

PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL

—
UNA GUÍA
PARA LA MEJORA
DE PROCESOS EN LAS
PROVINCIAS DE MENOR
DESARROLLO EN LA
REPÚBLICA ARGENTINA

Fundamentos de la
Tecnología de Mecanizado

CUADERNO TECNOLÓGICO N°8b

Autor: **Prof. Dr. Ing. Luis
Norberto López de Lacalle**

Universidad del País Vasco, ETSI de Bilbao

Con la colaboración de:
Prof. Ing. Daniel Martínez Krahmer
INTI-Mecánica, Buenos Aires, Argentina

Julio de 2014



Unión Europea

PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL



Unión Europea

Delegación de la Comisión Europea en Argentina
Ayacucho 1537
Ciudad de Buenos Aires
Teléfono (54-11) 4805-3759
Fax (54-11) 4801-1594



INTI



Instituto Nacional de Tecnología Industrial
Gerencia de Cooperación Económica e Institucional
Avenida General Paz 5445 - Edificio 2 oficina 212
Teléfono (54 11) 4724 6253 | 6490
Fax (54 11) 4752 5919

www.ue-inti.gob.ar

CONTACTO

Información y Visibilidad: Lic. Gabriela Sánchez
gabriela@inti.gob.ar

UNA GUÍA
PARA LA MEJORA
DE PROCESOS EN LAS
PROVINCIAS DE MENOR
DESARROLLO EN LA
REPÚBLICA ARGENTINA

Fundamentos de la
Tecnología de Mecanizado

CUADERNO TECNOLÓGICO N°8b

Autor: **Prof. Dr. Ing. Luis
Norberto López de Lacalle**

Universidad del País Vasco, ETSI de Bilbao

Con la colaboración de:

Prof. Ing. Daniel Martínez Kraher

INTI-Mecánica, Buenos Aires, Argentina

Julio de 2014



INTI



Unión Europea

Esta es la segunda parte del informe titulado “Una guía para la mejora de procesos en las provincias de menor desarrollo en la República Argentina”. En la primera se abordó el análisis de la situación de las regiones del NOA y NEA, así como se ofrecieron algunas ideas sobre la evolución tecnológica en varios sectores clientes del mundo del mecanizado.

En esta segunda parte se hace referencia a la tecnología de mecanizado, en aquellos aspectos de especial relevancia para la posible innovación tecnológica de estas regiones. Y también donde el INTI puede tener un papel de apoyo al desarrollo de las empresas PYMES del sector de mecanizado.

INDICE

PARTE B: FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DE MECANIZADO

1. HERRAMIENTAS DE CORTE	6
1.1 Aceros rápidos	8
1.2 Metal duro.....	8
1.3 Cerámicas.....	13
1.4 Materiales sintéticos de alta dureza.....	14
1.5 Recubrimientos	16
1.6 Degradación de las herramientas. Desgaste	19
1.6.1 Desgaste de la superficie de desprendimiento	
1.6.2 Desgaste de la superficie de incidencia	
1.6.3 Criterios de duración de una herramienta en torneado	
1.6.4 Desgaste en fresas frontales	
1.6.5 Criterios de duración de una herramienta en fresado	
1.6.6 Duración o vida de la herramienta	
1.6.7 Representación y evolución del desgaste	
1.7 Refrigerantes en el mecanizado, tendencias actuales.....	28
1.7.1 Mecanizado en seco (Dry machining)	
1.7.2 Mínima cantidad de lubricante (MQL) o micropulverización	
2. CONCEPTO DE MECANIZADO DE ALTO RENDIMIENTO Y MECANIZADO A ALTA VELOCIDAD.....	34
2.1 Mecanizado de alta tasa de arranque.....	34
2.2 Mecanizado de alto rendimiento, sentido actual.....	34
2.3 Mecanizado a alta velocidad	35
2.4 Corte de alto rendimiento	36
3. MÁQUINAS DE MAYORES PRESTACIONES	38
3.1. Soluciones del cabezal	38
3.2 Máquinas por sectores	40
3.2.1 Máquina para piezas de fuselaje	
3.2.2 Máquinas para troqueles	
3.2.3 Máquina para automoción	
3.2.4 Máquina para molde y matriz de forja	
3.2.5 Sistemas auxiliares que multiplican la capacidad de las fresadoras	
3.3 Fresado en 5 ejes	51
3.3.1 Fresado de piezas integrales para rotores	
3.3.2 Engranajes especiales fresados en cinco ejes	

3.4 Máquina multitarea	59
3.4.1 Tipos de máquinas multitarea	
3.5 Mecanizado de grandes piezas	63
4. SOFTWARE DE APOYO AL PROCESO DE MECANIZADO.....	68
5. INTEGRACIÓN DE OTROS PROCESOS EN MAQUINA	70
5.1 Metrología In-Process	70
5.2 Láser	72
5.3 Bruñido.....	72
5.4 Taladrado por fricción	76
6. OTROS PROCESOS DE INTERÉS Y APLICACIONES	80
6.1 El torneado duro.....	80
6.2 Superacabado por pulido.....	81
6.3 Mecanizado del grafito	83
7. CONCLUSIONES.....	85

ABREVIATURAS Y SIGLAS UTILIZADAS

MiPyMEs	Micro, Pequeñas y Medianas Empresas
NOA	Región del Noroeste de Argentina
NEA	Región del Noreste de Argentina
INTI	Instituto Nacional de Tecnología Industrial
PTM	Parque Tecnológico Miguelete
PyMEs	Pequeñas y Medianas Empresas
UE	Unión Europea
DAFO	Análisis de Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades
HSM	High Speed Machining, fresado a alta velocidad
HPC	High performance Cutting, literalmente corte de alto rendimiento,
EBM	Environmentally Benign Manufacturing, fabricación de reducido impacto ambiental.
MQL	Mínima cantidad de lubricante
UPV/EHU	Universidad del País Vasco

1. HERRAMIENTAS DE CORTE

Las herramientas de corte están sometidas simultáneamente a grandes cargas mecánicas y elevadas temperaturas, a menudo por encima de los 700°C e incluso a más en el mecanizado de materiales de alta dureza o ductilidad. Además, las condiciones de fricción entre la herramienta y la viruta por una parte, y entre la herramienta y la superficie recién generada por otra, son muy severas. Con estos datos en mente, los principales aspectos a tener en cuenta para un correcto diseño y fabricación de las herramientas de corte son conseguir de forma simultánea:

- Alta estabilidad física y química a elevada temperatura. Es de particular importancia el mantenimiento de la dureza del material de la herramienta a alta temperatura, dado que el calor generado en el proceso de mecanizado es el principal factor acelerador de la degradación de las herramientas de corte.
- Alta resistencia al desgaste, tanto de tipo abrasivo como de naturaleza adhesiva. Este aspecto se mide de forma general por la dureza, que se suele definir como la resistencia de un cuerpo a ser rayado por otro, pero también depende de factores relativos a la reactividad metalúrgica de los materiales.
- Alta resistencia a la fractura frágil, requiriendo una elevada tenacidad. Esta propiedad suele ser antitética de la dureza, ya que un material muy duro suele como contrapartida ser frágil.

Así, los principales tipos de materiales para herramientas son los siguientes, ordenados de menor a mayor resistencia y dureza:

- Aceros rápidos (aceros con contenido en aleación elevado), denominados habitualmente por las siglas en inglés, HSS (*High Speed Steels*).
- El metal duro, que es un compuesto de granos de carburo de wolframio (CW) sinterizado con cobalto (en un 6-12%). También es denominado carburo cementado. Las herramientas de metal duro ofrecen la posibilidad de estar dotados con un recubrimiento superficial. En el lenguaje común al metal duro también se le conoce como "Widia", por ser esta la marca de una de las empresas que los desarrolló en el pasado.
- Materiales cerámicos, basados en la alúmina (Al_2O_3) o nitruro de silicio (Si_3N_4).
- Diamante policristalino (PCD) y nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN), fabricados por sinterizado, ambos de muy elevada dureza. Es común referirse a ellos como materiales "extraduros".

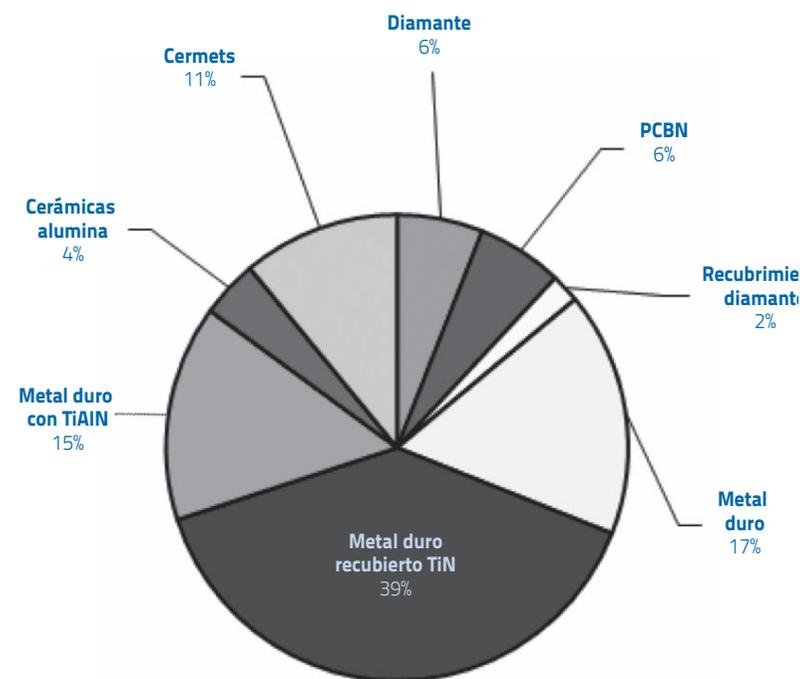


Figura 1: Uso de herramientas en el ámbito internacional (excluido el acero HSS)

En el diagrama anterior (Fig.1) se observa la importancia relativa de los grupos de materiales de herramientas, excluyendo las de acero rápido. Como se observa, casi el 75% del mercado es metal duro sin y con recubrimiento.

