo al comportamiento de la PM graficado en la Fig. 6.18, el torque presenta poca variación a bajo desgaste (menor que para los tres casos de los parámetros de la EA) y una notoria variación para los casos de mayor daño en los filos y de desgaste en la esquina externa. De esta forma, se pueden separar dos casos, uno para las cuatro mechas con menor desgaste que se presentan en una meseta con valores indistinguibles, y otro para las mechas con mayor desgaste cuyo valor del torque se va incrementando con el nivel de daño de la mecha (tanto en los filos como en la esquina externa). Para este segundo caso, sería posible la discriminación del grado de desgaste particular de cada condición del filo por medio del análisis del torque registrado en los ensayos. Los valores obtenidos para el torque están de acuerdo con otros trabajos medidos en condiciones parecidas [Lin y Ting (1996)]

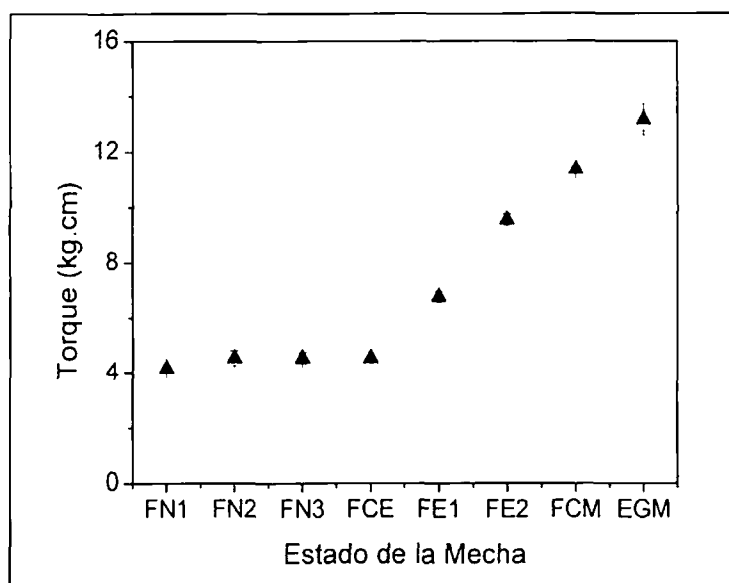


Fig. 6.21. Promedio del torque para cada estado de la mecha con su respectiva desviación estándar.

Comparando las Fig. 6.18 y 6.21 se puede observar que más allá del primer punto que representa a la mecha nueva, el resto de las mediciones de ambos parámetros (el torque y la PM) puede ajustarse a un mismo comportamiento a partir de aplicarle a la PM una constante multiplicativa y un corrimiento respecto al cero. Así, se construyó la Fig. 6.22 en la cual se muestran el torque y la PM ajustada (PM_A), a partir de la relación

$$PM_A = 0,188 \times PM - 0,22 \frac{\text{cuentasE}}{\text{ms}} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

De los resultados previos se puede concluir que, para las condiciones del caso estudiado, se ha encontrado una proporcionalidad, o relación lineal, entre los resultados del torque y los del parámetro PM de la señal de EA. Cabe recordar que ambos parámetros comparados entre sí fueron calculados como promedios de un número muy grande de valores, correspondientes a cada hit de EA (el torque fue muestreado simultáneamente a cada hit de EA), los cuales fueron estudiados en régimen de corte estacionario en el trayecto con agujero guía. La linealidad observada para los cuatro casos de mayor desgaste permitiría estimar el torque aplicado por la mecha a la pieza a partir de calcular la PM de la EA en el ensayo en cuestión.

6.3.3 Relación entre el Torque y los parámetros característicos de la EA

Prosiguiendo el estudio de los parámetros característicos de la EA y el torque, este se extendió más allá de los promedios, y se analizó la correlación entre los parámetros de la EA como

funciones del tiempo: amplitud, PM, FM y RMS, todas con respecto a la dependencia temporal del torque. Los resultados de este análisis fueron representados en la Fig. 6.23 para los casos medidos para mechas con diferente grado de desgaste: nuevas (FN1, FN2 y FN3), filo gastado por electroerosión (FE1 y FE2), esquina externa gastada (EGM) y filos craterizados (FCM). En el gráfico, los cuadrados rojos representan la correlación entre torque y MMPM, los círculos marrones la correlación entre el torque y el RMS, los triángulos verdes la correlación entre el torque y la FM, y los diamantes azules la correlación entre el torque y la amplitud. En la figura se observa que la mejor correlación fue la correspondiente a la MMPM, cuya función en el tiempo se ajustó mejor al torque que el valor cuadrático medio (RMS), que es el parámetro más común utilizado en la bibliografía y uno de los recomendados [Ravindra y otros (1997)] en los estudios de aplicación de la EA en maquinado. Aunque el procedimiento matemático para obtener ambos parámetros es comparable, el análisis de la MMPM mostró mejores resultados que el RMS, ambos para las señales de EA.

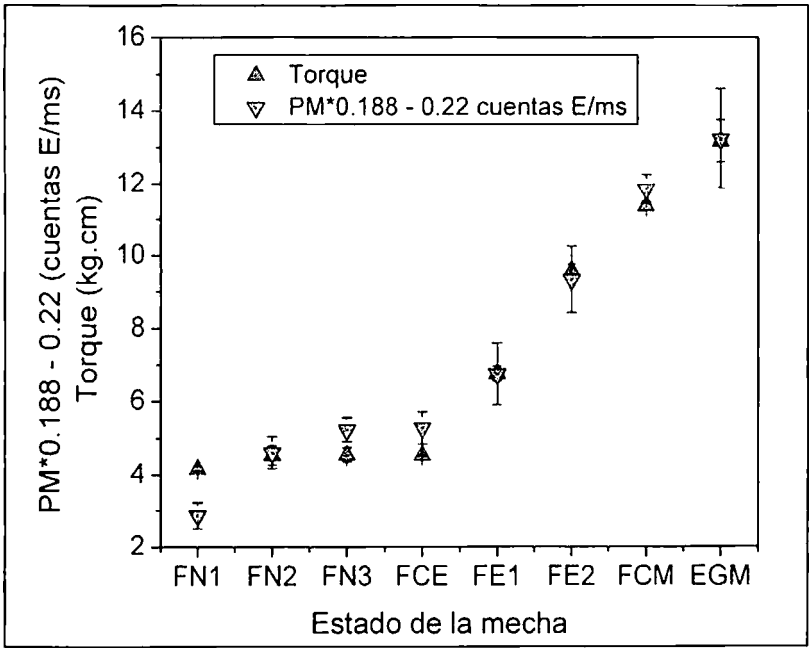


Fig. 6.22. Representación del torque y de la PM ajustada en función del estado de la mecha.

La buena correlación entre la MMPM y el torque expresada en la Fig. 6.23 queda en evidencia en representaciones como las de la Fig. 6.24 en las cuales se muestran como ejemplos el torque y la MMPM en función del tiempo para dos casos típicos, uno de mecha nueva (parte a) y el otro de mecha con filo craterizado (parte b). Ambos gráficos muestran cómo utilizando alguno de los dos métodos indirectos, como el torque y la EA, se podrían describir de igual manera las diferentes etapas del proceso de corte, que fueron detalladas previamente (en el Capítulo 5). Por ejemplo, observando la función MMPM de la señal de EA, a tiempo real el operador de la máquina de taladrado podría inferir si la herramienta está entrando en el material (tercera etapa), taladrando en un intermedio de la región con agujero piloto (cuarta etapa), pasando a la región sin agujero piloto (sexta etapa) o terminando el corte. Irregularidades relacionadas con anomalías del proceso de maquinado podrían ser observadas en las señales. Resultados similares a la Fig. 6.24 los exponen Carpenter y otros (1992) donde muestran una alta correlación entre el RMS EA y la fuerza friccional, y Marinescu y Axinte (2008) entre el MARSE y la fuerza de corte.

Para muestreos a mayores frecuencias, el parámetro de la EA debería manifestar una mayor sensibilidad que el torque como consecuencia de su mayor ancho de banda en frecuencia para la detección de transitorios rápidos, como la emisión por la rotura de viruta, comparada con la respuesta dinámica del torque. Otra ventaja de la EA en el sensado del proceso de corte podría resultar a futuro en una implementación más sencilla y de menor costo. Respecto del uso de la MM, se basa en el carácter estocástico de la EA, en la cual según el desgaste de la mecha varía la

dispersión en la PM. Filtrando la dispersión de más alta frecuencia se encuentran variaciones que coinciden con las detectadas con el torque [Gómez y otros (2010)]. La MM actúa como filtro pasa bajos revelando información relacionada con las características mecánicas del proceso relacionadas con los procesos de menor frecuencia.

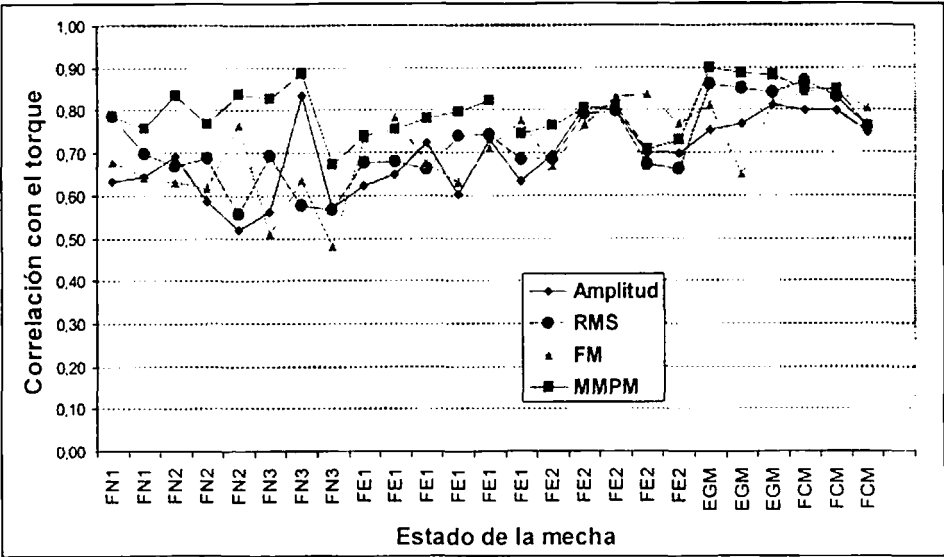


Fig. 6.23. Correlación lineal entre torque y parámetros típicos de EA. La MMPM muestra una mejor correlación con el torque que la RMS para un amplio rango del promedio.

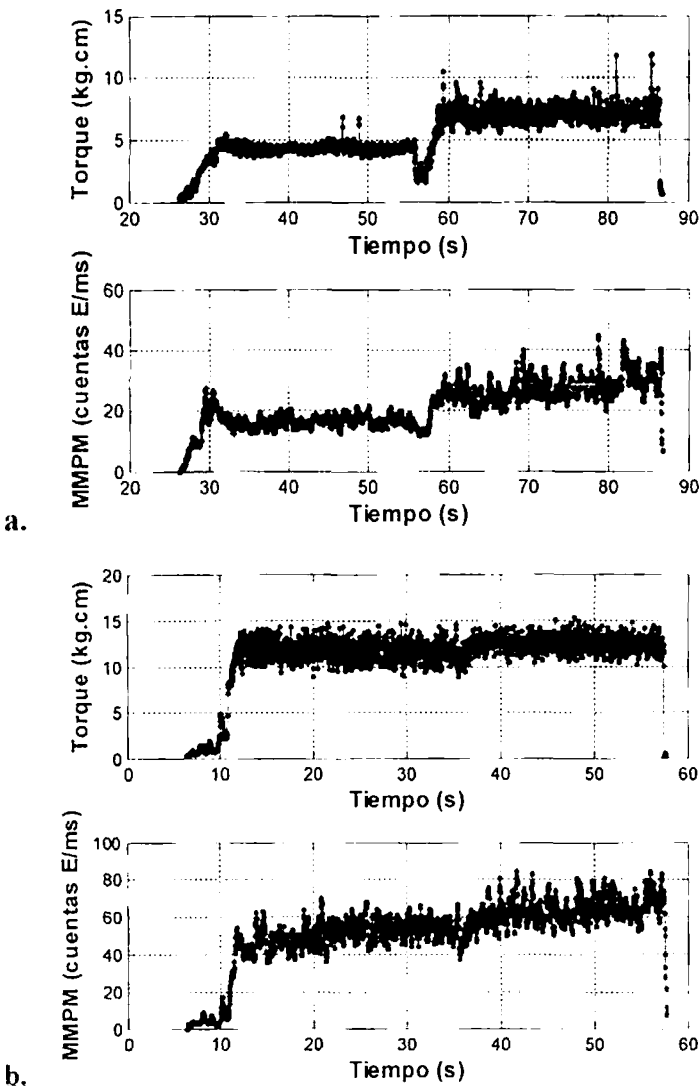


Fig. 6.24. Torque y MMPM vs. Tiempo para taladrado. a. con FN3. b. con FCM.

6.3.4 Análisis de la PM de la EA en función del desgaste: gráficos MMPM vs VMPM

En la Fig. 6.25 se muestra una sucesión de gráficos bidimensionales que representan la variancia móvil de la potencia media (VMPM) en función de la media móvil de la potencia media (MMPM) para las señales de EA generadas en 30 ensayos de taladrado con diferentes condiciones de la herramienta. Estos ensayos fueron realizados manteniendo fijos los parámetros de corte descriptos y las características del material maquinado. Los gráficos están basados en el cálculo de la media y la variancia móviles de la PM, de manera que cada punto representado corresponde a un hit de la señal de EA promediado con aquellos puntos vecinos contenidos en una ventana de tamaño definido previamente, que se va desplazando sobre cada uno de los hits de cada ensayo. En los gráficos de la figura mencionada, se observan nubes de puntos con un mismo marcador y color, los cuales representan cada caso de desgaste de la herramienta.