En el campo de los materiales para herramientas y de las propias herramientas, se distinguen dos tipos de empresas implicadas. Aquellas que producen el material base, generalmente especialistas en materiales con dimensión internacional, como pueden ser Thyssen, Mitsubishi, CeraTizit, Krupp, Sumitomo, General Electric, De Beers, Sandvik, Kennametal y otras más, y las que partiendo de una barra calibrada de metal duro producen por rectificado la herramienta rotativa (fresas, herramienta especial o mechas), y dan su marca al producto final. Estas últimas empresas pueden ser pequeñas y especializadas en un sector concreto, como pueden ser el caso de Ezeta y Sin Par en Argentina.

Pero en el mercado mundial, predominan las grandes empresas, que fabrican simultáneamente el material y la propia herramienta. En el caso particular de los insertos, el mercado está dominado por multinacionales dado que se producen por miles de unidades. Por tanto el sector de las herramientas cuenta con empresas de distinto tamaño y tipo de negocio, con dinámicas de mercado distintas.

1.1 ACEROS RÁPIDOS

Estos aceros aparecieron a comienzos del siglo XX. Son aceros de alto contenido en carbono con adiciones considerables de elementos de aleación tales como W, Mo, Cr, V y Co. Poseen durezas cercanas a los 75 HRC.

Algunos aceros rápidos están basados en el uso del Wolframio (denominado tungsteno por los anglosajones), como son los de la serie T, mientras que otros están basados en el uso del Molibdeno, aquellos de la serie M. El vanadio forma el más duro de los carburos en los aceros rápidos, siendo usado como aditivo en los aceros 'super' rápidos. La máxima temperatura de trabajo es en torno a los 500°C.

Hoy día existen herramientas de acero rápido recubiertas con una fina capa de nitruro de titanio (TiN) o nitruro de titanio-aluminio (TiAlN), o de algún derivado de los mismos. Estos recubrimientos les otorgan mayor resistencia mecánica y térmica.

Los aceros rápidos son la opción más económica para mecanizar. Sin embargo, la necesidad de mayor rendimiento en el mecanizado ha provocado que, incluso en el mecanizado de aluminio o aleaciones ligeras, se pase a emplear las herramientas de metal duro. El nicho donde sigue dominando es el de los machos de corte, dado que si estos se rompen dentro del agujero deben sacarse (destruirse dentro del agujero) con brocas de metal duro. El acero rápido también se emplea para fabricar herramientas de forma compleja, como pueden ser los creadores de engranajes y las brochas.

Actualmente existen aceros rápidos obtenidos por pulvimetalurgia, que mejoran ligeramente las propiedades de los clásicos obtenidos por fusión y enfriamiento. Pero incluso con esta mejora, no han conseguido evitar la extensión y generalización del uso del metal duro.

1.2 METAL DURO

Las herramientas de metal duro también se llaman de carburo cementado, y se obtienen mezclando carburo de tungsteno y cobalto, ambos en polvo, a temperaturas elevadas, habitualmente en la proporción de 88%-94% y 12%-6% en peso respectivamente. El metal duro presenta una alta dureza y soporta temperaturas de hasta 900°C. Un nombre clásico ha sido Widia, dado que la empresa alemana Krupp, creadora del mismo, le dio este nombre comercial. Mientras que en la industria europea este nombre está en desuso, y se lo designa como metal duro (a pesar que no es un metal, sino un composite), en Argentina se lo sigue denominando muy habitualmente Widia.

En la descripción del metal duro se debe distinguir dos aspectos principales:

- La cantidad de cobalto del conglomerante (6% -12%), que está relacionado con la dureza de la herramienta. Más cobalto suele implicar más tenacidad y menos dureza. Además posee importancia a la hora de recubrirlas, dado que este sustrato puede reaccionar con el recubrimiento durante su deposición, aumentando su adherencia sobre el metal duro.
- El tamaño del grano. Micrograno son aquellos menores a 1µm, y submicrograno

los menores a 0.5µm. Cuanto más pequeño es el grano, el material es más duro y también más tenaz.

La escala habitual en metales duros es la derivada de la norma ISO 513:2012, que los divide en seis grupos utilizando las letras P, M, K, N, S, H. En ISO las calidades del metal duro se refieren a los materiales que pueden mecanizar, pero no indican su composición o que tamaño de grano poseen, sino solamente su posible aplicación (de hecho la clasificación también hace referencia al material de la pieza). De esta forma:

- El metal duro apropiado para mecanizar aceros de baja y media aleación, se incluye en el grupo P, azul.
- El adecuado para el mecanizado de fundiciones, en el grupo K, también identificado por el color rojo. Sería el término medio de la tabla ISO en cuanto a dureza y tenacidad, por lo que puede ser empleado en otros muchos casos.
- El grupo M amarillo, para algunos materiales como son los aceros inoxidables austeníticos, y especialmente en torneado.
- El color verde y la N se refieren a calidades de metal duro para mecanizar aluminio.
- El naranja y la letra S se ha dedicado al grupo de aleaciones de titanio y las superaleaciones termorresistentes de níquel o cobalto.
- Finalmente la H de color gris, que se refiere a calidades de metal duro destinadas al mecanizado de aceros templados, de más de 40 HRC.

Una vez definido el grupo, se completa la designación del metal duro con un número de 2 dígitos, que va desde 01 hasta 40 (50 en el grupo P). Esta cifra indica si el metal duro es más o menos duro y por tanto tenaz. Así, números bajos corresponden a durezas elevadas y los altos a elevada tenacidad. En la actualidad la calidad más utilizada es la serie K, siendo los más habituales los K10, K20 y K30.



Figura 2: Grupos de metal duro y de material de pieza (de Sandvik®)

Sin duda la herramienta de metal duro es la más usada en procesos de alto rendimiento, siendo la primera opción a valorar a la hora de diseñar un nuevo proceso de fabricación. Las de acero rápido se consideran una opción ya superada por la tecnología; y la de utilizar otros materiales que más adelante se explican, siempre implica valorar otros considerandos relativos a aspectos tales como la necesidad de fiabilidad/repetibilidad del material de la pieza, control de los sobreesesores del proceso anterior al mecanizado, o si se requieren programas de mecanizado totalmente probados.

Las herramientas de metal duro se pueden fabricar en dos formas (ver Fig. 3):

- Herramientas enterizas o integrales: Se parte de una barra de metal duro y se rectifica en máquinas especiales, hasta que se tallan los filos de corte. Así se fabrican herramientas rotativas. Son las que se suelen emplear en fresado de acabado. La gran ventaja que ofrecen es que al ser de una sola pieza están muy bien equilibradas y pueden girar a alta velocidad. Como desventaja indicar que son muy caras ya que el metal duro constitutivo lo es. Cuando se desgastan pueden reafilarse.
- Plaquetas o insertos: Se fabrican los filos de corte en forma de pastillas (también llamados insertos), que pueden ser soldadas o fijadas por sujeción mecánica a un soporte o vástago. Las plaquetas son desechadas una vez que todos sus filos se han desgastado, y muchas veces pueden aprovecharse varios filos de corte en cada placa con tal de girarla y recolocarla en los portaherramientas, así se suele hablar de "tantos cortes por plaqueta". Las herramientas de torneado son mayoritariamente de este tipo, y hay muchas también en fresado y taladrado cuando el diámetro de la herramienta es superior a 12-16 mm y el metal duro integral sería muy caro.

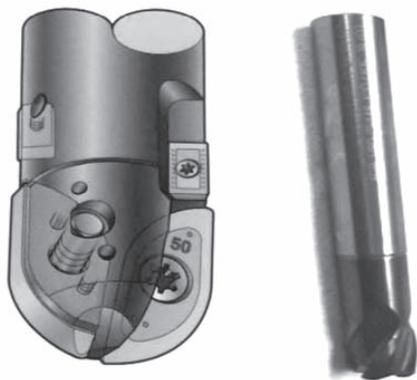


Figura 3: a) Herramienta de plaquetas, fresa de tipo esférico. b) Fresa integral con radio de punta, denominada tórica (derecha)

Una variante derivada del metal duro son los CERMETS. Los cermets actuales, conocidos como de 3ª generación, incorporan además de WC, otras fases duras como son el carburo de titanio TiC (dureza 3200Hv) y el carbonitruro de titanio TiCN, a un sustrato de

Ni y Co (ver Fig. 4 derecha). Los más modernos, aleados con TaNbC y MoC, incrementan su resistencia ante el choque cíclico propio del fresado. Su empleo está muy extendido en Japón, aunque en Europa y Estados Unidos sus posibilidades se encuentran menos explotadas. La pregunta que puede suscitarse es porqué el sinterizado con WC, carburo de wolframio, es metal y el sinterizado que incluye TiC, carburo de titanio, es denominado cerámico. De su mezcla surgió el nombre de este material, CERámicoMETálico. Pues la respuesta es que los dos carburos son de naturaleza cerámica; el WC sinterizado con cobalto es gris, conductor y muy duro, de ahí que se le llame por analogía y aspecto "metal duro". El nombre CERMET surge de otro origen, pero se llega a casi al mismo producto.

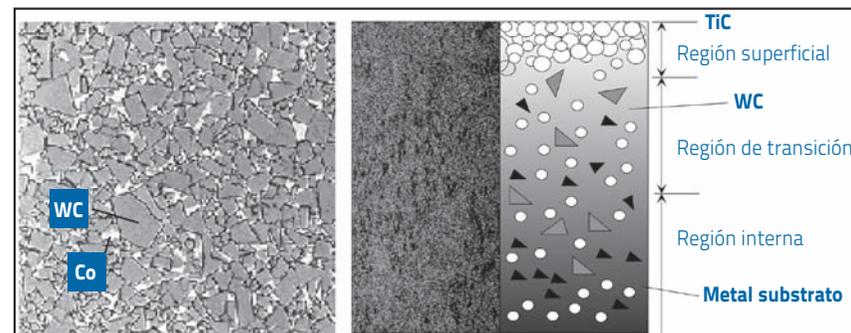


Figura 4: Microfotografía de un metal duro. Microfotografía y esquema de la composición gradual de los cermets de 3ª generación (derecha)

En los catálogos de herramientas se reflejan adecuadamente los grupos de materiales según los tipos P, M, K, N, H, S, por lo que se aconseja al lector acudir a los catálogos o a la Norma ISO-513:2012 (Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges -- Designation of the main groups and groups of application). En general todos los fabricantes utilizan ya la Norma ISO.

Se debe tener en cuenta que las propiedades del material sinterizado (metal duro), son distintas a las de sus componentes (Co y WC), de la misma forma que las del hormigón lo son respecto a los áridos y el cemento que lo constituyen. Este error es habitual en los jóvenes técnicos cuando leen que el metal duro a veces se indica solamente como (WC). Generalmente la degradación de este material surge de un ataque durante el proceso de mecanizado al sustrato de cobalto, es decir a la cohesión del sinterizado, pero rara vez afecta al estable WC.

En la Fig. 5 se muestra la tabla de metal duro de la serie K, a modo de ejemplo.

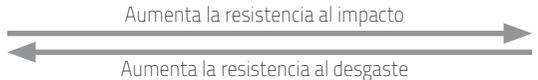
SÍMBOLO	GRUPOS DE MATERIALES QUE PUEDEN SER MECANIZADOS	DESIGNACIÓN	MATERIAL MECANIZADO	MÉTODOS DE MECANIZADO	PARAM. CORTE	CARACT. METAL DURO
					Aumenta el avance Aumenta la velocidad de corte	
K	Materiales Férricos de viruta corta.	K01	Fundición gris de alta dureza. Aleaciones de Al con alto contenido en Si. Acero endurecido, plásticos abrasivos.	Torneado, torneado acabado, fresado.		
		K10	Fundición Gris más de 220 HBN. Fundición dúctil con viruta corta. Acero endurecido. Aleaciones Al-Si. Aleaciones de cobre. Plástico, vidrio, porcelana, ...	Torneado, fresado, taladrado, escariado.		
	K20	Fundición Gris más de 220 HBN. Metales no-férricos: cobre, bronce, aluminio.	Torneado, fresado, planeado.			
	K30	Fundición gris de baja dureza. Acero dulce. Madera compacta.	Torneado, fresado, planeado, ranurado, todos en condiciones de trabajo desfavorables.			
	K40	Madera. Metales no-férricos.	Torneado, fresado, planeado, ranurado, todos en condiciones de trabajo desfavorables.			

Figura 5: Clasificación ISO, ejemplo del grupo K

1.3 CERÁMICAS

Las cerámicas técnicas son muy duras y resistentes a elevadas temperaturas, pero desgraciadamente muy poco tenaces. Por ello se debe intentar evitar el choque constante de los filos de la herramienta con la pieza, de lo que se deduce que para procesos de torneado (*corte continuo*) resultarán mejores que para el fresado (*corte intermitente*), dado que en este, los golpes originados en los dientes cuando estos entran y salen de la pieza son peligrosos para este material de corte.

Es común en varios campos de la ingeniería la paradoja de que un material de alta dureza no sea tenaz, y el tenaz sea en cambio poco resistente y blando. Por este motivo el mundo del arranque de viruta es un compromiso entre ambos, a veces desequilibrado hacia algunos de los extremos por cuestiones específicas del proceso que se trate. Esto es, cuando el riesgo de rotura de una herramienta puede provocar un problema debe primarse la tenacidad frente a dureza.

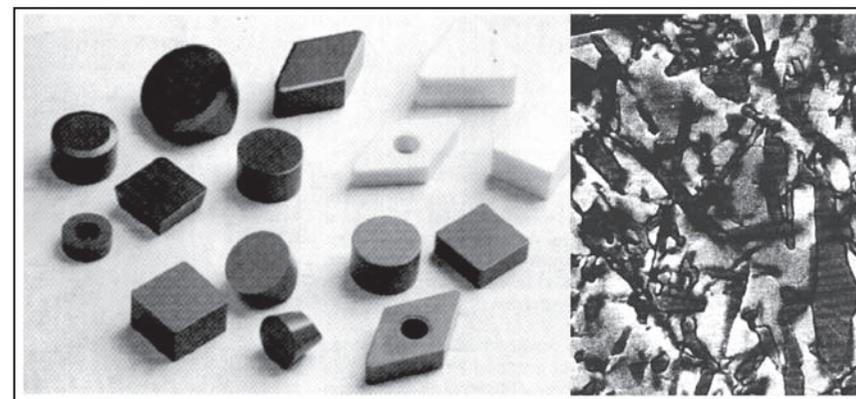


Figura 6: Conjunto de placas cerámicas. Matriz de la cerámica reforzada (derecha).

Se usan tres tipos de herramientas cerámicas: óxido de aluminio (alúmina Al_2O_3), SIALON (combinación de Si, Al, O, y N) y nitruro de silicio (Si_3N_4). Todas ellas se obtienen por sinterizado a alta temperatura.

Dentro de este grupo, forman un tipo importante las cerámicas reforzadas por una matriz amorfa de hilos de carburo de silicio (SiC), $Al_2O_3+SiC_w$, que se denominan reforzadas con *whiskers*, como las mostradas en la Fig. 6. Estos "pelos" o filamentos constituyen entre el 20% a 40% del material, y le aumentan la consistencia y tenacidad de las cerámicas, lo que es un hecho positivo para el fresado.

El uso de cerámicas suele requerir una operativa de mecanizado especial, donde resulta fundamental por un lado, mantener caliente la herramienta cerámica evitando bruscos ciclos de enfriamiento, y por otro, evitar los grandes espesores de viruta y su choque sobre los filos. Por el primer motivo se suelen usar en seco, sin refrigerante.

Una aplicación estrella de las cerámicas es el torneado de los discos de freno de fun-

dición gris, cuya pasada de acabado se realiza en ambas caras en forma simultánea, con una duración menor de 8 segundos, y en ausencia de refrigerante. La producción al año de discos de frenos es de millones de unidades, siendo por tanto un mercado importante de herramientas de insertos cerámicos.

1.4 MATERIALES SINTÉTICOS DE ALTA DUREZA

Existen dos materiales de herramienta también generados por sinterización, uno basado en el nitruro de boro cúbico y el otro en el diamante sintético. Ambos componentes se producen en finos granos, que posteriormente se sinterizan a alta presión, con un conglomerante que puede ser cobalto (matriz metálica) o TiN (matriz cerámica, solo para el caso de CBN), dando lugar al *diamante policristalino* (PCD) y al *nitruro de boro cúbico policristalino* (PCBN) respectivamente. En la Fig. 7 se muestran las microestructuras de dos calidades de Borazon™, de la empresa General Electric. Sobre sus campos de aplicación podemos referir que:

- El PCD se emplea sobre materiales no férreos, como aleaciones de aluminio o cobre. Con aceros y fundiciones se produce un fenómeno complejo de grafitización del diamante, degradando la herramienta en muy poco tiempo.
- EL PCBN se aplica sobre materiales férreos, especialmente en fundiciones y aceros templados.

En ambos casos existe un problema de fragilidad del material, lo que implica que sean muy aptos para el torneado donde el proceso es continuo, pero poco adecuados para el fresado. En ocasiones, su marcada fragilidad impide su uso en aplicaciones donde darían muy buen rendimiento por su gran dureza, como es el caso de los aceros templados de moldes. Sin embargo la existencia de cualquier sobre-espesor podría romper los filos. Esto es, en la medida que no se pueda garantizar una homogeneidad absoluta en el espesor de pasada de la pieza a acabar, el PCBN es un riesgo inasumible.

El PCBN ofrece ventajas para su empleo en herramientas de corte:

- El límite de estabilidad termoquímica del CBN se encuentra en 1200°C, muy por encima de la de otros materiales empleados en herramientas de corte, como el diamante policristalino, en el que se sitúa alrededor de los 700°C.
- Debido a su alta dureza, la vida útil de las herramientas de PCBN es mucho mayor que las dotadas de recubrimientos de TiN, TiAlN, TiCN, etc. Se puede pensar en una relación de 7 a 1, pero también en ese ratio son sus precios.
- Los mejores resultados con PCBN se obtienen en seco, lo que supone la eliminación de los costos de refrigeración, evitando además posibles problemas ambientales.

En este grupo de herramientas, los fabricantes implicados son de dos tipos, los del

material propiamente dicho (PCBN y PCD), que son tres o cuatro a nivel internacional, y los que compran estos materiales y los insertan en sus herramientas, que son muchos más. Así el mango y cuerpo de la herramienta suele ser de metal duro o acero rápido, y los filos de PCBN o PCD, como se muestra en la Fig. 8.

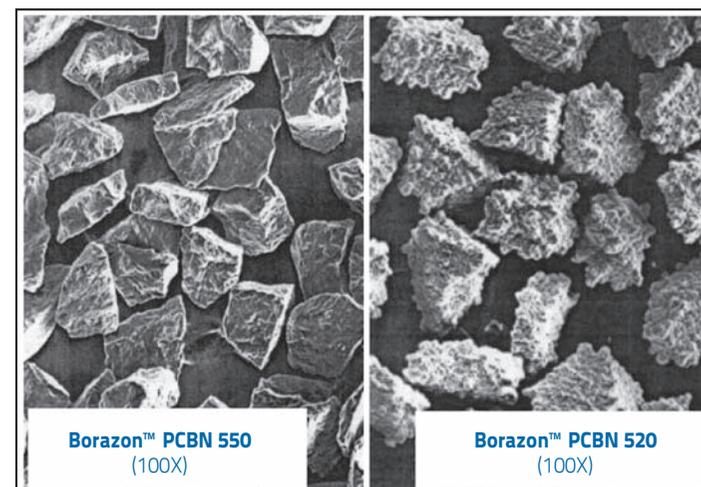


Figura 7: Dos calidades de PCBN, Borazon™ de General Electric.

Los fabricantes del material PCBN y PCD son coincidentes, así entre los principales podemos citar: General Electric Superabrasives (PCBN producto: Borazon , diamante Compax), De Beers Industrial Diamond Division, llamada Six-Elements (PCBN producto: Amborite , diamante Syndite), y Sumitomo Electric (PCBN producto Sumiboron). Dado el alto costo de estos materiales, el PCBN es solamente la punta de corte que se suelda en un inserto de metal duro. Debe recordarse que en el caso de materiales muy duros, debe respetarse en la cadena de sujeción una graduación de durezas. De no ser así surgiría la paradoja del "cristal sobre la cama", esto es, lo muy duro sobre un soporte elástico se rompe y se descascarilla por flexión.