En las secuencias de casos mostrados en la Fig. 6.25 (a, b, c, d, e y f) se observa cómo evolucionan las nubes de puntos, con cada hit tomado cada 20 ms. De este modo, para los 20 segundos que dura la etapa estacionaria del corte en la cual se realizó este análisis, la cantidad de hits fue de alrededor de 1000 por cada ensayo. Luego, para los 30 ensayos, se representaron aproximadamente 30000 puntos o hits en cada gráfico. [Gómez y otros (2009)]

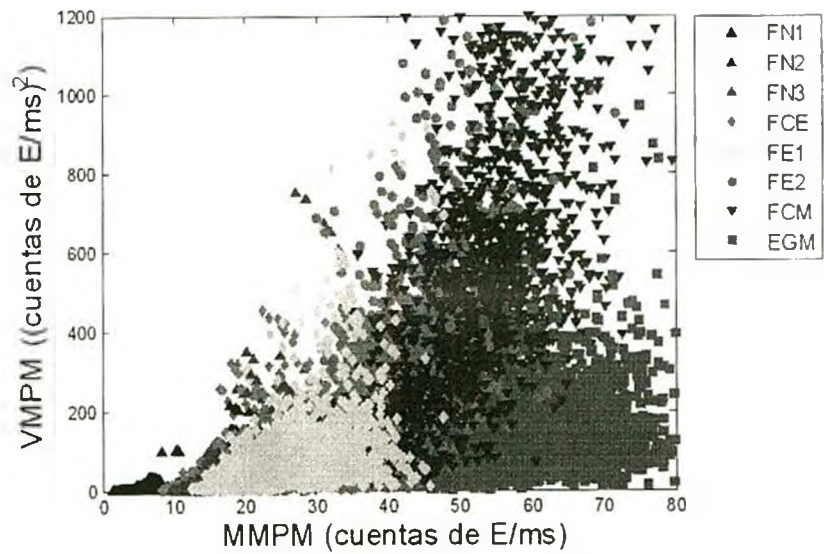
Cada uno de los cuadros de la Fig. 6.25 corresponde a distintos tamaños de ventana elegidos, promediando localmente desde pocos puntos vecinos hasta algunos cientos. En la Fig. 6.25.a se observa que para las ventanas con menor cantidad de vecinos las nubes de puntos muestran una gran dispersión en sus resultados, por lo que las aglomeraciones de puntos de un mismo color forman grandes manchas dispersas y poco definidas. Luego, al ir avanzando en el tamaño de la ventana sobre la cual se promedia para cada uno de los hits, los clusters se van concentrando y diferenciando entre sí, restringiendo la dispersión inicial, y permitiendo a tamaños mayores de ventana la correcta separación de distintos casos de estado de las mechas. De tal modo, para los tamaños mayores de ventana (Fig. 6.25 e-f y Fig. 6.26) se obtuvieron zonas bien definidas para los casos de las mechas nuevas (FN1), las mechas con menor daño o desgaste (casos FN2, FN3 y FCE). También se diferenciaron entre sí las tres zonas correspondientes a los casos de filos más deteriorados (FE1, FE2 y FCM), y de todas estas otra región para el caso de la mecha con la esquina externa gastada (FCE). En las figuras mencionadas anteriormente, a partir de ventanas de 50 o 100 puntos vecinos por hit, comienza a evidenciarse la separación de las nubes de puntos. Cabe aclarar que estas nubes de colores definidos se conforman naturalmente a partir de sus respectivas distribuciones, al representar los miles de hits correspondientes a los ensayos para un dado estado del filo de la mecha.

El programa para la clasificación de las señales funciona de manera tal que uno a uno se van procesando los paquetes de datos correspondientes a cada ensayo (cálculo de la MMPM y VMPM) y cada conjunto de puntos es agregado a un gráfico con ejes MMPM y VMPM. Se observó experimentalmente que todos los ensayos efectuados con cada una de las mechas que representan cada estado de desgaste se ubicaron en zonas bien determinadas. Luego, se verificó que mientras se iban agregando nuevas mediciones a los primeros gráficos generados, realizadas con las distintas mechas “patrón de desgaste”, los resultados para cada caso se fueron ubicando en las zonas del gráfico correspondientes para cada caso con una efectividad total. La EA generada en el taladrado es un proceso estocástico y los resultados para cada ensayo se manifiestan como “clústeres” en un gráfico bidimensional, y los puntos correspondientes a un estado definido de la mecha están localizados alrededor del centro de masa de cada “clúster”.

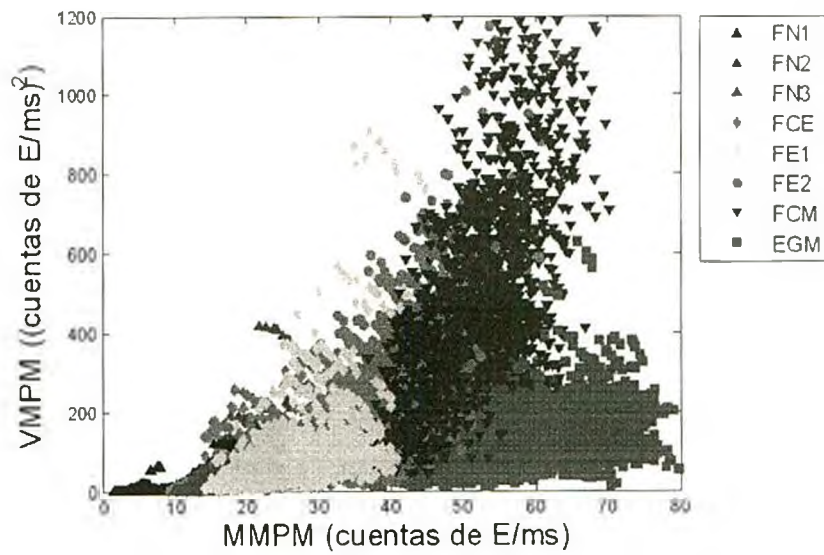
Analizando con mayor detalle la Fig. 6.26, para promedios de 300 puntos vecinos, se estudió la morfología de la disposición de los resultados. En este gráfico se puede observar que la VMPM para la evolución del desgaste en los filos, en función del MMPM, va formando con los distintos casos una distribución en forma de arco, la cual se pudo ajustar a una función potencial:

$$VMPM = A \cdot MMPM^{2,8} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

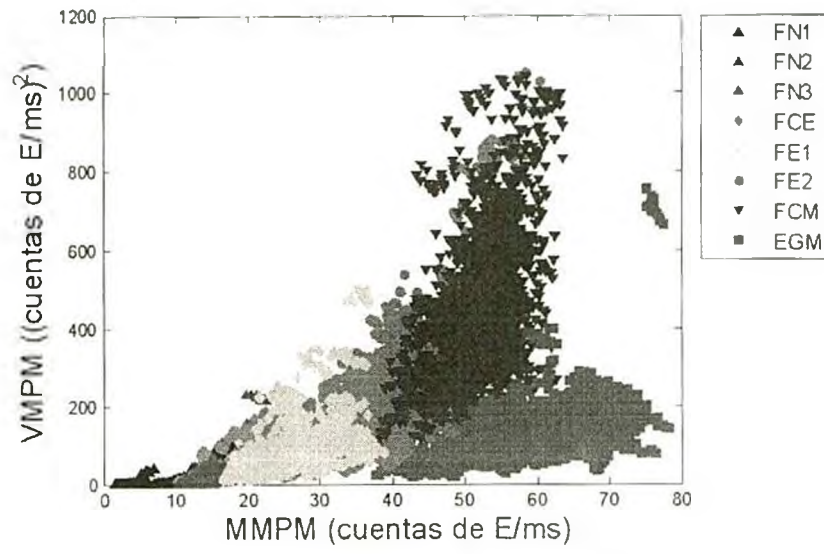
donde $A = 0,008$. En la esquina inferior izquierda del gráfico, y en el extremo izquierdo de la función ajustada, se presenta el caso FN1 correspondiente a la mecha nueva (triángulos negros).



a. MM y VM con 5 puntos vecinos.

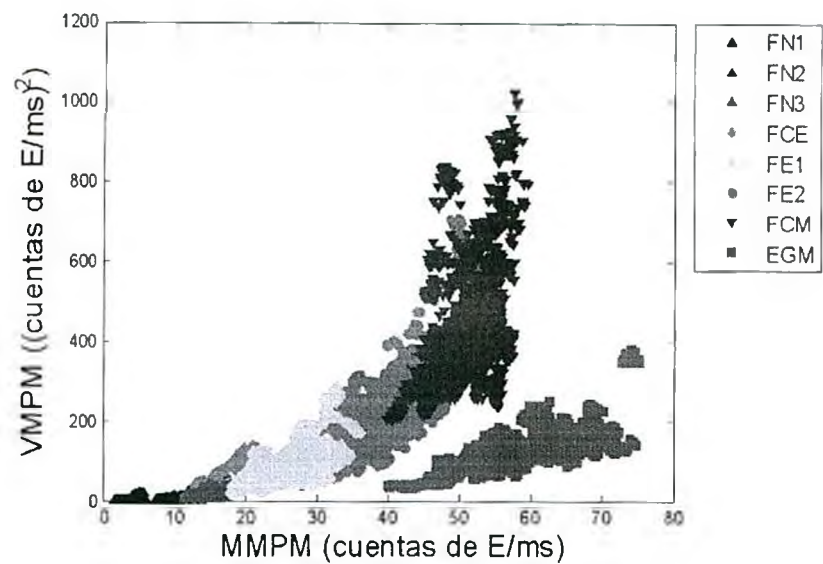


b. MM y VM con 10 puntos vecinos.

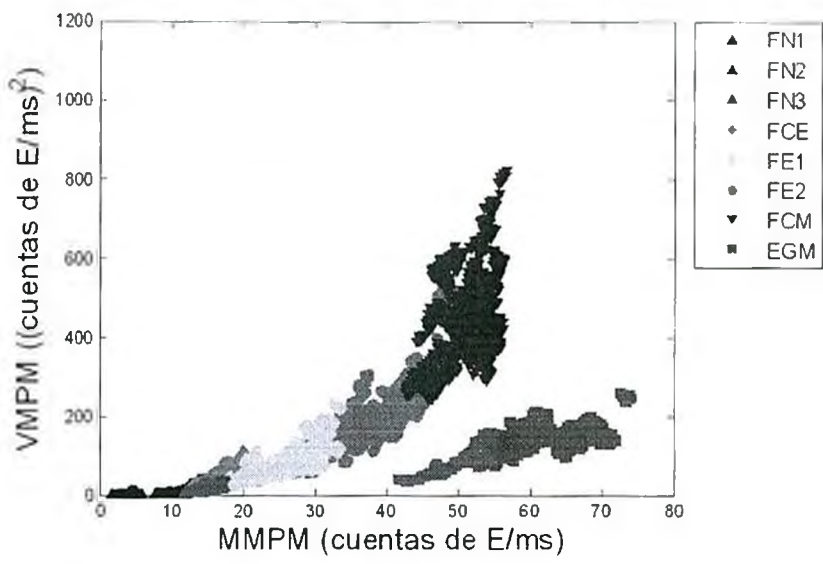


c. MM y VM con 20 puntos vecinos.

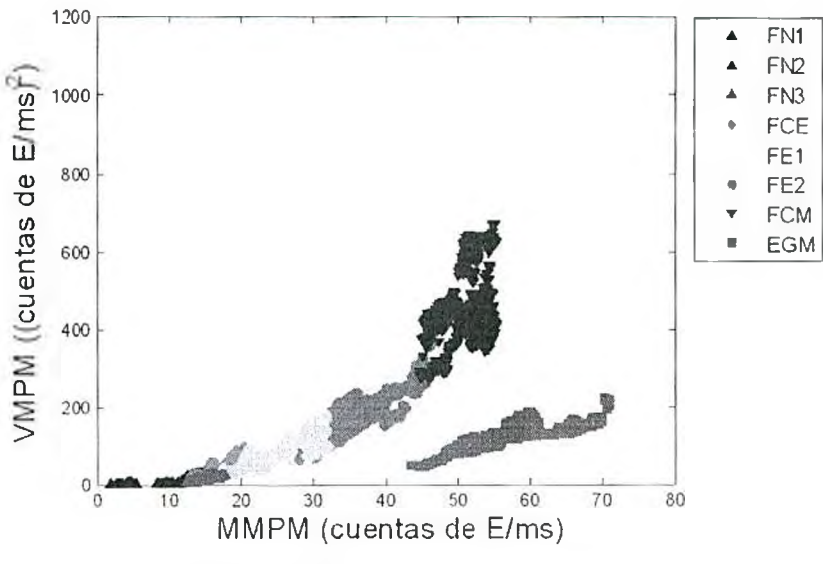
Fig. 6.25. Evolución de la VMPM vs. MMPM de las señales de EA en función de cada estado de mecha (representados por cada color), en función de distintos tamaños de ventana de la MM y la VM



d. MM y VM con 50 puntos vecinos.



e. MM y VM con 100 puntos vecinos.



f. MM y VM con 200 puntos vecinos.

Fig. 6.25. (cont.) Evolución de la VMPM vs. MMPM de las señales de EA en función de cada estado de mecha (representados por cada color), en función de distintos tamaños de ventana de la MM y la VM.