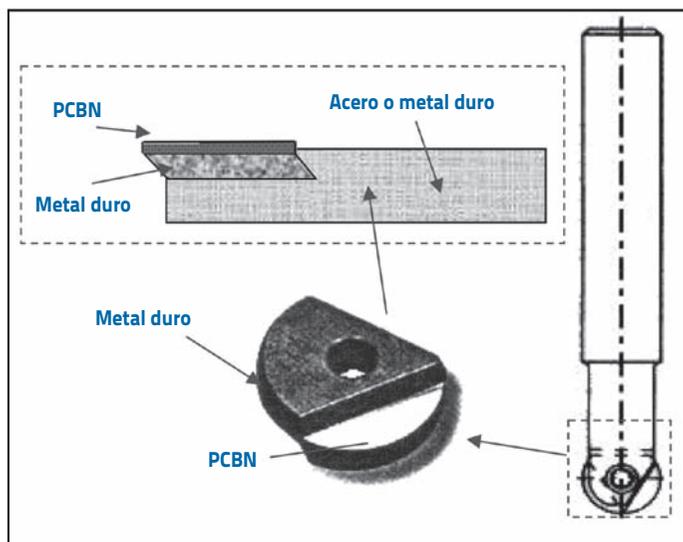


Figura 8: Estructura de una herramienta de PCBN, para una fresa esférica.

Como conclusión podemos decir que, los materiales constitutivos en que se fabrican las herramientas de corte siguen en continua evolución, con avances de la mano del desarrollo de nuevos materiales como los nanosinterizados, y de la aplicación de recubrimientos. Más allá de toda la variedad existente, la herramienta más usual en aplicaciones de alto rendimiento es la de metal duro recubierta de TiAlN o TiN.

Hoy día, las herramientas fabricadas en los materiales anteriores (acero rápido, metal duro, PCBN, y PCD) pueden recubrirse con capas de otros materiales, denominados recubrimientos, para mejorar su resistencia mecánica y térmica. Estos son objeto del apartado siguiente.

1.5 RECUBRIMIENTOS

El recubrimiento es una película de $2\mu\text{m}$ a $15\mu\text{m}$, formada por uno o varios materiales que aportan simultáneamente elevada resistencia a la fricción, un coeficiente de rozamiento reducido, y una barrera térmica efectiva. Sus propiedades deben ser:

- Dureza, para soportar el rozamiento y la abrasión del mecanizado.
- Tenacidad, para que se puedan deformar sin romperse en un impacto, por ejemplo al entrar y salir el diente de la herramienta en la pieza.
- Capacidad de resistir altas temperaturas, que se originan en el mecanizado.
- Estabilidad química, para que no reaccione con el material que se está cortando originándose complejos fenómenos de desgaste.
- Ser competitivo en precio. Suelen ser entre el 5%-10% del costo de la herramienta.

En la tecnología del recubrimiento, dos son los aspectos a tener en cuenta. En primer lugar la forma y tecnología para conseguir el recubrimiento, y en segundo, las propiedades que añade la nueva capa a la herramienta. También es importante que el material que va a ser recubierto (sustrato) posea una superficie adecuada para la deposición; recubrimiento y sustrato deben poseer una adherencia y compatibilidad en su pareja.

Sobre la tecnología de aplicación de los recubrimientos, indicar que es un campo dentro de la ingeniería de materiales y superficies, que hoy posee un gran auge. Las dos principales tecnologías son el CVD (*Chemical Vapour Deposition*) y el PVD (*Physical Vapour Deposition*). No es el objetivo de este texto explicarlas, sin embargo, es interesante saber que la mayor diferencia entre ambos métodos está en la temperatura a la que se debe llegar para recubrir la herramienta. En el caso del CVD es superior a los 600°C , lo que puede tener consecuencias para la integridad del sustrato. En el caso del PVD, la temperatura es inferior, entre 400°C y 500°C .

En la Fig. 9 se observa la estructura del Futura™ de Oerlikon-Balzers, formada por capas de TiN y Al_2O_3 , en un test de Caló (erosión con una bola de la superficie). Este ensayo es junto al test de indentación, el más indicado para estudiar la adhesión de los recubrimientos al sustrato. En el centro, se muestran varias herramientas recubiertas, y a la derecha, la microestructura del Balinit C.

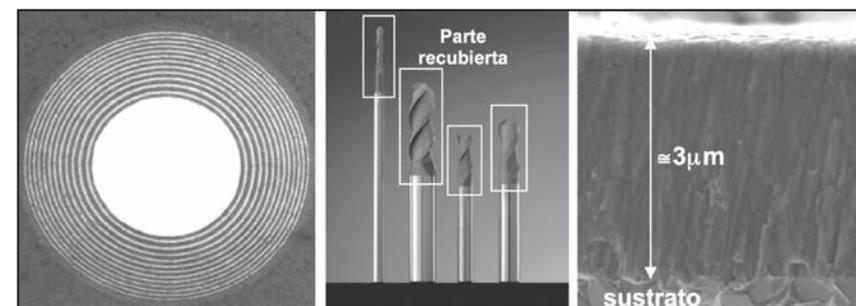


Figura 9: Test de Caló del Futura™, herramientas recubiertas, y micro estructura del recubrimiento monocapa (cortesía de Balzers).

Algunos recubrimientos se componen de varias capas (multicapa), donde cada una de ellas aporta una de las características objetivo. Este es el caso de los recubrimientos antifricción para operaciones casi en seco; así, sobre una capa dura de TiAlN se aplica una de muy bajo coeficiente de fricción, del tipo bisulfuro de molibdeno, o con una cierta proporción de grafito libre.

En la tabla siguiente, se muestra parte de la oferta de Oerlikon-Balzers en relación a los recubrimientos. Los tres marcados en negrita, son los más usuales y extendidos, aunque cada día surgen nuevos tipos.

En los últimos trabajos de investigación llevados a cabo en la UPV/EHU se ha comprobado que la preparación del filo antes de recubrir, aplicando pulido fino, es muy importante para el posterior rendimiento de las herramientas. Así, tanto en machos de roscar como

en brocas, se ha llegado a un valor óptimo para el radio del filo de 22µm previo a efectuar el recubrimiento. Este trabajo se ha desarrollado con la empresa vasca Metal-Estalki, que utiliza máquinas de PVD de Platit. En este proyecto también se ha demostrado que eliminar las gotas desprendidas de los electrodos tras el proceso es importante. Estas gotas, denominadas *droplets*, se eliminan también por micropulido, utilizando polvo de cáscara de nuez y fino abrasivo. La eliminación de los droplets y el microacabado de la superficie de los recubrimientos consiguen aumentar entre un 20% a un 35% la vida de la herramienta.

En consecuencia, el recubrimiento implica tanto, poseer la máquina PVD y/o CVD, como aplicar un proceso de limpieza, preparación y recubrimiento en forma cuidadosa.

Tabla 1: Recubrimientos para herramientas (cortesía de Balzers)

RECUBRIMIENTO	MATERIAL	MICRODUREZA (HV)	COEFICIENTE DE FRICCIÓN CONTRA ACERO	MÁXIMA TEMPERATURA (°C)
BALINIT® A	TiN	2300	0.4	600
BALINIT® B	TiCN	3000	0.4	400
BALINIT® C	WC/C	1000 / 1500	0.1 - 0.2	300
BALINIT® DLC	a-C:H	> 2000	0.1 - 0.2	350
BALINIT® G	TiCN+TiN	3000	0.4	400
BALINIT®				
DIAMOND	polycrystalline diamond	> 8000	0.15 - 0.20	600
BALINIT® FUTURA	TiAlN Multilayer	3000	0.4	800
BALINIT® FUTURA TOP	TiAlN nano structured	3300	0.25	900
BALINIT® FUTURA NANO	TiAlN nano structured	3300	0.3 - 0.35	900
BALINIT® HARDLUBE	TiAlN WC/C	3000 1000	0.15 - 0.20	800
BALINIT® LUMENA	TiAlN nano structured	3400	0.3 - 0.35	900
BALINIT® SIRIUS	TiCN+TiN	3000	0.4	400
BALINIT® TRITON	a-C:H	2500	0.1 - 0.2	350
BALINIT® X.CEED	TiAlN	3300	0.4	900
BALINIT® X.TREME	TiAlN	3500	0.4	800

Una última idea sobre el costo/precio de las herramientas. En el caso de las de metal duro el precio se divide aproximadamente en 50% el metal duro, que es en sí mismo muy caro, 12% el recubrimiento, y el resto los costes del proceso de fabricación. En cambio en las de acero HSS, el material base solamente representa un 10%-15%.

1.6 DEGRADACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS. DESGASTE

El desgaste progresivo de la herramienta de corte se origina por la acción del proceso de mecanizado. Tiene lugar en dos localizaciones distintas:

- Desgaste en la cara de desprendimiento (o cara de ataque), caracterizado por la formación de un cráter. Este desgaste es el resultado de la acción de la viruta al fluir y deslizarse a lo largo de dicha superficie. Se denota con la letra K. Se origina por mecanismos de difusión química y de afinidad adhesiva, asociados a la fricción de la viruta sobre la superficie.
- Desgaste en el labio o flanco, localizado en la cara de incidencia de la herramienta, cuya causa principal es el rozamiento entre la herramienta y la superficie generada sobre la pieza. Se denota como VB. Se debe a fenómenos físicos de abrasión, entre el filo y la superficie mecanizada.

Todos los desgastes se describen en Normas ISO detalladas al final de este apartado, de la cual se resumen a continuación los principales puntos. En la figura que sigue se observa una plaquita de torno donde se ubican los dos tipos de desgaste, el de cráter en la cara de desprendimiento y el de flanco en la de incidencia.

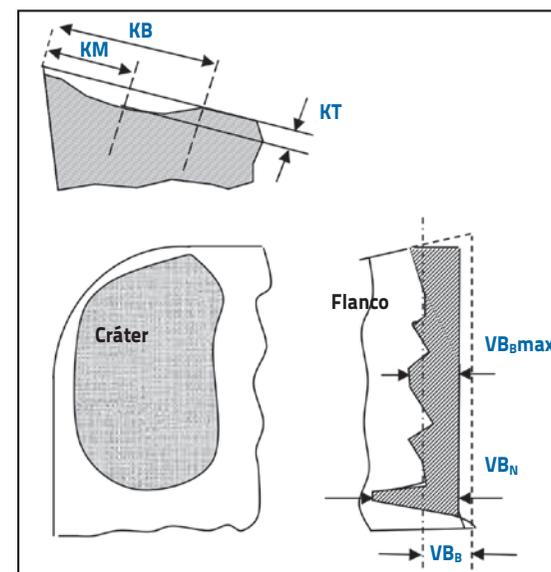


Figura 10: Zonas de desgaste sobre una herramienta de torno (Norma ISO 3685).

En la mayoría de las operaciones de torneado cortan dos filos simultáneamente, pero el estudio del desgaste se concentra en el filo primario. En el filo secundario el desgaste suele ser mucho menor, salvo casos de cilindrado de materiales muy abrasivos.

1.6.1 Desgaste de la superficie de desprendimiento

El cráter formado en la superficie de desprendimiento está limitado al área de contacto entre la viruta y la herramienta, como son los casos mostrados en la Fig. 11.

En el corte de metales, las temperaturas más elevadas se presentan a lo largo de la superficie de desprendimiento de la herramienta y a cierta distancia del filo. A elevadas velocidades de corte, estas temperaturas fácilmente pueden alcanzar los 800°C. Aunque las herramientas de metal duro retienen su dureza a temperaturas elevadas, la difusión entre los átomos de la viruta y del material de la herramienta puede ocasionar el rápido desgaste de esta última. La difusión entre la viruta y el material de la herramienta depende de la presión y de la temperatura en la intercara. A elevadas temperaturas, los átomos del sustrato de la herramienta de metal duro, generalmente cobalto, se difunden en la viruta generada y se van con ella, produciéndose el debilitamiento del filo. Poco a poco, parte del material de la herramienta se va pegado con la viruta, o se desprende por perderse el sustrato conglomerante.

A velocidades de corte muy altas, el crecimiento del cráter suele ser el factor determinante de la vida o duración de la herramienta, porque su crecimiento debilita el filo hasta que con el tiempo éste se fractura. Sin embargo, el desgaste de flanco es el factor de control para determinar la vida de la herramienta. La razón de aplicar este criterio, es que el desgaste de flanco repercute en la dimensión de la herramienta y por tanto en la dimensión y precisión de la pieza mecanizada. En cambio, el de cráter no tiene una implicación directa en la precisión. Pero se debe tener cuidado con los desgastes de cráter cercanos al filo, ya que su efecto se sumará al del desgaste de flanco, potenciando la magnitud de este último, tal como ocurre en el caso mostrado en la Fig.11 en un mecanizado de una aleación de titanio.

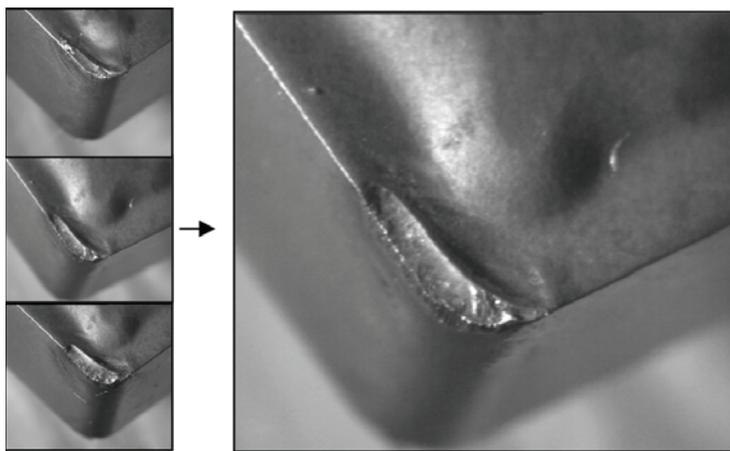


Figura 11: Evolución del desgaste de cráter en el torneado de la aleación Ti6Al4V. En este caso el desgaste de cráter se sitúa muy próximo al filo.

La caracterización del desgaste de cráter se mide como la profundidad del cráter KT o por la relación KT/KM , donde KM es la distancia del centro del cráter al filo original de la herramienta. En el trabajo experimental de los procesos y en la investigación, la profundidad máxima del cráter es generalmente la medida más característica de la magnitud de este tipo de desgaste, y puede ser determinada usando un rugosímetro, midiendo el salto entre las superficies. Pero en el ámbito industrial, no es habitual realizar esta medición, además de ser bastante complicada de usar en la práctica.

1.6.2 Desgaste de la superficie de incidencia

El desgaste de flanco es ocasionado por la fricción abrasiva entre la superficie producida en la pieza y la zona de la cara de incidencia que está en contacto con ella. La anchura de la zona de desgaste se considera una medida del deterioro general de la herramienta, y puede ser determinada fácilmente con un microscopio o lupa.

La figura ilustra el progreso típico del ancho VB de la zona de desgaste del labio en función del tiempo, o de la longitud cortada. La curva se puede dividir en tres regiones, y es similar a las curvas de desgaste de componentes mecánicos sometidos a fricción.

La región AB es donde el filo agudo se descascarilla ligera pero rápidamente, y aparece una zona de desgaste de dimensiones fijas.

La región BC, en la cual el desgaste progresa uniformemente.

La región CD, en la que el desgaste progresa a una tasa creciente.

En la región CD, el desgaste de la herramienta de corte se acelera, debido a que la herramienta ya desgastada no corta nada bien, de forma análoga a un cuchillo sin afilar. En la práctica, es recomendable reafilarse antes de que el desgaste del labio alcance esta última región. De no hacerlo así la herramienta puede romperse.

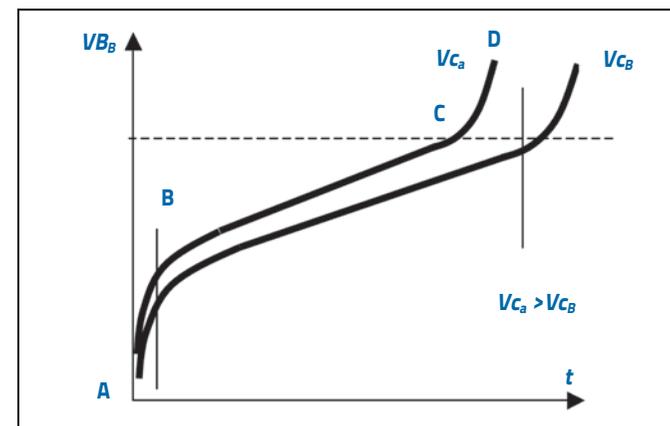


Figura 12: Desgaste del flanco de una herramienta de carburo en función del tiempo, a dos velocidades de corte.

1.6.3 Criterios de duración de una herramienta en torneado

Como criterio para establecer la duración de una herramienta se define un valor pre-determinado del desgaste que se considera el máximo admisible. El desgaste de las superficies de desprendimiento e incidencia de la herramienta no es uniforme a lo largo del filo principal. Por lo tanto, es importante especificar tanto la localización, como el grado de desgaste permisible, antes de considerar el reafilado de la herramienta.

Los criterios recomendados por la Norma ISO para definir la duración efectiva de las herramientas de acero rápido, metal duro o cerámicas, son diversos:

- Fallo catastrófico, es decir, rotura total del filo.
- Si VB_B llega a 0,3mm y además el labio está desgastado uniformemente,
- Si VB_{Bmax} llega a 0,6mm, pero el labio está desgastado irregularmente o existe astillado de zonas del filo de corte.

Tal como se ha indicado en el apartado anterior, el desgaste de flanco se controla porque tiene una repercusión directa en la pérdida de dimensión de la herramienta y por tanto produce superficies menos precisas.

En algunos materiales de baja maquinabilidad, estos valores del desgaste se alcanzan muy rápidamente, por lo que algunos autores y técnicos aconsejan desgastes admisibles de mayor valor, por ejemplo $VB_B = 0,4mm$. Este valor también depende de si se trata de una operación de desbaste, donde no preocupa la precisión de la superficie, o si es un acabado, en donde la precisión es un aspecto fundamental.

1.6.4 Desgaste en fresas frontales

Lo indicado para herramientas de torneado es en líneas generales válido para fresado. En fresado también cortan dos filos simultáneamente, y el estudio del desgaste se centra en el filo principal o primario. En la Fig.13 se observan algunos ejemplos de desgaste de flanco de varias herramientas esféricas, medidos con un microscopio. En un círculo se refleja el desgaste de flanco máximo y en un rectángulo el de tipo medio.

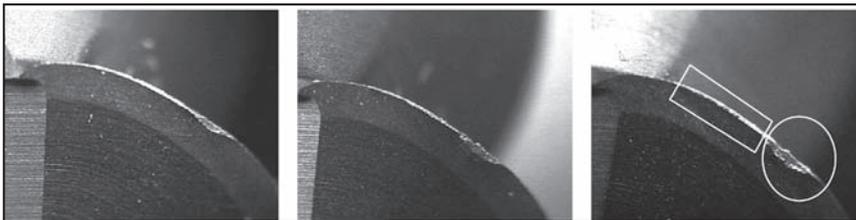


Figura 13: Evolución del desgaste de flanco en una fresa esférica. Véase la zona de desgaste medio (rectángulo), y la zona de desgaste máximo (círculo).

La Fig. 14 muestra los diferentes tipos de desgastes observables en fresas enterizas y descritos en la Norma ISO. Resumidamente, son los siguientes:

Desgaste de Flanco (VB): Pérdida gradual de material de la herramienta que se produce en el flanco o superficie de incidencia durante el corte, y que provoca el progresivo desarrollo de una zona de desgaste. Puede ser de tres tipos:

- **Desgaste Uniforme de Flanco (VB 1):** Zona de desgaste que presenta un ancho más o menos constante y que se extiende a lo largo de toda la profundidad de corte activo.
- **Desgaste de Flanco No Uniforme (VB 2):** Zona de desgaste que presenta un ancho irregular que varía con la posición del filo en la que se toma la medida.
- **Desgaste de Flanco Localizado (VB 3):** Desgaste localizado y exagerado que se produce en zonas específicas del flanco. Muchas veces es en la línea de la profundidad de corte, y se denomina entonces desgaste de entalladura o notching (o VB_N , en donde el subíndice proviene de *notch*).