A continuación, una pequeña zona del gráfico centrada en la función ajustada, contiene los casos FN2 (triángulos de color azul) y FN3 (triángulos de color azul claro) que representan las mechas con poco desgaste. El caso FCE (diamantes verdes) se ubica levemente por encima de la función ajustada para la mayoría de los puntos. Luego continuando el estudio y siguiendo el desarrollo de la función se pueden encontrar los casos FE1 (diamantes amarillos) y FE2 (círculos naranjas) y luego el caso FCM (triángulos rojos) para los valores más altos de la MMPM. Como fue explicitado previamente y como puede observarse en la Fig. 6.26, los resultados que conforman el conjunto de puntos de las mediciones del caso EGM (cuadrados violeta) se encuentran en una región separada de los casos anteriores dado que corresponden a otro tipo de desgaste, no de los filos sino de las esquinas externas.

El resultado concreto de esta parte del trabajo es la posibilidad de evaluar el estado de las mechas a partir de ir calculando los parámetros VMPPM y MMPM y verificando en qué zona del gráfico bidimensional están ubicados los resultados. Así, si la MMPM da menor que 20 cuentas de E/ms seguramente la mecha esté en buen estado, mientras que para valores mayores se considerará que la mecha tiene un desgaste que comienza a hacerse significativo. En este análisis también se considerará la VMPPM para detectar si el deterioro está en el filo o en las esquinas externas de la punta de la mecha. También se podrá intentar inferir el grado de desgaste de la mecha a partir de situar las mediciones incógnita respecto de los centros de masa de los clusters de cada caso preestablecido.

La PM está relacionada con la fuerza aplicada en la zona primaria de corte, las áreas de contacto entre herramienta-viruta y herramienta-pieza, y también con la rotura y el impacto de las virutas. En este trabajo se estableció que el grado de variabilidad de la PM, representado por la VMPPM, estaría controlado principalmente por la mayor o menor fractura de la viruta. Por otra parte la magnitud de la PM estudiada con la MMPM estaría determinada por procesos de deformación plástica y fricción, y también por la rotura de la viruta.

Respecto del estado de los filos, aquellos en buen estado como FN1, FN2 y FN3, y el caso FCE con un daño menor, realizan un corte con una viruta continua en trozos de una longitud de centímetros, mientras que los filos dañados FE1, FE2 y FCM produjeron fragmentos de viruta de tamaño de pocos milímetros y forma irregular. La mayor fractura de la viruta está relacionada con un aumento de la emisión de señales tipo burst, que se superponen a la señal continua de EA producida por los mecanismos principales de corte. Esto se traduce en una mayor variabilidad de la PM. En la literatura se encuentran resultados afines para estudios del parámetro RMS de la EA [Dornfeld (1987)]. Para el incremento del daño de los filos también se observa el aumento de la media de la PM en concordancia con el análisis de las secciones previas (6.3.1 y 6.3.3). Esto sería consecuencia del aumento de la fractura de la viruta y de la fricción como efecto del desgaste de los filos. Para el caso de la EGM vuelve a producirse una viruta menos fragmentada y por lo tanto una varianza menor de la PM, aunque el desequilibrio producido por las esquinas gastadas conlleva una mayor fricción que se hace explícita en el aumento de la EA, y por lo tanto de su PM.

El incremento de la variabilidad podría ser usado para evaluar el tipo de viruta producida, y de esta forma sería posible correlacionarla con el desgaste característico de las mechas.

El método descrito podría ser útil para su aplicación a procesos repetitivos, por ejemplo, cuando se debe fabricar un mismo tipo de pieza, con un mismo material, a condiciones constantes de velocidad, lubricación, diámetro de la mecha, etc.

Caso límite: Representación VMP vs. MPM

La Fig. 6.27 muestra la representación de la variancia de la PM (VPM) en función de la media de la PM (MPM). La descripción de los casos es similar a la de las Fig. 6.25 y 6.26. En este gráfico los puntos fueron obtenidos calculando la variancia y el promedio de la PM para cada ensayo de taladrado. De esta forma, cada punto representa el promedio de miles de hits obtenidos en cada ensayo. Los mapas de las Fig. 6.25 y 6.26 dan más información de la variabilidad de las señales de EA en la evolución de los ensayos, que se pierde con los promedios.

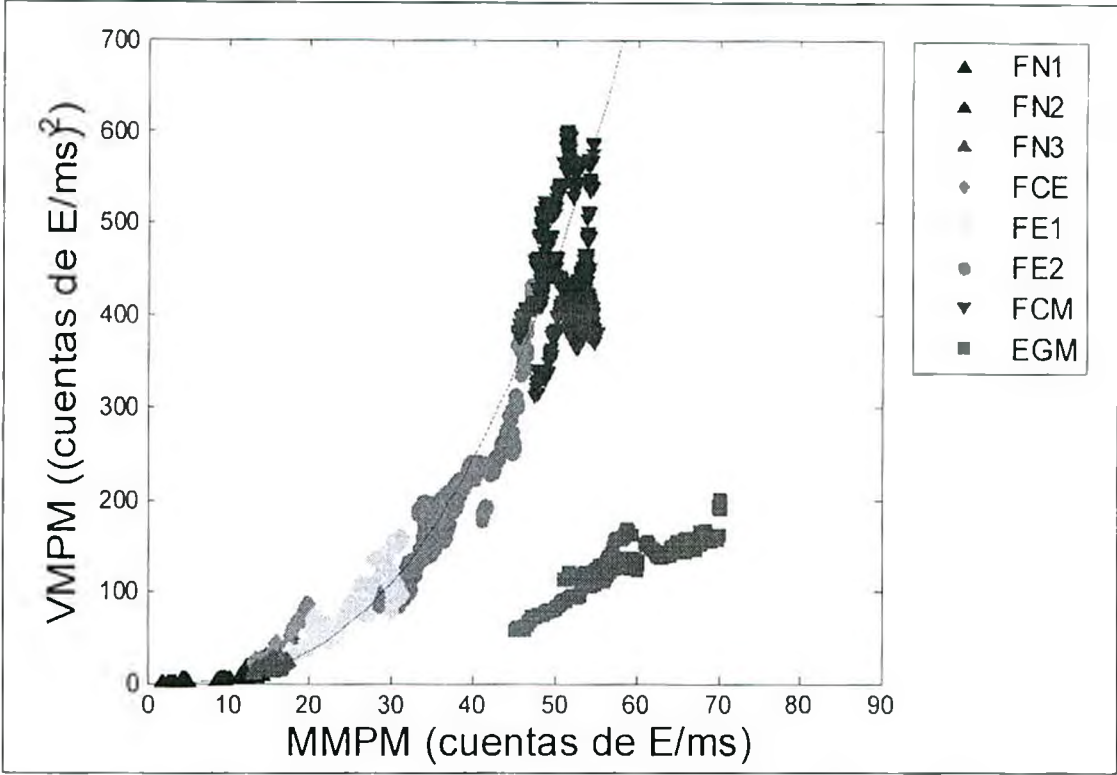


Fig. 6.26. Representación de VMPM vs. MMPM para las señales de EA generadas en 30 ensayos de taladrado con 8 diferentes estados de la herramienta, manteniendo los mismos parámetros de corte. Cada punto en el gráfico corresponde a cada hit de EA promediado con una cantidad determinada de vecinos en la MM y la VM. Cada marcador, y color, representan a cada caso de desgaste de la mecha. El promedio fue realizado con ventanas de 300 puntos. La línea roja indica el ajuste de una función potencial a la distribución de los puntos de las mechas con daños en los filos.

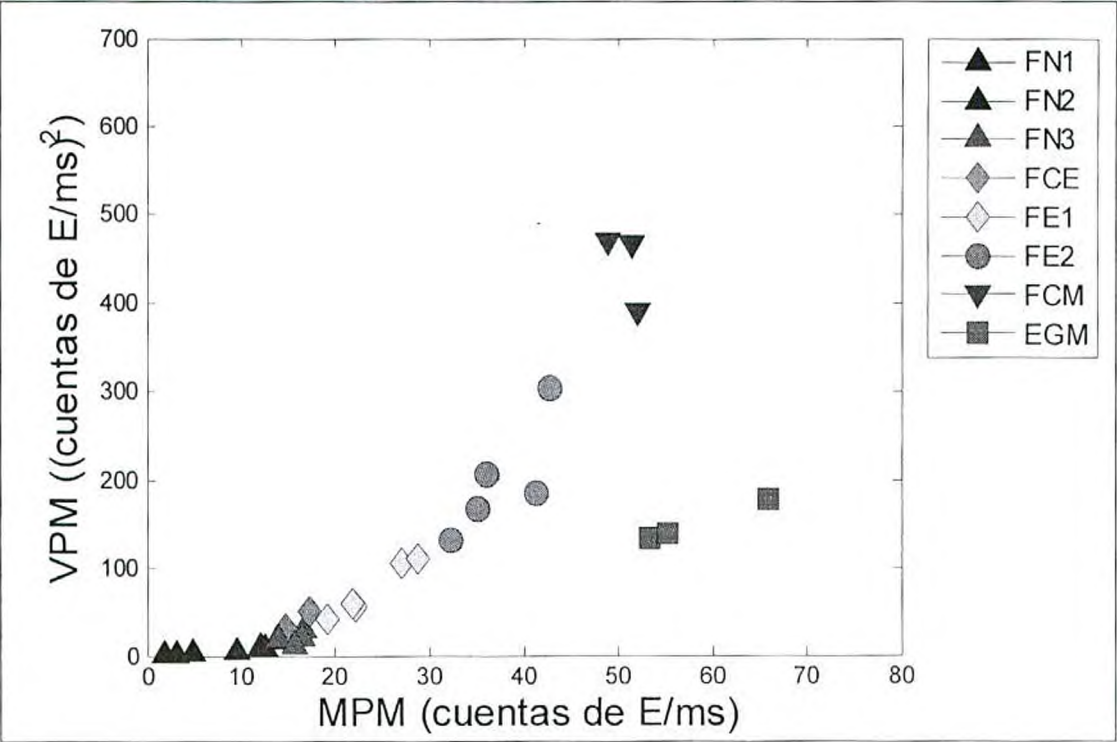


Fig. 6.27. VPM vs. MPM la descripción de los casos es similar a la de la Fig. 6.18. En este gráfico los puntos fueron obtenidos calculando la varianza y el promedio de la potencia media para cada ensayo.

6.3.5. Análisis espectral de las formas de onda de las señales de EA

En esta etapa se estudiaron las formas de ondas de EA adquiridas en los ensayos de taladrado. Para relacionar el comportamiento de las formas de onda de la EA con los distintos estados de las mechas, se seleccionaron aquellas señales que se denominaron “estacionarias”, de las cuales se estudiaron su tasa de emisión y la evolución de su potencia espectral promedio (PEP) en función de la condición de la herramienta.

En primer lugar en la Fig. 6.28, se muestran tres gráficos a modo de ejemplo para los casos de las mechas FN1, FE2 y EGM, en los que se representó la PEP de las formas de onda “estacionarias” en función de su número de orden. Para esto se definieron tres bandas de frecuencia denominadas B1, B2 y B3 para los rangos entre 50-150 kHz, 150-250 kHz y 250-350 kHz respectivamente. De similar forma se repitieron las representaciones para cada caso de desgaste y para cada banda de frecuencia.

De las figuras analizadas y de las tablas se pueden indagar dos aspectos principales para poder establecer una relación entre el comportamiento de la EA y las señales adquiridas con respecto a los distintos estados de las mechas utilizadas.

Por un lado, a partir de la cantidad de señales estacionarias para cada ensayo, se podría inferir un comportamiento en el corte de la herramienta. En la Fig. 6.29 se graficó la tasa de emisión de señales estacionarias (TEE) en función de cada condición de mecha. Esto se calculó tomando la cantidad de señales estacionarias (N_{est}) medidas y dividiéndola por el tiempo total de ensayo durante el cual fueron medidas. En el caso de que el número de ensayos para un determinado estado de mecha fuera mayor que uno se sumaron las cantidades de formas de onda y los tiempos de todos estos. Para las mechas con los filos en buen estado (FN1 y FN2), la cantidad de señales estacionarias (sin señales transitorias tipo explosión) dio un número alto, mientras que para los distintos casos de mechas dañadas la cantidad de estacionarias fue menor o mucho menor, dependiendo del tipo de daño. El caso FN3, que corresponde a una mecha con defectos de fabricación, mostró una TEE baja. Para los casos de ambas mechas con los filos suprimidos por medio de un plano realizado por electroerosión perpendicular al mismo (FE1 y FE2), el número de formas de onda puramente estacionarias fue muy pequeño, con una tasa de emisión menor que una señal por segundo. También fue baja la TEE para el caso de la mecha con los filos craterizados por electroerosión (FCE), y muy baja aquella con los filos craterizados mecánicamente (FCM). La mecha con las esquinas externas (EGM) volvió a tener una relativamente alta tasa de emisión. Haciendo una observación de la viruta generada en cada uno de estos casos, se observó una correlación entre el tipo de viruta y la TEE. En los casos FN1 y FN2 la viruta obtenida fue continua y regular. En el caso FN3 continuó siendo continua pero muy irregular (fragmentada lateralmente). Para la mecha FCE estaba más fragmentada que en los casos anteriores, pero conservaba tramos continuos. En los casos FE1 y FE2 la viruta se produjo totalmente fragmentada, al igual que en FCM. Para EGM la viruta fue continua e irregular. Una explicación de esta relación viruta-TEE es que la rotura de la viruta es un emisor importante de ondas tipo estallido (“burst”) concebidas en la fractura de las mismas. Los casos en los cuales la viruta surgió totalmente fragmentada, se correspondía con una EA que había sido muy activa en la forma de señales transitorias, dejando poco margen para la manifestación única de las señales estacionarias.