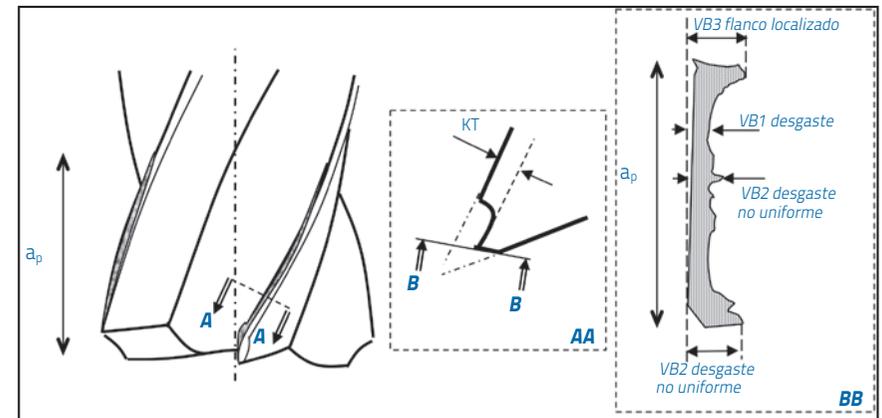


Figura 14: Desgastes observados en fresas radiales enterizas (Norma ISO 8688).

Desgaste de la cara de Desprendimiento (KT): Pérdida gradual de material de la herramienta en la cara de desprendimiento durante el corte. Se sitúa en la cara interior del diente. Entre los tipos específicos, los más importantes son:

- **Desgaste de Cráter (KT 1):** Desarrollo progresivo de un cráter sobre la superficie de desprendimiento, orientado de forma paralela al filo de corte principal, y cuya máxima profundidad se localiza a cierta distancia del mismo.
- **Chipping (CH):** Deterioro del filo de corte en el que partículas del material de la herramienta se desprenden del mismo. Es bastante poco regular en forma, y muy aleatorio. Simplemente evitar este tipo de deterioro, constituye un hito importante en un proceso de optimización del mecanizado.

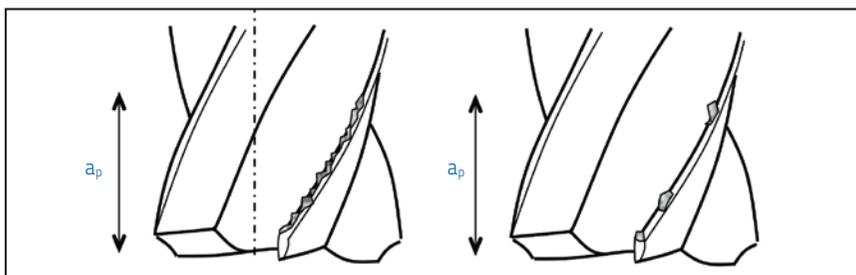


Fig. 15: Chipping CH1 Y CH2.

Chipping Uniforme (CH 1): Pérdidas de pequeños fragmentos de herramienta repartidas uniformemente a lo largo de los filos de corte, y que influyen significativamente en la anchura del desgaste de flanco.

Chipping No Uniforme (CH 2): Chipping que aparece de forma aleatoria en un número reducido de puntos a lo largo del filo de corte activo, pero sin relación alguna entre unos filos y otros.

- **Descascarillado (FL):** Pérdida de fragmentos de herramienta en forma de escamas a lo largo de la superficie de la misma. Se trata de un fenómeno típico que sufren herramientas con recubrimiento.
- **Grietas (CR):** Fracturas que se producen en la propia herramienta, pero que no implican la pérdida inmediata de material. Pueden ser de origen mecánico o térmico, y suceden en condiciones de corte que implican grandes secciones de viruta.
- **Fallo Catastrófico (CF):** Rápido deterioro, que produce un fallo completo de la zona de corte.

1.6.5 Criterios de duración de una herramienta en fresado

Los principales criterios recomendados por la norma ISO coinciden con los propios del torneado anteriormente expuestos, y que hacen referencia al desgaste de flanco VB. En los casos en los que el desgaste de filo no es suave y de crecimiento paulatino, como sucede con la aparición del chipping, se pueden utilizar alternativamente alguno de los siguientes criterios:

- Una determinada profundidad del desgaste de la cara de desprendimiento (KT).
- **Chipping (CH).** Cuando aparezca *chipping*, ha de ser tratado como un desgaste localizado (VB 3), utilizando un valor máximo de 0,5mm como fin de la vida útil de la herramienta.

Los fallos catastróficos (CF) pueden aparecer de forma aleatoria, y no deberían de ser utilizados como primera elección para criterio de fin de vida en los ensayos, a no ser que se repitan en gran número de ensayos.

Los tipos de desgaste que sufre una herramienta pueden variar en función de lo agresivo de las condiciones de corte, de la refrigeración empleada, o de otros condicionantes. Este es el caso de la Fig.16, donde el patrón de desgaste de la plaquita cerámica posee varias zonas, en este caso en el mecanizado de la aleación de níquel Inconel 718.

Al hilo de este ejemplo, los desgastes de *chipping* y entalladura (*notch*) son más preocupantes que el desgaste de flanco V_B . El de flanco es usualmente más gradual y controlable. Por este motivo en aquellas aplicaciones donde el chipping es frecuente, el evitar su aparición puede ser un logro importante y ser el principal objetivo en la mejora de un proceso. El desgaste de flanco es más controlable variando los parámetros de corte, principalmente velocidad de corte y avance.

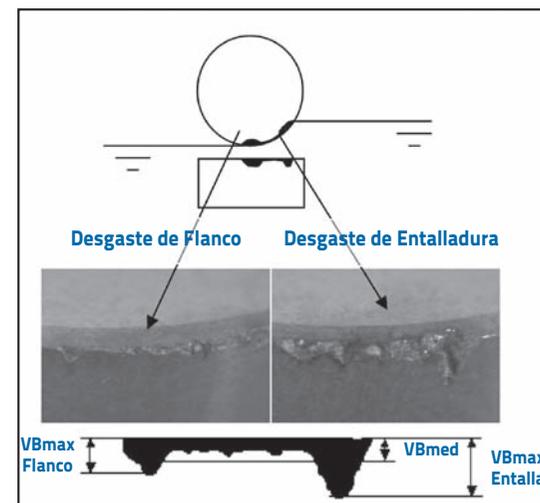


Figura 16: Patrones de desgaste en fresado con cerámica de Inconel 718

1.6.6 Duración o vida de la herramienta

Se define la vida de la herramienta como el tiempo útil hasta alcanzar un criterio de duración o fin de vida de la herramienta preestablecido, por ejemplo los 0,3 mm de desgaste de flanco citado anteriormente. La velocidad de corte V_c es el factor que más afecta la duración o vida de una herramienta, para una determinada combinación de material y herramienta. El trabajo inicial en lo relativo a encontrar relaciones entre la vida de la herramienta y las condiciones de corte, fue realizado por Taylor (durante 25 años, antes de 1903), quien planteó una relación empírica que puede escribirse como:

$$\frac{v_c}{v_r} = \left(\frac{T_r}{T} \right)^n \quad v_c T^n = v_r T_r^n$$

Donde:

n es una constante para cada material y herramienta.

v_c es la velocidad de corte.

T es la duración de la herramienta.

v_r es la velocidad de referencia para la que se sabe que la duración de la herramienta es T_r .

La ecuación de Taylor supone muchas simplificaciones al considerar únicamente el efecto de la velocidad de corte. Por ello se plantearon posteriormente algunas expresiones de forma más general, del tipo:

$$v_c \cdot f_z^x \cdot a_r^y \cdot T_{VB}^n = C_{VB} \cdot VB^m$$

Donde v_c es la velocidad de corte, f_z es el avance por diente, a_r es la profundidad radial, T_{VB} es el tiempo a un desgaste dado, C_{VB} es la constante de duración a ese desgaste, y VB corrige el criterio aplicado en el ensayo respecto al de referencia. Los exponentes x, y, m son característicos de los binomios herramienta-material pieza.

La información en la bibliografía sobre las curvas de Taylor es muy abundante. Sin embargo en el mecanizado de materiales de baja maquinabilidad, donde el valor añadido del material-pieza es muy elevado y se utilizan máquinas herramienta de elevadas prestaciones y coste, pierden importancia. En estos casos se buscan condiciones que reduzcan los tiempos de uso de las costosas máquinas y consigan una elevada precisión de las piezas, más que que las herramientas duren largo tiempo.

En otras ocasiones los experimentos que dan lugar a las curvas de Taylor no se publican, o bien aparecen nuevas herramientas en el mercado antes de que las anteriores se hayan aceptado por el mercado. Hoy día el enfoque de Taylor no posee tanta importancia como lo fue en el siglo pasado, dado que el costo horario de la máquina es mucho mayor que el de la herramienta, y generalmente se prima la elevada productividad sobre la prolongada vida de la misma. Pero las curvas siguen dando las pautas cualitativas que relacionan la vida de herramienta con los parámetros de corte.

1.6.7 Representación y evolución del desgaste

En los informes de vida de herramienta se mide y representa el desgaste de flanco en función del tiempo, o la longitud de corte, o del volumen de material eliminado. Lo mejor es utilizar las tres magnitudes como eje de abscisas, aunque las magnitudes están totalmente relacionadas por las fórmulas básicas de mecanizado, y conocida una y los datos del experimento se conocen las otras dos, como se muestra en la figura para dos fresas probadas en acero común, a muy alta velocidad de corte.