Por otro lado, respecto de la potencia espectral de la EA para las bandas B1, B2 y B3, se pudo relacionar su evolución con el nivel de desgaste de la herramienta, tanto en su magnitud como en su distribución en frecuencia. Una mejor visión de los datos mostrados en la Tabla VI.II se obtuvo en el gráfico de la Fig. 6.30 en el cual se representan la PEP_M que es la media de la potencia espectral promedio, y su respectiva desviación estándar (σ_{PEP}), para cada caso de desgaste. En el gráfico, el eje de la PEP_M está representado en escala logarítmica para poder incluir todas las mediciones, y debe observarse con precaución al momento de analizar las diferencias. En esa figura se observa que para los casos de mechas sin desgaste FN1 y FN2, el valor de la PEP_M es bajo y las tres bandas están superpuestas, principalmente B1 y B2, con la B3

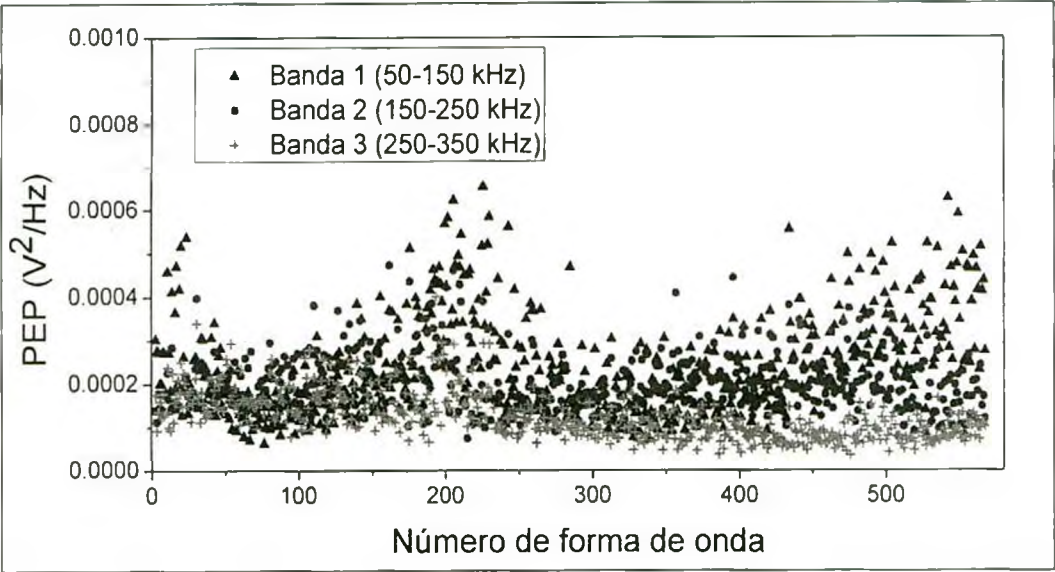
mostrando un menor valor, pero dentro del intervalo de incertidumbre de los errores. Lo mismo ocurre para la mecha con deficiencias de terminación en los filos FN3, alcanzando una PEP_M levemente mayor. Para las mechas con pequeños cráteres en sus filos el valor de la PEP para la banda B2 comienza a separarse de la B1, tomando un valor mayor, por lo que la distribución de la potencia espectral rompe la uniformidad y comienza a tomar supremacía en la B2, lo que llevaría a suponer que los mecanismos de emisión en esa banda comienzan a ser más relevantes. Este comportamiento se va haciendo más notorio mientras aumenta la severidad del desgaste de los filos hasta los casos de las mechas FE2 y FCM, en las cuales empieza a notarse un aumento en la B3 que indicaría que se estarían activando mecanismos de emisión a frecuencias mayores. El caso siguiente que es el de la EGM (esquinas externas gastadas mecánicamente) no corresponde a un daño en los filos, sino que se trata de un problema diferente de igual o mayor relevancia que los previos. Haciendo esta aclaración, la EGM se muestra en el mismo gráfico para comparar magnitudes relativas. En este caso la PEP_M aumenta notablemente, triplicando en la B2 el valor de la B1, y duplicando el de la B3. En este caso también es notable el predominio de las bandas B2 y B3, activándose mayormente los mecanismos de la EA de frecuencias mayores, posiblemente como efecto de la mayor fricción, consecuencia del tipo de daño.

Los resultados obtenidos para el taladrado están en concordancia con los obtenidos para el maquinado con torno [Du y otros (1991)] [Gómez y otros (2007)] [Iwata y Moriwaki (1977)]. En el primer trabajo mencionado se habla de dos bandas de frecuencia de las señales de EA que se activan por distintos mecanismos, los de menor frecuencia, relacionados con el corte, y los de mayor con efectos como la fricción, que en este capítulo del trabajo de tesis se podrían relacionar con el deterioro de la herramienta de corte en la pérdida del filo, o en algún factor que cause un mayor rozamiento, como el desgaste de la esquina externa de la mecha. El segundo trabajo mencionado habla de un corrimiento de la distribución de potencia hacia valores mayores de frecuencia con el desgaste (en realidad, de la escala de onditas hacia valores menores).

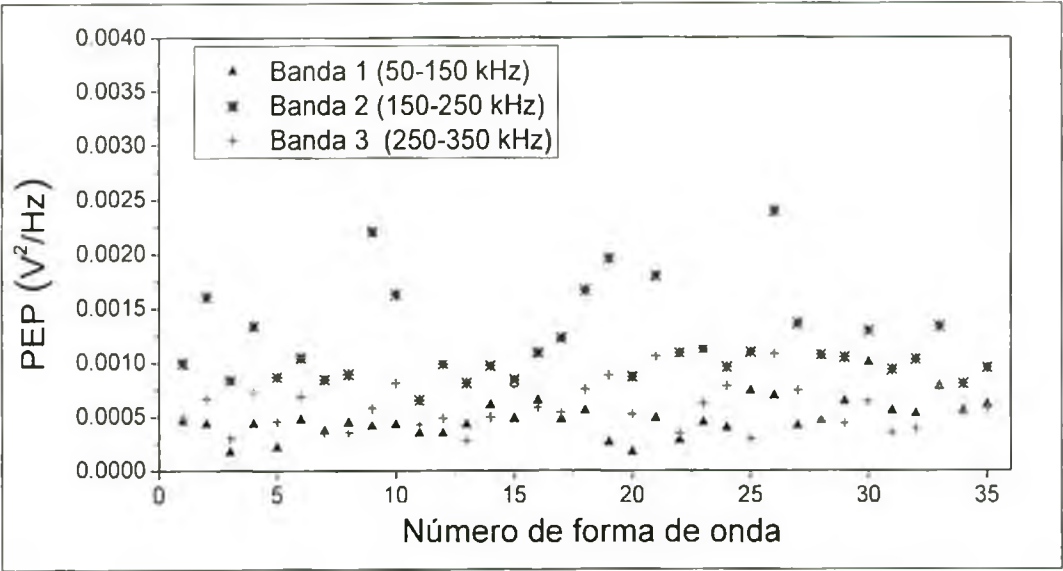
Según la bibliografía [Du y otros (1991)], la primera banda (B1) estaría relacionada con la energía liberada en el arranque del material durante el corte, intensificándose su correspondiente pico en el espectro de potencia siempre que haya corte, y que la señal de EA provenga de ese corte. Las bandas segunda y tercera (B2 y B3) se relacionarían con la fricción, aumentando en general con el desgaste. Resumiendo, el efecto observado con el aumento del desgaste de la mecha es el incremento de la media de la potencia espectral promedio de la EA principalmente en la banda B2 y en menor grado en la B3 (ambas respecto del incremento de la B1), al aumentar el desgaste, tanto de los filos de corte como de las esquinas externas de la punta de la mecha, en concordancia con los trabajos previamente citados.

Dada la alta dispersión en los resultados obtenidos, este método de análisis se podría aplicar a un caso real en un procedimiento similar al realizado en el presente trabajo, pero en lo posible, tratando de evaluar un número considerable de mediciones. No es aplicable a pocas señales, sino a un conjunto grande de ellas, si se quiere tener un resultado aceptable. Esto es técnicamente posible ya que en 10 segundos de trabajo de corte estacionario de la mecha podrían tomarse por ejemplo 1000 señales de EA de las cuales un sistema seleccione las estacionarias y las procese, construyendo una estadística de la actividad de cada banda y analizando la relación entre las bandas B1 y B2. También, al seleccionarse las señales estacionarias de la cantidad total, podría estimarse la proporción de señales tipo explosión para poder estudiar otros efectos del corte como la rotura de la viruta. Un paso siguiente que mejoraría la precisión del sistema sería la aplicación de redes neuronales para la clasificación de los casos.

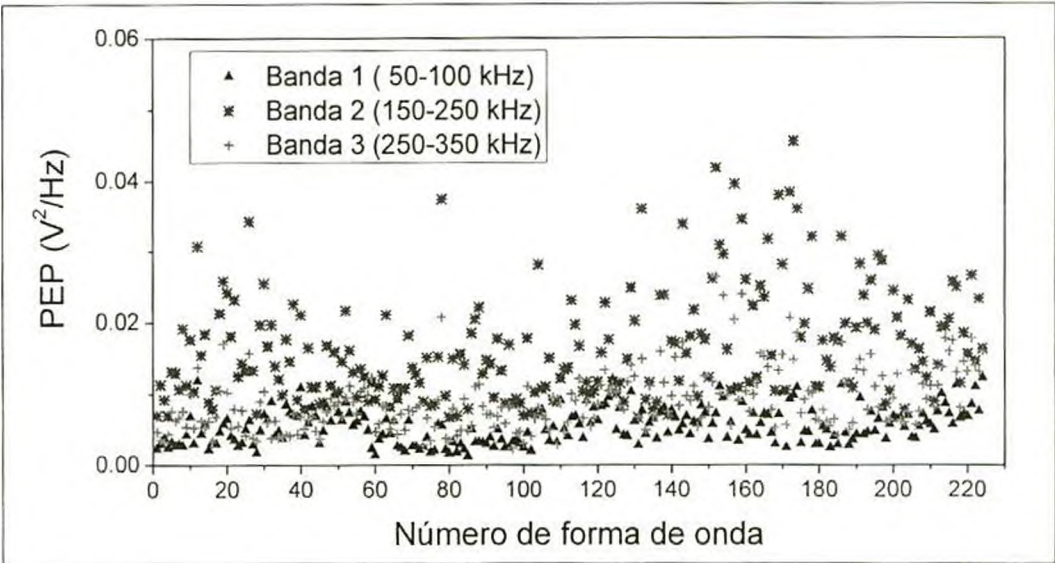
Respecto del análisis en el espectro de frecuencia se podría haber aplicado una herramienta más poderosa que son las onditas ("wavelets") como se hizo en el Capítulo 4 y en Gómez y otros (2007b) pero se estimó que no era necesario por tratarse de señales cuyo requisito era que fueran estacionarias, por lo que era válida la aplicación del análisis por FFT.



a. Mecha FN1.



b. Mecha FE2.



c. Mecha EGM.

Fig. 6.28. Representación de la PEP en función de las sucesivas formas de onda, para las tres bandas de frecuencia, para tres mechas con distintos estados de desgaste.

Tabla VI.II. Cálculos de la media y la desviación estándar (σ) de la potencia espectral promedio (PEP) para cada banda. N_{est} es el número de señales estacionarias para cada caso de desgaste.

MECHA	N_{est}		PEP B1 (50-150 kHz) ($10^{-4}V^2/Hz$)	PEP B2 (150-250 kHz) ($10^{-4}V^2/Hz$)	PEP B3 (250-350 kHz) ($10^{-4}V^2/Hz$)
FN1	584	PEP_M	2,45	2,00	1,24
Sin deterioro inducido, poco uso 1		σ_{PEP}	1,16	0,66	0,75
FN2	236	PEP_M	2,65	3,43	2,45
Sin deterioro inducido, poco uso 2		σ_{PEP}	1,06	1,31	0,75
FN3	71	PEP_M	3,89	5,14	2,94
Sin deterioro inducido, con defectos de fabricación		σ_{PEP}	1,36	2,00	1,36
FCE	70	PEP_M	3,20	8,30	3,55
Con cráteres en filos por electroerosión		σ_{PEP}	1,65	3,26	1,41
FE1	40	PEP_M	3,50	11,60	3,19
Con filo eliminado por electroerosión 1		σ_{PEP}	2,02	5,35	1,75
FE2	35	PEP_M	4,77	11,9	5,79
Con filo eliminado por electroerosión 2		σ_{PEP}	1,73	4,12	2,06
FCM	224	PEP_M	7,75	17,30	12,1
Con defectos de fabricación por electroerosión		σ_{PEP}	2,51	7,77	4,77
EGM	224	PEP_M	54,91	166,3	89,7
Con esquinas externas gastadas mecánicamente		σ_{PEP}	24,80	77,3	42,9

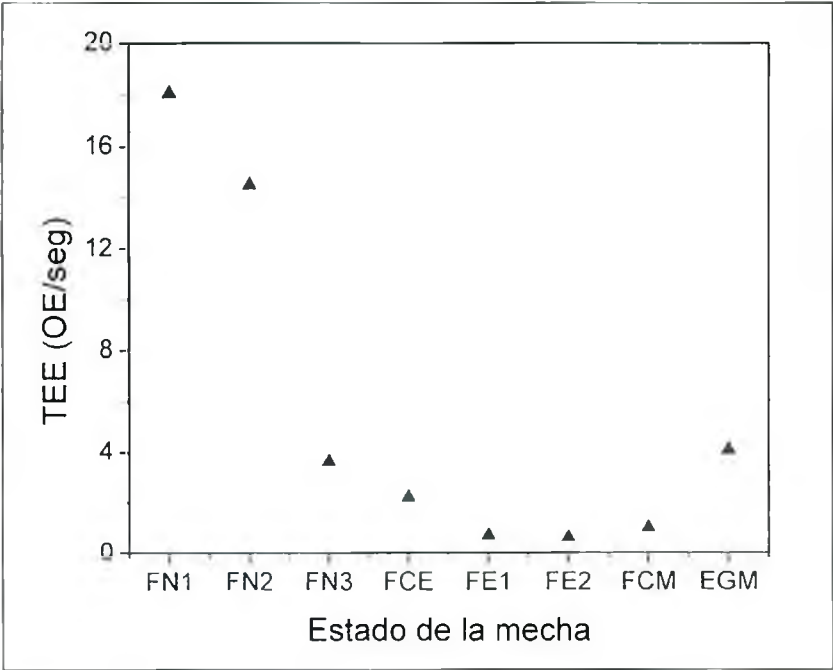


Fig. 6.29. Tasa de emisión de señales estacionarias (TEE) en cantidad de formas de onda “cuasi-estacionarias” por segundo.

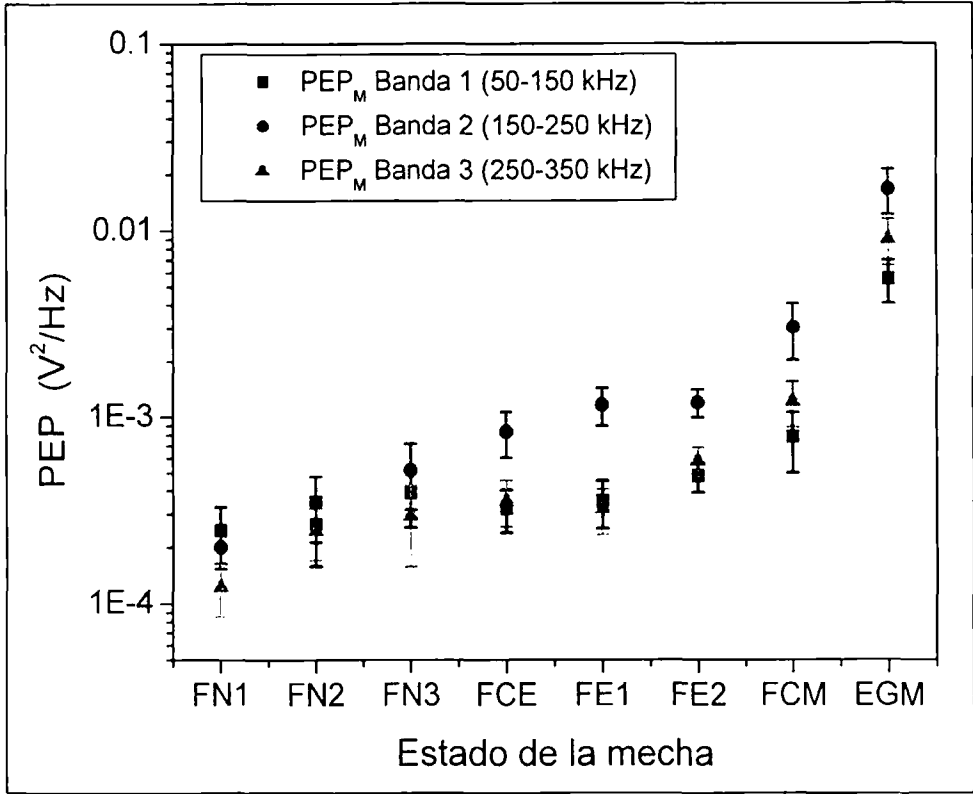


Fig. 6.30. PEP en función del estado de desgaste de la mecha, para cada banda de frecuencia.

6.3.6 Otros métodos para evaluar el grado de estacionariedad de las señales

A modo de complemento de la metodología utilizada para evaluar el grado de estacionariedad de las señales, a continuación se presentan dos criterios alternativos que podrían utilizarse para separar las señales estacionarias de las que no lo son, uno basado en la estadística de los tipos de señales de EA y otra a partir de la descomposición en frecuencia con onditas (“wavelets”).

6.3.6.1 Evaluando el ajuste a una distribución gaussiana

Respecto de la evaluación del grado de estacionariedad de las señales, en el trabajo se examinó un método alternativo al utilizado en el análisis previo (basado en la autocorrelación de la señal y una ventana móvil) para seleccionar las señales continuas puras de aquellas que contenían una “no estacionariedad” dada por el agregado de una señal de tipo explosión de amplitud significativa. Entonces se obtuvo un criterio complementario para estudiar la “gaussianidad” de las formas de onda de EA y poder separar las estacionarias de las que no lo eran. Esto se fundamentó en trabajos extraídos de la literatura [Ono (2005)], en los cuales se propone que la distribución de la amplitud de una señal de EA continua es en general de tipo gaussiano. De tal manera para corroborarlo se tomaron algunas de las señales medidas y se ajustaron por medio de un programa de MATLAB, donde se verificó que las señales de tipo continuo ajustaban correctamente a una distribución gaussiana. En las Fig. 6.31 a y b se observan ejemplos de las amplitudes de dos formas de onda de EA y sus correspondientes histogramas en los cuales se ajustan los datos a distribuciones gaussianas. En ese ajuste se pueden distinguir claramente dos casos diferentes de generación de la onda de EA. Luego según el grado de ajuste de la función gaussiana a los datos medidos se podrá discriminar entre señales continuas y discretas. La “gaussianidad” de las señales continuas está basada en el origen de estas, como una superposición aleatoria de un número muy grande señales tipo burst [Ono (2005)], tal como fuera mencionado en el Capítulo 1. Una herramienta práctica para evaluar cuan gaussianas son las formas de onda puede conseguirse a partir de la Curtosis, relacionada con el momento de cuarto orden [Kannatey Asibu y Dornfeld (1982)] [González de la Rosa y otros (2008)].

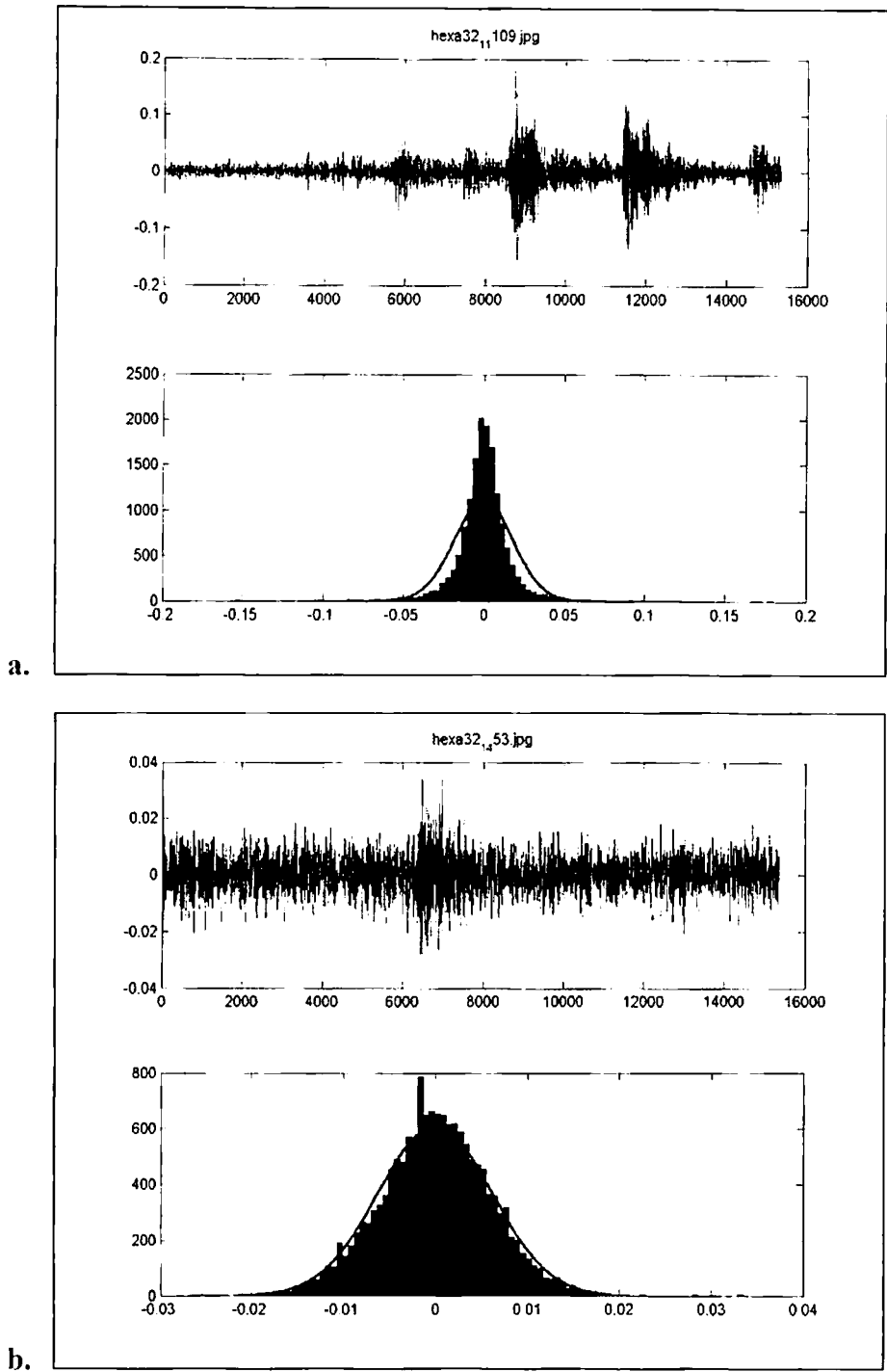


Fig. 6.31. Ejemplos de las amplitudes de dos formas de onda de EA y sus correspondientes histogramas en los cuales se ajustan los datos a distribuciones gaussianas. **a.** Caso de señal no estacionaria. **b.** caso de señal considerada “estacionaria”.

6.3.6.2 Evaluando la descomposición tiempo-frecuencia por onditas (“wavelets”)

Otra alternativa a los dos métodos descriptos anteriormente para evaluar el grado de estacionariedad de las señales de EA y clasificarlas, se puede obtener a partir de descomponer en onditas las formas de onda estudiadas. De tal modo, se evalúa la homogeneidad de la distribución en frecuencia de los coeficientes de onditas a lo largo del tiempo, siendo notoria la dependencia en el tiempo de la señal en este tipo de representación (amplitud de los coeficientes onditas-tiempo-frecuencia). En las Fig. 6.32 a y b se pueden observar dos casos, uno para una señal de EA no estacionaria y otro para una que si lo es, respectivamente.

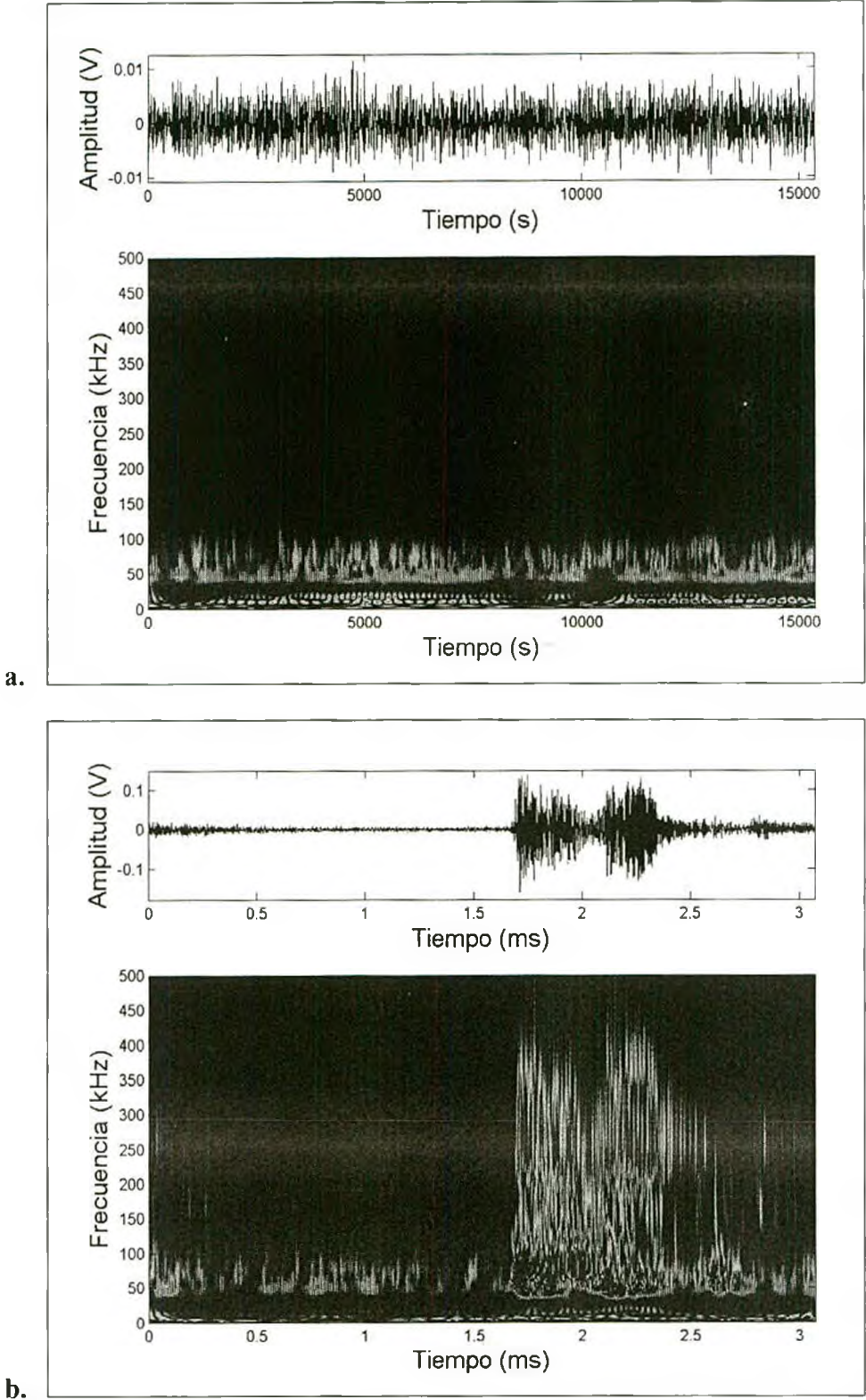


Fig. 6.32. Ejemplos de descomposición en tiempo frecuencia por wavelets para dos formas de onda de EA Las señales corresponden a un caso de mecha sana FN2. **a.** Caso de señal considerada “estacionaria”. **b.** Caso de señal no estacionaria.