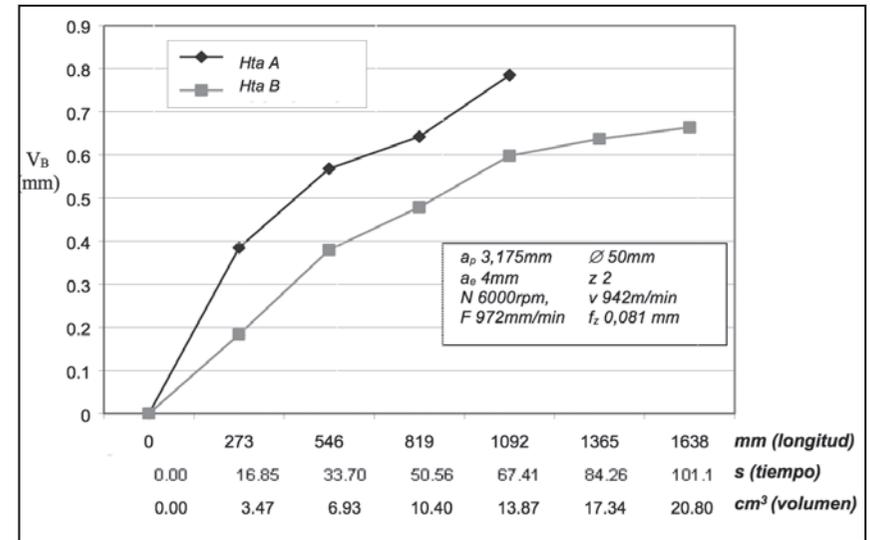


Figura 17: Evolución del desgaste de flanco VB

En operaciones de desbaste el desgaste es habitual relacionarlo con el volumen de material eliminado, que es el principal objetivo a maximizar en esta operación. Por el contrario, en el acabado, será con la longitud de pieza mecanizada, que indica cuanto ha friccionado el filo con la pieza, y que como se ha indicado antes es el causante del desgaste de flanco. Y el desgaste de flanco produce una variación de la geometría del filo, perdiendo medida.

El desgaste de herramientas es hoy día un campo de investigación en sí mismo, dentro de la disciplina denominada Tribología, que es la ciencia del contacto y la fricción. Con esta ciencia comparte conocimientos, técnicas de investigación, instrumentos de medida y surgen problemas con el mismo fundamento físico. Uno de los principales campos comunes, es la investigación en el desarrollo de recubrimientos antifricción.

Por otro lado, seguir las Normas debe ser una directriz para el ingeniero de procesos, por lo menos en lo que sea posible. Estas son referentes a los tipos de desgastes de herramientas, a la nomenclatura de las herramientas, como también a las magnitudes y a la forma de llevar a cabo la experimentación. Tres son las principales, aceptadas y traducidas en varios países:

- UNE 16-149-82: Geometría de la parte activa de las herramientas de corte, equivale a la ISO 3002/1-1977 (en español).
- ISO 3685-1993: Tool life testing with single point turning tools.
- ISO 8688-1-1989: Tool life testing in milling, Part 1: Face milling, Part 2: End milling.

Aunque su lectura no es obligada, dado que sus principios están presentes en todos los manuales de herramientas y libros, sí conviene saber que la nomenclatura en la tecnología de mecanizado y los procesos están bien normalizados.

1.7 REFRIGERANTES EN EL MECANIZADO, TENDENCIAS ACTUALES

Durante los procesos de mecanizado se genera una considerable cantidad de calor, debido principalmente a la intensa deformación plástica del metal originada, y a la fricción de la viruta cuando se desliza sobre la cara de ataque de la herramienta. Tal como se ha comentado en el apartado anterior, estas condiciones de fricción y temperatura causan un gran desgaste de la herramienta, dando como resultado un pobre acabado superficial y un trabajo impreciso. Para reducir los efectos negativos del calor y la fricción sobre las herramientas y piezas se utilizan los fluidos de corte.

El fluido de corte provoca tres efectos positivos, a) como refrigerador del calor generado, b) como lubricador al interponerse entre la viruta y la superficie de desprendimiento de la herramienta, y c) como flujo evacuador de la viruta. Sus efectos beneficiosos sobre el mecanizado son fundamentales, y durante los últimos cien años su utilización ha sido parte fundamental de la tecnología.

Sin embargo existen otras razones que recomiendan reducir el uso de lubricantes o refrigerantes en el mecanizado:

- En primer lugar por razones económicas, dado que reducir al máximo los costos del ciclo de vida de los fluidos de corte, esto es filtrado, depuración y eliminación de residuos, tiene una repercusión directa en los costos de fabricación.
- En segundo lugar, por motivaciones medioambientales, dado que el no uso de lubricantes reduce en una menor contaminación.
- A estos aspectos se suma que en los países industrializados se están desarrollando estrictas legislaciones sobre el uso de fluidos de corte. Estas normativas son cada vez más restrictivas respecto a su utilización, dado que, se los relaciona con más de 100 enfermedades de diverso grado de virulencia.

1.7.1 Mecanizado en seco (Dry machining)

La eliminación de líquidos refrigerantes o lubricantes puede suponer ahorros de hasta el 10% -15% de los costos totales de producción, según fuentes cercanas al mundo de la producción de autopartes. Sin embargo, mecanizar en seco (*dry machining*) es una posibilidad que depende del material a mecanizar. Así:

- En aceros templados y fundiciones (de hierro o bronce), el fresado a alta velocidad es totalmente factible en seco, sin más que utilizar un flujo de aire que permita eliminar las virutas, de modo que el filo no las vuelva a cortar.
- En el caso de las aleaciones ligeras (aluminio), las temperaturas del proceso podrían ser controladas con unas condiciones de corte adecuadas, y el fresado o taladrado

en seco sería posible, pero siempre con riesgo de que el aluminio se adhiera a la herramienta y la embote. Por otra parte, en el mecanizado de aluminio las grandes cantidades de viruta se venden para su reciclado y su precio depende de la cantidad de lubricante que haya quedado atrapado en su masa. Si es menor del 2% (aproximadamente) su precio es cero, si supera esta cantidad hay que pagar para que se lleven la viruta, siendo por tanto un costo a añadir al ciclo de vida de la emulsión. Pero si la cantidad de emulsión atrapada en la viruta es inferior al porcentaje citado, el precio es positivo y existe una ganancia para el mecanizador.

- En aleaciones de titanio o níquel es imposible eliminar las emulsiones a la fecha de hoy.

Dada la imposibilidad de eliminar los refrigerantes en muchas aplicaciones, el mercado precisamente va en sentido contrario, aumentando la presión de las bombas de las máquinas a unos 60-80 bares. De esta forma, se utiliza el refrigerante de un modo mucho más contundente que el habitual chorro originado por las bombas "clásicas" de 6 a 8 bares. Así por ejemplo las nuevas bombas de Grundfos® tienen etapas múltiples de diferentes longitudes, y con la presión y el caudal exactos necesarios para distintos materiales. Las bombas pueden instalarse indistintamente en posición vertical u horizontal, por lo que ofrecen una libertad absoluta en términos de diseño. Además, estas bombas pueden suministrarse de manera opcional con convertidores de frecuencia para una solución avanzada de velocidad variable, con el fin de aumentar la eficiencia del sistema y optimizar los procesos. En la Fig.18 se observan los grupos de bombas de las máquinas de la escuela de Ingeniería de Bilbao, de 80 bares de presión y depósitos cerrados para evitar la espumación.

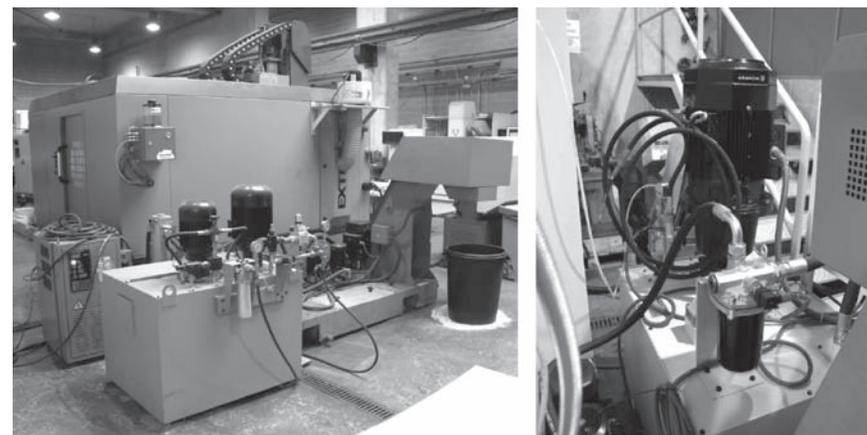


Figura 18: Bombas de alta presión (80 bares) y depósito cerrado, ambas instaladas en máquinas de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)

La alta presión es una buena opción ya madura en cuanto a oferta de equipos y utilización, existiendo herramientas en el mercado para aplicarla de forma muy eficiente. Tanto es así, que todas las grandes empresas fabricantes de herramientas y portaherramientas tienen diseños específicos para este sistema particular, como los mostrados en la Fig. 19.



Figura 19: Dos sistemas de portaherramientas para alta presión de Sandvik Coromant® e Iscar®

Sin embargo, en otros materiales y aleaciones la eliminación o reducción al máximo de los refrigerantes tiene un impacto positivo en la ecología y en la economía del mecanizado, siendo la *mínima cantidad de lubricación (MQL)* una técnica muy recomendable. A la rentabilidad económica de soluciones que respetan el medio ambiente se le denomina ecología, o cultura ECO2 (economía+ecología).

1.7.2 Mínima cantidad de lubricante (MQL) o micropulverización (near-to-dry machining)

Como se ha dicho en el apartado anterior, mecanizar en seco es interesante. Sin embargo es algo problemático en aleaciones de aluminio y otras aleaciones ligeras, debido a la tendencia de este material a adherirse al filo de la herramienta, dando lugar a lo que se conoce como capa adherida, o *Built Up Layer (BUL)*. Este fenómeno conlleva una disminución de la vida útil de la herramienta. Por tanto, dada la imposibilidad de mecanizar en seco, se está utilizando una técnica de mínimo consumo de aceite de corte, denominada *Minimum Quantity of Lubricant (MQL)*, consistente en la inyección de un chorro de aire a alta velocidad, con partículas micropulverizadas de aceite biodegradable en suspensión. El aceite o alcohol utilizados tienen base vegetal, por lo que no contaminan, ni producen efectos nocivos sobre la salud. De hecho, en la Universidad del País Vasco se ha experimentado con aceite de girasol, obteniendo muy buenos resultados, pudiéndose utilizar también aceite de soja y colza.