Se observa en la descomposición tiempo–frecuencia de la Fig. 6.32.a la muy sutil variación estocástica de la señal clasificada como “estacionaria”, mientras que en la Fig. 6.32.b se muestra una señal fuertemente dependiente del tiempo. Observando ambas figuras se puede determinar claramente cuál depende del tiempo y cuál no. De esta forma, se puede instrumentar una metodología de separación de casos, tanto a partir de onditas continuas [Cacace y otros (2011)] [Suzuki y otros (1999)] como las ejemplificadas, así como por onditas discretas [Maradei y otros (2002)], de mayor potencia y economía de cálculo.

6.3.7 Discusión adicional sobre la PM de la EA durante el corte

Del análisis de las señales estacionarias se desprende un examen alternativo que permitiría discriminar la magnitud aproximada de los dos modos principales de EA, para indagar cuál es la potencia media de la EA de las fuentes continuas y cuál la de las fuentes de emisión en forma de pulsos (o tipo explosión) [Moriwaki (1980)] [Liang y Dornfeld (1989)] [Dornfeld (1991)]. Según la bibliografía, las continuas estarían encabezadas por la fricción [Heiple y otros (1994)] [Carpenter y otros (1992)] [Li y Zhejun (1998)] y un poco menos por la deformación plástica, mientras que las otras tendrían como mecanismo principal a la rotura de las virutas [Li (2002)] [Inasaki (1998)]. Entonces, se realizó una estimación de la PM emitida por las señales de EA no estacionarias, a partir de los resultados mostrados en las Fig. 6.18 y 6.30 correspondientes a la PM de todas las señales y a la de las señales “estacionarias” respectivamente. Para esto se llevó la PEP calculada de las formas de onda tipo continua (o “estacionarias”) a las unidades de PM, para compararla con la PM calculada a partir de la parametrización de la totalidad de los golpes (o “hits”) de EA. Luego se representaron cada una en un mismo gráfico (Fig. 6.33). Luego se le restó a la PM total (triángulos verdes) la PM de las señales estacionarias supuestamente sin rotura de viruta (triángulos azules) para estimar, de manera aproximada, la PM correspondiente a las señales tipo explosión, dadas por la rotura de la viruta, representadas en la Fig. 6.34. Este resultado concordó con lo observado experimentalmente y registrado en imágenes digitales donde en los casos FE1, FE2 y FCM se observa la producción de viruta muy rota, por lo cual es lógico que en esos tres casos la PM de las formas de onda no estacionarias presenten los valores más grandes. El último caso correspondiente a la EGM vuelve a mostrar viruta continua (que se puede ver también en el gráfico que representa la TEE de la Fig. 6.29, o en el ejemplo de la Fig. 6.28c) lo que concuerda con el hecho que la parte de la PM correspondiente a la emisión de la viruta vuelve a bajar. Cabe aclarar que se exceptuó del análisis al caso FN1 en el cual la PM total daba menor que la correspondiente a la parcialidad estacionaria, considerándose como un punto fuera del rango (“outlier”).

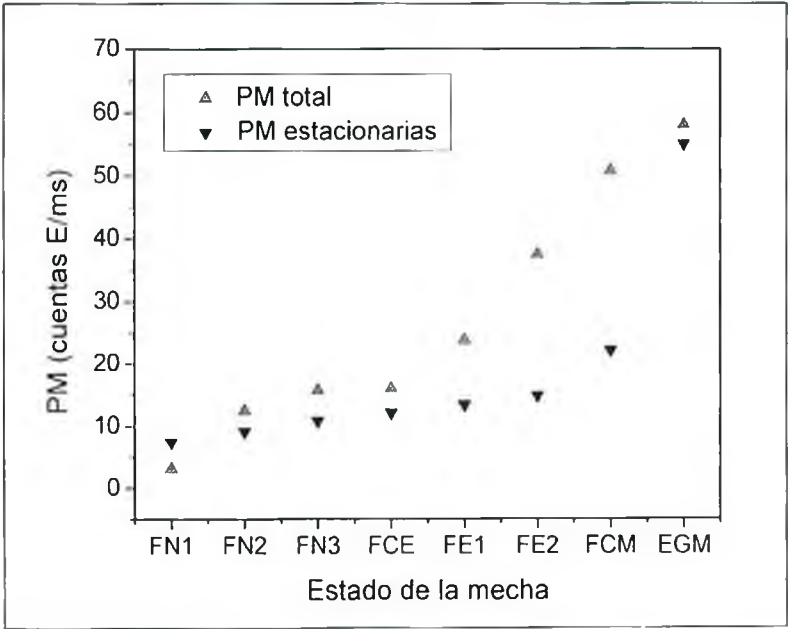


Fig. 6.33. Potencia media en función del estado de la mecha para todas las señales y para el caso restringido de señales “estacionarias”.

Este análisis es aproximado ya que se están comparando señales medidas en formas diferentes por el equipo de EA, por un lado los parámetros adquiridos durante 20 ms y por otro las formas de onda tomadas durante 3 ms. Es alentador que pese a esto, al juntar los resultados obtenidos por ambas metodologías de adquisición y procesamiento, estos muestran en general una concordancia entre sí, y con su sentido físico. Probablemente esa coherencia se fundamente en el número muy grande de mediciones tomado para cada caso, que consolida el carácter estocástico

de la EA, frente al tiempo de muestreo de cada hit. La imagen global que deja este análisis es enriquecedora.

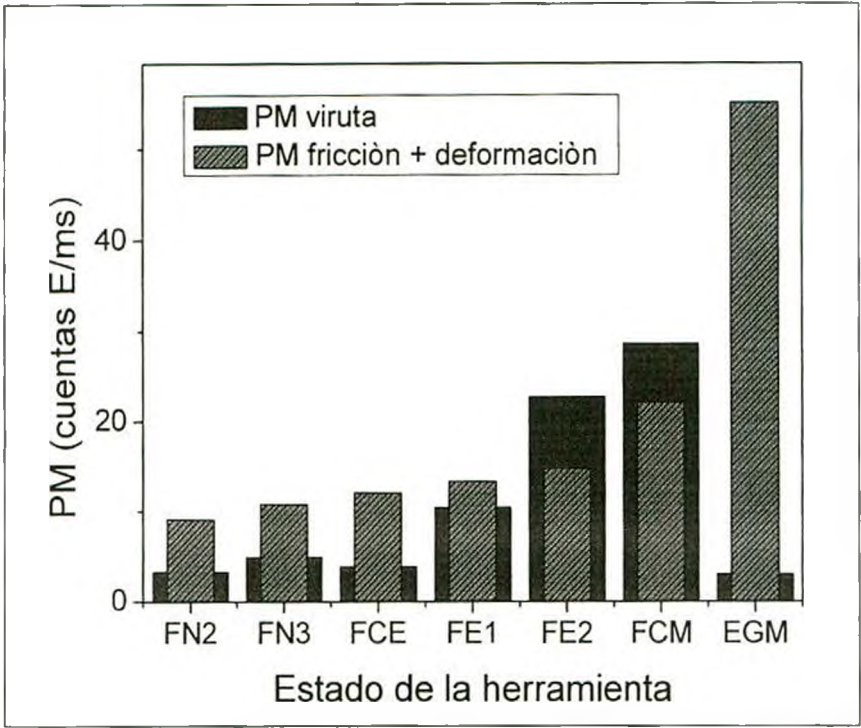


Fig. 6.34. Comparación entre la PM de la EA generada por distintos mecanismos. Las barras rojas corresponden a la PM generada por la rotura de la viruta, mientras que las verdes por la fricción y deformación plástica.

6.3.8 Determinación de la velocidad de rotación de la mecha a partir del parámetro D y del streaming

Durante una tanda de ensayos, en la que se realizó una cantidad de 10 experimentos, se procedió a la determinación de la velocidad de rotación de la mecha prosiguiendo las metodologías propuestas en el Capítulo 5. Por un lado se calculó la velocidad de avance a partir del parámetro D definido en el capítulo previo, y a partir de esta, la velocidad de rotación. Ambas velocidades están relacionadas por un factor multiplicativo dado por la caja de engranajes de la máquina fresadora utilizada para los ensayos. Por otro lado se calculó la velocidad de rotación a partir del estudio de la señal completa de EA, también denominada señal de “streaming”.

A partir del parámetro D

En la Tabla VI.III se pueden observar los resultados de la velocidad de rotación promedio de la mecha, calculada durante cada uno de los 10 ensayos efectuados, a partir del tiempo de corte estimado por la actividad del parámetro D de la EA, propuesto en el capítulo anterior. De este modo, se tuvo en cuenta el tiempo de actividad de la mecha y la profundidad del agujero para el cálculo de la velocidad de avance. Estos parámetros así como la velocidad de avance también fueron expresados en la tabla.

A partir de la señal de “streaming”

Otra forma de calcular la velocidad de rotación de la mecha, de modo más directo es a partir del cálculo del período de una vuelta aplicando la función de auto-correlación a la señal completa de EA (de “streaming”). Tal como fue expresado en secciones previas, una vez conocido el período, es inmediato el cálculo de la velocidad de rotación. En la Tabla VI.IV se puede observar la velocidad de rotación y su respectivo error, calculados para la tanda de ensayos de taladrado estudiados.

Tabla VI.III Velocidad de rotación de la mecha, calculada a partir del tiempo de corte estimado por el parámetro D de la EA, para una tanda de ensayos de taladrado.

Casos de una serie	Longitud del agujero (mm)	t _{corte} por parámetro D (s)	V _{AV} por parámetro D (mm/s)	V _{ROT} por parámetro D (vueltas/min)
FE2	17,3 ± 0,1	47,4 ± 0,4	0,365 ± 0,005	547,2 ± 7,8
FE2	18,3 ± 0,1	49,7 ± 0,4	0,368 ± 0,005	552,5 ± 7,6
FE2	18,6 ± 0,1	50,8 ± 0,4	0,366 ± 0,005	549,4 ± 7,1
FCM	18,8 ± 0,1	51,0 ± 0,4	0,369 ± 0,005	552,9 ± 7,5
FCM	17,8 ± 0,1	49,8 ± 0,4	0,358 ± 0,005	536,6 ± 7,2
FN2	15,2 ± 0,1	43,1 ± 0,4	0,353 ± 0,006	529,5 ± 8,1
FN2	16,7 ± 0,1	46,9 ± 0,4	0,356 ± 0,005	533,7 ± 7,9
FN2	15,0 ± 0,1	41,0 ± 0,4	0,366 ± 0,006	548,5 ± 8,7
EGM	16,1 ± 0,1	43,8 ± 0,4	0,367 ± 0,006	551,1 ± 8,9
EGM	16,7 ± 0,1	45,9 ± 0,4	0,364 ± 0,005	545,6 ± 8,0

Tabla VI.IV Velocidad de rotación de la mecha, calculada a partir del cálculo del periodo de una vuelta por auto-correlación de la señal de “streaming”, para una tanda de ensayos de taladrado.

Casos de una serie	V _{ROT} por “streaming” (vueltas/min)
FE2	538,0 ± 2,7
FE2	542,1 ± 2,8
FE2	535,9 ± 2,7
FCM	533,4 ± 2,8
FCM	533,4 ± 2,7
FN2	533,6 ± 2,6
FN2	530,8 ± 2,7
FN2	535,7 ± 2,7
EGM	531,2 ± 2,8
EGM	531,5 ± 2,7

Discusión de ambos métodos

En la Fig. 6.33 se graficó la velocidad de rotación de la mecha calculada a partir de los dos métodos mencionados, a partir de los parámetros de EA y de la señal de streaming. El primer

caso está representado por triángulos rojos mientras que el segundo por cuadrados negros. A primera vista se observa que el segundo método tiene una menor dispersión de los resultados y también un menor intervalo de error. El error general de las mediciones por el primer método es mucho mayor por varios motivos. Por un lado la determinación del tiempo de corte y de la profundidad conlleva a errores de medición considerables. Cabe recordar por otra parte que la velocidad de avance es en realidad un promedio efectuado sobre un proceso que tiene distintas etapas y que está calculado en un tiempo largo, durante el cual podrían ocurrir variaciones en la velocidad para los distintos casos aumentando su variabilidad. Para la señal de streaming las mediciones en general se efectuaron en la etapa inicial del corte en los primeros 5 segundos. La mayor precisión de este método era de esperarse dado que la auto-correlación permite calcular con gran exactitud el tiempo entre dos eventos. De esta forma, la determinación del tiempo es muy precisa y está condicionada por la tasa de muestreo, que si es alta dará una indeterminación muy pequeña. En este caso se utilizó una tasa de muestreo intermedia por razones de tiempo de cálculo del programa en MATLAB con el que se realizó la auto-correlación de la señal de EA.

Se buscó a grandes rasgos una correlación entre las velocidades y el tipo de desgaste de la mecha, que justificara la dispersión de los resultados obtenidos, pero en ninguno de los dos casos se encontró una relación consistente. Hay otros factores a tenerse en cuenta para tal variación de los resultados como las características del motor asincrónico que genera la rotación de la mecha y que por ende controla la velocidad de rotación, también pudiéndose mencionar como factor de error a la tensión de línea, cuya alteración puede variar levemente la velocidad.

Este análisis fue efectuado para mostrar el potencial de la implementación de este método de END, la EA, en un contexto como el de las máquinas utilizadas para el mecanizado de piezas metálicas, y como un ejemplo más de la valiosa información que está contenida en las ondas elásticas que se producen durante el proceso de corte y que es accesible desde la EA. Esta aclaración se hace ya que se podrían mencionar métodos actuales para la determinación de la velocidad de rotación de igual o menor costo y con mayor precisión que el propuesto en este capítulo, como por ejemplo sistemas ópticos basados en láser.

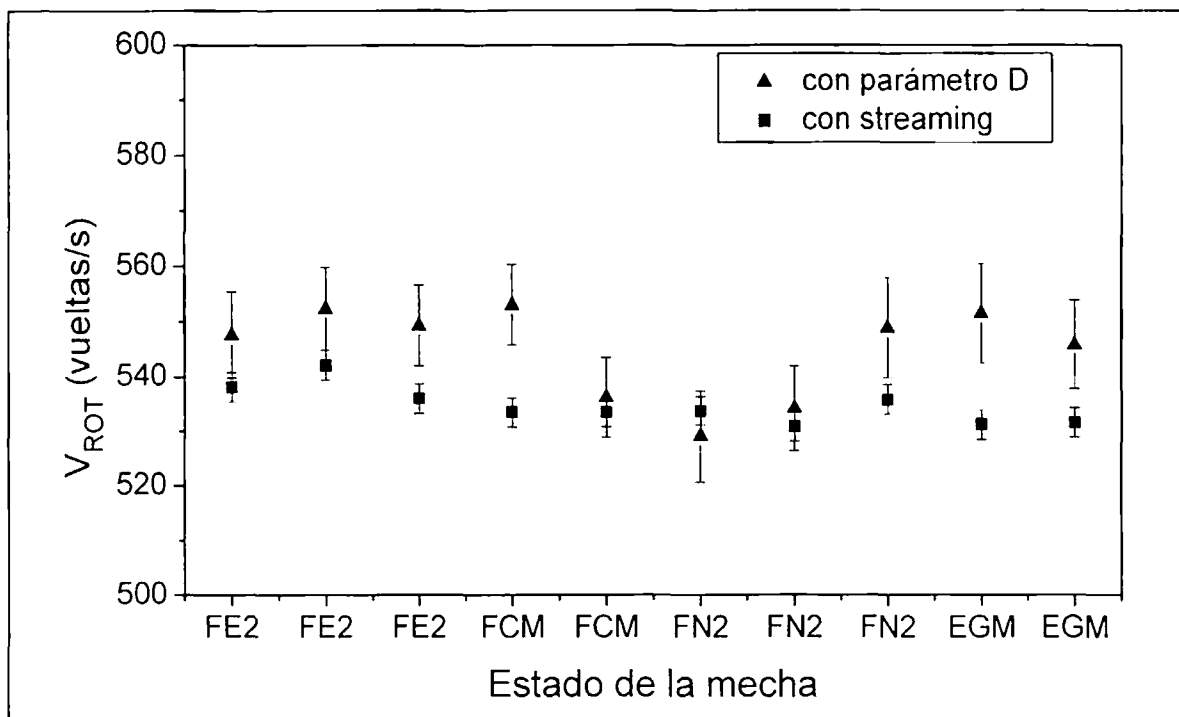


Fig. 6.33. Representación de la velocidad de rotación de la mecha calculada a partir de la señal de streaming y de los parámetros de EA

6.4 Conclusiones del capítulo 6

A continuación se presentan las conclusiones extraídas del presente trabajo en un orden similar al seguido a lo largo del capítulo.

Del desarrollo de trabajo

- *De la etapa de preparación de los ensayos*
 - El material de las probetas a maquinar mostró un grado de homogeneidad que garantizó la repetitividad de los ensayos.
 - Los modelos de herramientas desgastadas obtenidos por electroerosión permiten afirmar que este es un buen método para generar desgaste artificial de manera efectivamente controlada.
 - Se corroboró que la MEB es un excelente método directo para la determinación del estado de desgaste de las mechas.
- *De la etapa de medición*
 - Durante cada ensayo de taladrado se registraron miles de golpes (“hits”) de EA y con cada uno de estos el torque, lo cual aseguró una estadística robusta al momento de evaluar los resultados de esos parámetros. (Igualmente para afirmar la representatividad de los resultados se realizaron al menos tres ensayos para cada condición de mecha).
 - Cada ensayo se dividió en siete etapas de corte, correspondiendo la mayoría de los estudios efectuados a las señales de EA de la etapa de taladrado cuasi-estacionario con agujero guía, a fin de evitar efectos del filo cincel, y restringir el estudio a la acción de los filos de corte y las esquinas externas.
 - Se evaluó la efectividad del parámetro “potencia MARSE media” (PM) de la EA, definido en esta tesis como el cociente entre la “energía MARSE” y la duración del golpe de EA. De esta manera, se introduce un parámetro que posea significado tanto para las señales de EA continuas como para las transitorias.
 - La medición del torque se realizó con el fin de obtener un indicador alternativo del estado del proceso de corte y de la herramienta, analizándose la relación de este parámetro mecánico con algunos parámetros característicos de las señales de EA.

De los resultados obtenidos

- *De los promedios de los parámetros característicos de la EA*
 - El promedio de la amplitud máxima de la EA mostró un crecimiento en función del desgaste de los filos de corte. Para el caso de las esquinas externas gastadas (caso EGM) el promedio de la amplitud máxima de las señales de EA disminuyó respecto del caso de mayor desgaste de los filos.
 - El promedio de la “potencia MARSE media” (PM) exhibió tres comportamientos en función del estado de la mecha. Para la mecha nueva presentó un valor muy bajo. Para los casos con poco daño o desgaste no se observaron diferencias significativas y para los cuatro casos de mayor deterioro se observó un comportamiento monótono creciente.
 - Para el caso EGM (daño en las esquinas externas) el promedio de la PM muestra un valor mayor que para la mecha con FCM que corresponde al caso estudiado con mayor daño en sus filos.
 - En las condiciones de ensayo, el promedio de la PM de las señales de EA sería un buen indicador del estado de la herramienta a partir de niveles intermedios de desgaste.

- La evolución del promedio del valor RMS de la EA como función del daño en los filos muestra que a bajo y a alto desgaste su comportamiento es semejante al del promedio de la PM. Para el caso EGM no existe tal relación.
- El promedio de la FM de la EA no mostró cualidades para clasificar el desgaste.
- *Del torque*
 - El estudio del valor medio del torque en función del desgaste de la mecha no mostró variación para las cuatro mechas con mínimo desgaste y sí para aquellas con mayor daño en los filos y en la esquina externa.
 - Para las mechas con mayor desgaste sería posible la discriminación del estado de cada condición del filo por medio del análisis del torque.
- *Proporcionalidad entre los promedios del torque y la PM en la etapa cuasi-estacionaria*
 - Para los casos estudiados, se halló una notable semejanza en el comportamiento de los valores medios del torque y de la PM de la señal de EA en función del estado de la mecha. Esta se escribió como una relación lineal entre ambas funciones:
$$PM_A = 0,188 \times PM - 0,22 \frac{\text{cuentasE}}{\text{ms}}$$
- *Correlación entre el torque y los parámetros característicos de la señal para la totalidad del recorrido de la mecha en la pieza.*
 - Del análisis de la correlación lineal entre el torque y los parámetros de EA como funciones del tiempo se concluyó que la MMPM fue el de mayor correlación con el torque.
 - La MM se utilizó como filtro pasa bajos dada la rápida variación de la PM, causada por la naturaleza estocástica de los procesos de EA involucrados en el corte. Se suavizó la función para reducir la dispersión y encontrar variaciones relacionadas con las características mecánicas del proceso, como las detectadas con el torque.
 - Sería posible individualizar con la EA en qué estado se encuentra el proceso de corte. La MMPM muestra una mayor sensibilidad que el torque para tal fin.
 - Otras ventajas a futuro de la EA respecto del uso del torque en el sensado del proceso de corte podrían ser su implementación más sencilla y con un menor costo.
- *VMPM vs. MMPM en función del desgaste (fijando parámetros del corte y características del material).*
 - La variancia móvil y la media móvil de la PM de la EA permiten construir gráficos bidimensionales en los cuales los resultados para cada tipo de desgaste de las mechas se manifiestan como “clústeres” o agrupaciones de puntos en zonas determinadas.
 - Para promedios móviles con pocos vecinos, las nubes de puntos mostraron una gran dispersión en sus resultados, formando manchas dispersas poco definidas.
 - Para mayores tamaños de ventana, los clústeres se concentran y diferencian entre sí, llegando a la separación de los distintos estados de las mechas cuanto mayor es el desgaste.
 - Para mayores tamaños de ventana, la distribución de los resultados para distintos estados de los filos de las mechas describe una forma de arco en la cual la VMPM pudo ajustarse a una función potencial de la MMPM. Siendo $VMPM = A \cdot (MMPM)^{2,8}$ con $A = 0,008$

- Esta representación permite discriminar dos tipos bien definidos de comportamiento, los casos de esquinas externas gastadas y los de filos gastados, encontrándose en regiones claramente separadas.
 - El resultado concreto de esta parte del trabajo es la posibilidad de evaluar el estado de las mechas a partir de los parámetros VMPM y MMPM, verificando en que zona del gráfico bidimensional están ubicados los resultados. Se podría detectar si el deterioro está en el filo o en la esquinas externas de la punta de la mecha, o inferir el grado de desgaste de la mecha a partir de situar las mediciones incógnita respecto de los centros de masa de los clústeres de cada caso preestablecido
 - El método definido puede ser utilizado para su aplicación a procesos repetitivos, por ejemplo cuando se debe fabricar un mismo tipo de pieza, con un mismo material, a condiciones constantes de velocidad, lubricación, diámetro de la mecha, etc.
- *Representación VMP vs. MPM*
- La variancia de la PM (VPM) en función de la media de la PM (MPM) simplifica a un punto los miles de golpes de EA (“hits”) obtenidos para cada ensayo, diluyendo la información de la variabilidad de las señales de EA en la evolución de cada ensayo, que está presente en la representación anterior.
- *Para ambos métodos*
- La MMPM (así como la MPM) está relacionada con la fuerza aplicada en la zona primaria de corte, las áreas de contacto entre herramienta-viruta y herramienta-pieza, y también con la rotura y el impacto de las virutas.
 - El grado de variabilidad de la MMPM (y de la MPM), representado por la VMPM (y la VPM), podría relacionarse con la fractura de la viruta. A mayor rotura de la viruta será mayor dispersión de los resultados. Resultados similares se encuentran en la literatura para estudios con el parámetro RMS
 - Las VMPM y VPM se incrementan con la tasa de rotura de la viruta. La viruta más fragmentada dio lugar a una tasa más alta de golpes de EA, por causa de las fracturas ocurridas. Las señales de fractura se superponen a la señal continua de EA producida por los mecanismos principales de corte, observándose una variabilidad mayor.
 - Fijando determinadas condiciones el aumento de la variabilidad podría ser usado también para evaluar el tipo de viruta producida.
- *Análisis de las formas de onda de las señales de EA*

Para relacionar el comportamiento de las formas de onda de la EA con los distintos estados de las mechas, se seleccionaron aquellas señales que se denominaron “estacionarias”. Luego, de estas, se estudiaron su tasa de emisión y la evolución de su potencia espectral en función de la condición de la herramienta.

Evaluación de la tasa de emisión de señales cuasi-estacionarias (TEE)

- De este análisis se podría inferir un comportamiento de la mecha en el corte. Para las herramientas con los filos en buen estado la TEE dio un número alto, mientras que para los casos de mechas con filos dañados fue menor o mucho menor.
- Se verificó una correlación entre el tipo de viruta y la TEE. Filos con menor daño cortaron viruta continua y regular, mientras que el aumento del daño en los filos coincidió con una viruta cada vez más fragmentada y con el aumento de la EA de tipo explosión.
- La justificación de la relación entre el tipo de viruta y la baja TEE es que la fractura de la viruta es una importante fuente de ondas tipo estallido (“burst”).

Respecto de la PEP

- Para la potencia espectral (PEP) de la EA se definieron tres bandas, de frecuencias B1, B2 y B3, y se relacionó su evolución con respecto al grado de desgaste de la herramienta.
 - Para la mecha FN1 el valor de la PEP_M es bajo y las tres bandas están superpuestas dentro del intervalo de incertidumbre de los errores. Lo mismo ocurre para la mecha con deficiencias de terminación, alcanzando una PEP_M levemente mayor.
 - Para la mecha FCE el valor de la PEP_M para la banda B2 comienza a separarse de la B1, tomando un valor mayor, lo que llevaría a suponer que los mecanismos de emisión en esa banda comienzan a ser más relevantes.
 - El aumento de la B2 se va haciendo más notorio al aumentar la severidad del desgaste de los filos. En los casos FE2 y FCM, empieza a notarse también un aumento en la B3 que indicaría que se estarían activando mecanismos de emisión correspondientes a estas frecuencias mayores.
 - El caso de la EGM (esquinas externas gastadas mecánicamente) es tratado como un problema diferente en el cual la PEP_M aumenta notablemente. También predominan las bandas B2 y B3, activándose los mecanismos de la EA de frecuencias mayores, posiblemente como consecuencia de la fricción.
 - Los resultados obtenidos de la variación de la PEP con el desgaste de la herramienta en el taladrado de piezas metálicas están en concordancia con resultados de procesos de torneado realizados por otros autores y también en el Capítulo 4 de esta tesis.
 - Las distintas bandas de frecuencia de la EA se activan por distintos mecanismos. La B1 estaría relacionada con la energía liberada en el arranque del material durante el corte, como la deformación plástica del material que sale como viruta. Las B2 y B3 se relacionarían con la fricción, aumentando en general con el desgaste tanto de los filos de corte como de las esquinas externas de la punta de la mecha.
 - El efecto observado con el aumento del desgaste de la mecha es el incremento de la media de la potencia espectral promedio de la EA principalmente en la banda B2 y en menor grado en la B3.
 - Este método de análisis se podría aplicar a casos reales de manera similar a la realizada en el presente trabajo, mientras se pueda evaluar un conjunto grande de señales medidas. Esto es técnicamente posible ya que en 10 segundos de trabajo de corte estacionario de la mecha podrían tomarse por ejemplo 1000 señales de EA.
 - Al seleccionarse las señales estacionarias de la cantidad total, podría estimarse la proporción de señales tipo burst para poder estudiar otros efectos del corte como la rotura de la viruta.
 - Un paso siguiente que mejoraría la precisión del sistema sería la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial como por ejemplo redes neuronales.
 - Respecto del análisis en el espectro de frecuencia se podría haber aplicado una herramienta más poderosa que son las onditas (“wavelets”) pero se estimó que no era necesario por tratarse de señales cuyo requisito era que fueran cuasi-estacionarias, por lo que fue aceptable la aplicación del análisis por FFT.
- *De la discusión adicional sobre la PM de la EA durante el corte*
- A partir de los resultados obtenidos en el cálculo de la PM con los parámetros, involucrando a todas las señales de EA adquiridas y sus mecanismos de emisión, y del cálculo de la PEP calculada con las señales cuasi-estacionarias (relacionada con la EA de la fricción más la deformación plástica de la viruta), se podría inferir la proporción de la PM de la EA emitida por la rotura de la viruta.

6.5 Bibliografía del Capítulo 6

- Agietron, AB-GT RCL 1.5 KS 500 Manual de usuario (1968)
- Byrne G., Dornfeld D., Inasaki I., Kettler G., Koenig W., Teti R., "Tool Condition Monitoring (TCM). The Status of Research and Industrial Application" *Annals of CIRP*, 44, 541-567 (1995)
- Cacace V. I., N. Montalbetti, C. Kusnier, M. P. Gomez and J. Fischbarg, "Wavelet analysis of corneal endothelial electrical potential difference reveals cyclic operation of the secretory mechanism", *Physical Review E*, 84, 032902 (2011)
- Carpenter S. H., C.R. Heiple, D.L. Armentrout, F.M. Kustas and J.S. Schwartzberg, "Acoustic Emission Produced by Sliding Friction and Its Relationship to AE from Machining," *Journal of Acoustic Emission*, 10, 97-101 (1992)
- Casey M. and J. Wilks, "Some experiments to study turning tools using the scanning electron microscope", *Int. J. Mach. Tool Des.*, 16, 13-22 (1976)
- Chen Y. and Y. Liao, "Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 269-273 (2003)
- Chungchoo C. and D. Saini, "The total energy and the total entropy of force signals - new parameters for monitoring oblique turning operations", *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40, 1879-1897 (2000)
- Diei E.N. and D.A. Dornfeld, "Acoustic Emission From the Face Milling Process - the Effects of Process Variables", *ASME Trans., J. Eng. Ind.*, 109, 92-99 (1987)
- Dornfeld D., "Material Dependency of chip form detection using acoustic emission" in *Non Destructive Testing Handbook, Acoustic Emission Testing*, Ed. P. Mac Intire, ASNT, 5, 479-484 (1987)
- Dornfeld D., "Monitoring of the machining process by means of acoustic emission sensors", *Acoustic emission " Acoustic Emission: Current Practice and Future directions"*, ASTM STP, 1077, 328-344 (1991)
- Dornfeld D. "Application of acoustic emission techniques in manufacturing", *NDT & International*, 25, 259-269 (1992)
- Dornfeld D. and E. Kannatey Asibu, "Acoustic emission during orthogonal metal cutting", *Int. J. Mech. Sci.*, 22, 285-296 (1980)
- Du R., D. Yan and M.A. Elbestawi, "Time-frequency distribution of acoustic emission signals for tool wear detection in turning", *Proceedings of the Fourth World Meeting on Acoustic Emission*, Boston, MA, 269-285 (1991)
- Elhachimi M., S. Torbaty and P. Joyot, "Mechanical modeling of high speed drilling. 1: predicting torque and thrust", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 553-568 (1999a)
- Elhachimi M., S. Torbaty and P. Joyot, "Mechanical modeling of high speed drilling. 2: predicted and experimental results", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 569-581 (1999b)
- Franks L.E., "Teoría de la señal", Reverte, Barcelona, cap.7, 218-220, (1975)
- Gómez M.P., C.E. D'Attellis y J.E. Ruzzante, "Estimación del Estado de la herramienta en taladrado mediante el análisis de la emisión acústica", *Actas del 5to. Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica*, E-GLEA 5, 7-16 (2007a)
- Gómez M.P., R. Piotrkowski, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Estimation of the Tool Condition by Applying the Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals", *Rev. of Prog. in QNDE*, 894, 635-641 (2007b)
- Gómez M.P., J. Migliori, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Acoustic emission measurements for tool wear evaluation in Drilling", *Rev of Prog in QNDE*, 1096, 1474-1480 (2009)
- Gómez M.P., A.M. Hey, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission", *Physics Procedia*, 3, 819-825 (2010)

- Gómez M.P., A.M. Hey, J.E. Ruzzante and C.E. D'Attellis, "Determinación del estado de herramientas de corte por emisión acústica", Actas del 11º Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales SAM/CONAMET 2011 aceptado para su edición (2011)
- Gong Y., C. Lin and K. Ehmann, "Dynamics of Initial Penetration in Drilling: Part 1- Mechanistic Model for Dynamic Forces", *Transactions of the ASME*, 127, 280-288 (2005)
- Gonzalez de la Rosa J., A. Gallego, R. Piotrkowski, E. Castro and A. Moreno-Muñoz, "Termites detection via spectral kurtosis and wavelet de-noising of acoustic emission signals", *J. Acoustic Emission*, 26, 142-151 (2008)
- Grabec I. and P. Leskovar, "Acoustic emission of a cutting process", *Ultrasonics*, 17-20 (1977)
- Heiple C., S. Carpenter, D. Armentrout and A. Mc Manigle, "Acoustic emission from single point machining: source mechanisms and signal changes with tool wear", *Mat. Eval.*, 590-596 (1994)
- Inasaki I., "Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes", *Ultrasonics*, 36, 273-281 (1998)
- IRAM, NM302:2005 Norma MERCOSUR, "Ensayo por emisión acústica (EA) - Terminología" (2005)
- Iturraspe A., D. Dornfeld, V. Atxa and J. Abete, "Bicepstrum based blind identification of the acoustic emission signal in precision turning", *Mech. Sys. and Signal Processing*, 19, 447-466 (2005)
- Iwata K. and T. Moriwaki, "An Application of Acoustic Emission Measurement to In- Process Sensing of Tool Wear", *Annals of CIRP*, 25, 21-26 (1977)
- Jantunen E., "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 42, 997-1010 (2002)
- Jenkins M.J and D.G. Watts, "Spectral Analysis and its Applications", San Francisco, Holden Day (1968)
- Kannatey Asibu E. and D. Dornfeld, "A study of tool wear using statistical analysis of metal cutting acoustic emission", *Wear*, 76, 247-261 (1982)
- Ke K., J. Ni. and D. Stephenson, "Continuous chip formation in drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1652-1658 (2005)
- Ke K., J. Ni. and D. Stephenson, "Chip thickening in deep hole drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1500-1507 (2006)
- Li X., "A brief review: acoustic emission for tool wear monitoring during turning", *Intl. J. of Mach. Tools and Manufacture*, 42, 157-165 (2002)
- Li X. and S. Tso, "Drill wear monitoring with current signal", *Wear*, 231, 172-178 (1999)
- Li X. and Y. Zhejun, "Tool wear monitoring with wavelet packet transform-fuzzy clustering method", *Wear*, 219, 145-154 (1998)
- Liang S. and D. Dornfeld, "Tool wear detection using time series analysis of acoustic emission", *J. Eng. Ind. Trans. ASME*, 111, 100-205 (1989)
- Lin S. and C. Ting, "Drill wear monitoring using neural networks", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 36, 465-475 (1996)
- Maradei C., R. Piotrkowski, E. Serrano and J.E. Ruzzante, "Monitoring of the tool condition with acoustic emission signal analysis using wavelets packets", *Insight*, 44, 786 (2002).
- Marinescu I., D. Axinte, "A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 1148-1160 (2008)
- Moriwaki T., "Detection for cutting tool fracture by acoustic emission measurement", *Annals of CIRP*, 29, 35-40 (1980)
- Ono K., "The origin of continuous emission", *J. Acoust. Emission*, 23, 206-214 (2005)
- PAC, "PCI-2 Based AE system User Manual Rev. 2", Physical Acoustic Corporation, Princeton, NJ (2004)
- Ravindra H. V., Y. G. Srinivasa and R. Krishnamurthy, "Acoustic emission for tool condition

- monitoring in metal cutting”, *Wear*, 212, 78-84 (1997)
- Stephens R.W. and A.A. Pollock, “Waveforms and Frequency Spectra of Acoustic Emission”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 50, 904-910 (1971)
- Subramanian K., and N.H. Cook, “Sensing of drill wear and prediction of drill life” ASME, *Journal of Engineering for Industry*, 103, 295-301 (1977)
- Suzuki H., T. Kinjo, Y. Hayashi, M. Takemoto, and K. Ono, “Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals”, *J. of Acoustic Emission*, 14, 69-84 (1996)
- Teti R., K. Jemielniak, G. O'Donnell and D. Dornfeld, “Advanced monitoring of machining operations”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59, 717-739 (2010)
- Watson A.R., “Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. I. initial cutting lip model”, *J. Mach. Tool Des. Res.*, 25, 347-365 (1985a)
- Watson A.R., “Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. II. Revising cutting lip model”, *J. Mach. Tool Des. Res.*, 25, 367-376 (1985b)
- Watson A.R., “Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. III. drilling model for chisel edge”, *J. Mach. Tool Des. Res.*, 25, 377-392 (1985c)
- Watson A.R., “Drilling model for cutting lip and chisel edge and comparison of experimental and predicted results. IV. Drilling test to determine chisel edge contribution to torque and thrust”, *J. Mach. Tool Des. Res.*, 25, 393-404 (1985d)
- Yang J., V. Jaganathan and R. Du, “A new dynamic model for drilling and reaming processes”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 299-311 (2002)
- Zhang L.B., L.J. Wang, X.Y. Liu, H.W. Zhao, X. Wang and H.Y. Luo, “Mechanical model for predicting thrust and torque in vibration drilling fiber-reinforced composite materials”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 641-657 (2001)
- Zhu K.P., S. Wong and G. Hong, “Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 537-553 (2009)

Apéndice 6.1 Ejemplo de Imágenes con MEB del fondo de un agujero

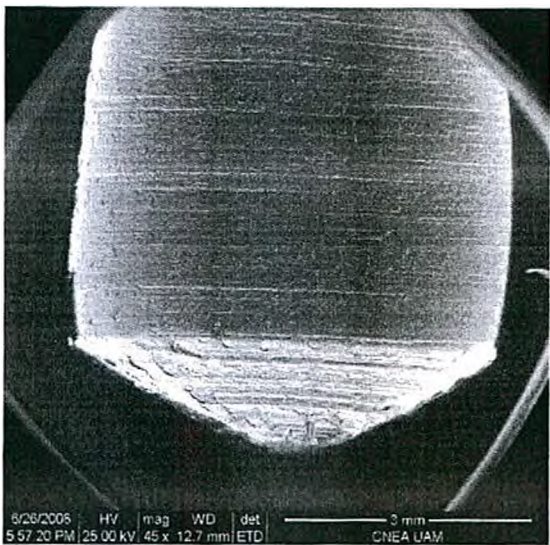


Fig. 6.34. Imagen MEB del corte del fondo del agujero (Escala 3 mm)

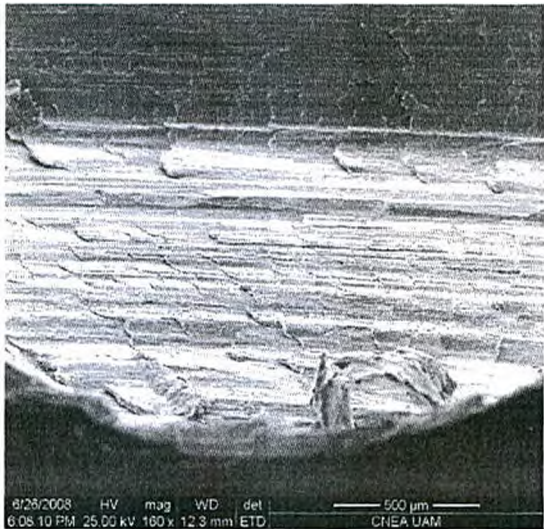


Fig. 6.35. Imagen MEB del corte del fondo del agujero (Escala 500μm)



Fig. 6.36. Imagen MEB del corte del fondo del agujero (Escala 50μm)