Existen varios tipos de sistemas MQL, todos ellos de bajo costo, a) o bien por mezcla en un depósito general y pulverización por Venturi, o b) con microinyectores programables. En la Fig. 20 se muestran ambos tipos de equipos.



Figura 20: Dos sistemas de MQL, de Steidle®

El sistema MQL de mini-inyectores se detalla en la Fig. 21, funcionando con aire a presión, inyectando la mezcla de aire y aceite en la zona de corte. Al sistema le llega aire a presión (2), este aire entra en una unidad de mantenimiento, para pasar a un regulador de presión (3). Después de esto, parte del aire llega a un sistema donde se produce la impulsión del aceite, regulada a través de un frecuencímetro (4) y unas minibombas (6), las cuales proporcionan la cantidad de aceite a suministrar por cada boquilla, en cada instante. El aceite es impulsado hasta la boquilla (1), donde se produce la mezcla de esta con el aire, pulverizándose por efecto de la presión y velocidad del aire en la salida, siendo las partículas de aceite inferiores a 2µm de diámetro. Por tanto, la boquilla no es más que un cono, donde por la cánula interna coaxial llega el aceite, y por el canal intermedio el aire a presión desde el compresor.

La boquilla o boquillas se deben disponer en una posición correcta relativa a la herramienta y al avance de trabajo de ésta, de tal forma que se produzca una adecuada incidencia del chorro sobre la zona de corte. Es decir, debe orientarse como se hace con las lanzas o boquillas de la refrigeración por emulsión convencional.

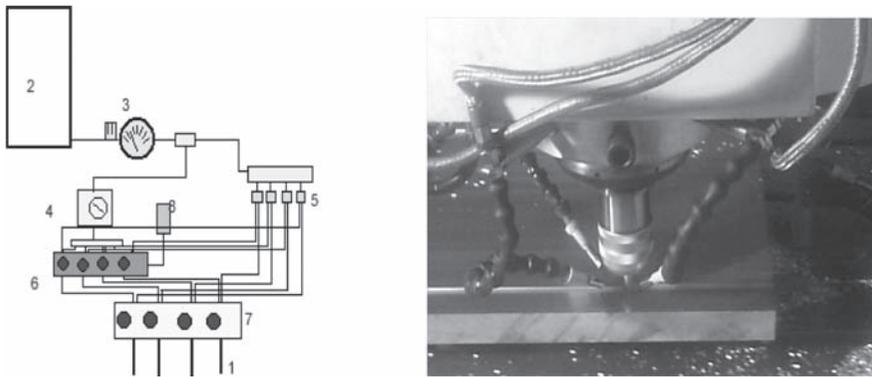


Figura 21: Esquema del sistema MQL y foto de las boquillas instaladas en la máquina HS1000 de la Universidad del País Vasco

El MQL se está extendiendo rápidamente en muchos sectores debido al bajo costo de los equipos (entre 300 y 5000 dólares), la eficiencia de la técnica que llega a tener el rendimiento cercano a uso de emulsiones, y a que otorga otras ventajas, como que deja ver la zona de corte directamente al operario. Además existen programas de la administración que favorecen la compra de equipos de esta tecnología y los operarios suelen tener además una visión muy positiva del respeto ambiental y del cuidado de la gerencia respecto a su salud.

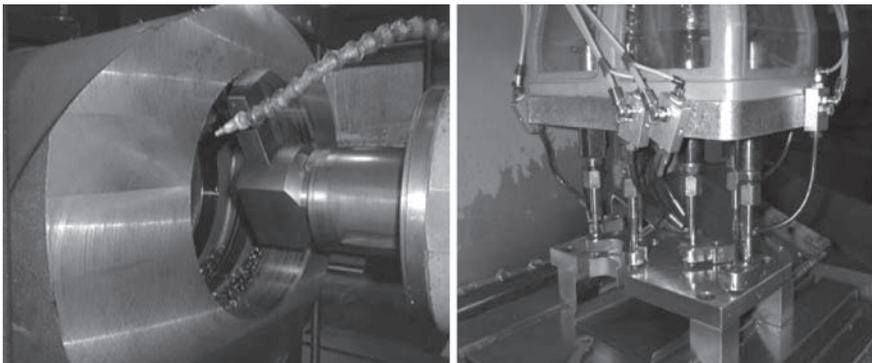


Figura 22: Dos ejemplos de MQL (por Steidle): torneado interior y roscado por macho

Algún dato sobre el consumo de aceite, por ejemplo en el caso de las aleaciones de aluminio, con un caudal de aceite de $0,04 \text{ cm}^3/\text{min}$ y unas condiciones de corte de alta velocidad, que producen un caudal de viruta de $45000 \text{ mm}^3/\text{min}$, con un litro de aceite de

soja se puede mecanizar durante 420 horas, lo que equivale a eliminar $1,2 \text{ m}^3$ de material, es decir casi 3 toneladas de aluminio, con un costo de aceite de sólo 2 o 3 dólares. Como se deduce de estos datos, el aceite se pierde, pero su consumo es muy reducido.

2. CONCEPTO DE MECANIZADO DE ALTO RENDIMIENTO Y MECANIZADO A ALTA VELOCIDAD

Estos dos términos no son exactamente sinónimos, y en las últimas décadas han tomado y han sido afectados, por distintos matices. A continuación se explica el sentido actual de los mismos, que ha variado respecto al concepto de hace 20 años, simplemente por la "inflación" de los términos, derivada de la necesidad de diferenciar la oferta en su uso comercial.

2.1 MECANIZADO DE ALTA TASA DE ARRANQUE

Tradicionalmente (previo a 1980) el mecanizado de alto rendimiento hacía referencia a aquel que aplica simultáneamente grandes avances y profundidades de corte, pero manteniendo las velocidades de corte consideradas convencionales. Este proceso debe ejecutarse en máquinas-herramienta con cabezales de gran potencia y estructura rígida.

Este tipo de mecanizado solo es aplicable a materiales blandos, como es el caso de las aleaciones ligeras, aceros de baja resistencia, o aceros antes del endurecimiento por tratamiento de temple. Un caso típico es el torneado de grandes cigüeñales y rodillos de laminación, en tornos de gran tamaño y potencia.

2.2 MECANIZADO DE ALTO RENDIMIENTO, SENTIDO ACTUAL

Hoy día y en nuestro contexto, el concepto *MAR* (*Mecanizado de Alto Rendimiento*), es mucho más general, refiriéndose a toda tecnología de arranque de viruta que mejore sustancialmente tres aspectos del proceso:

- La productividad, medida como tasa de arranque, es decir, cantidad de material eliminado en la unidad de tiempo. También debe procurarse mecanizar en condiciones que induzcan un desgaste no excesivo de las herramientas.
- La calidad, en cuanto a una mayor precisión dimensional y una menor rugosidad de las superficies.
- Por otro lado, respetar el medio ambiente y reducir el impacto de los procesos sobre el mismo, esto es, disminuir la contaminación y el consumo de energía.

La industria occidental tiende a producir cada vez componentes de mayor valor añadido. El término *rendimiento elevado*, se refiere a todo aquello que contribuye a aumentar este valor, bien porque disminuye los tiempos de producción y costos, o porque aumenta la calidad de lo fabricado.

Por tanto, se entiende actualmente como *Mecanizado de Alto Rendimiento* todo aquel proceso que incorpora una mejora notable respecto a la forma tradicional de mecanizar, aumentando el valor añadido, tanto en productividad como en calidad. Dentro del término mecanizado se engloban los procesos de arranque de viruta con herramienta de corte definido (fresado, torneado, taladrado, aserrado), con filo de corte no definido o abrasivos (rectificado), e incluso los procesos no convencionales (electroerosión, ultrasonidos, etc.).

2.3 MECANIZADO A ALTA VELOCIDAD

En este tipo de mecanizado, la idea es la contraria al concepto tradicional anteriormente mencionado en el apartado 2.1. Así, se reduce significativamente la sección de viruta, es decir el avance y la profundidad de pasada, pero se eleva la velocidad de corte sobre lo habitual. ¿Cuánto se eleva?. Pues no hay una respuesta especialmente académica, pero se entiende que la velocidad de corte es sensiblemente mayor a la "tradicional" (para dar un orden, entre 5 y 10 veces).

Desde un punto de vista académico y atendiendo a los orígenes de la idea que data de 1929 (patente de Carl Salomon en Alemania) podría decirse que la v_c se eleva hasta un punto donde la naturaleza termofísica del proceso de arranque de viruta varía sensiblemente, respecto a la propia del proceso convencional. Esta definición implica alguno o varios de estos aspectos:

- La velocidad de deformación del proceso de cizalladura que se produce en la denominada zona de cizalladura primaria en la formación de la viruta, es superior a 10^5 s^{-1} .
- Casi todo el calor se evacua con la viruta, siendo un proceso cercano a condiciones adiabáticas en lo que respecta al material. Casi no se transmite calor a la herramienta, lo que es óptimo para evitar su degradación.

Con esta definición, nos encontraríamos que hoy día casi ningún proceso de mecanizado es de alta velocidad, cuando casi todo el ofertante de máquinas asegura que el que permiten sus fresadoras sí lo es. ¿Cuál es la razón de esta paradoja?

La razón es que solamente en el caso de aleaciones ligeras de fácil mecanizado, de aleaciones de magnesio o de aluminio, el proceso de formación de viruta es diferente al correspondiente a velocidades convencionales si se emplean máquinas que permiten girar el cabezal a 20.000 rpm y se utilizan fresas de diámetro 40 mm. Las velocidades de corte en este caso se elevan a 2000 ó 3000 m/min donde se se aprecian las características citadas anteriormente.

En el caso de los aceros, fundiciones, aleaciones de difícil mecanizado, acero templado, aleaciones de titanio y níquel, aún siendo las velocidades de corte aplicables a fecha de hoy mayores que las que se consideran convencionales, no existe gran variación en los mecanismos intrínsecos (los que se han citado respecto al comportamiento viscoplastico, térmico, etc.) asociados a la formación de la viruta. Las velocidades de corte en estos casos se sitúan entre los 150 a 300 m/min, 5 o 10 veces más altas que en los 70 del siglo pasado.

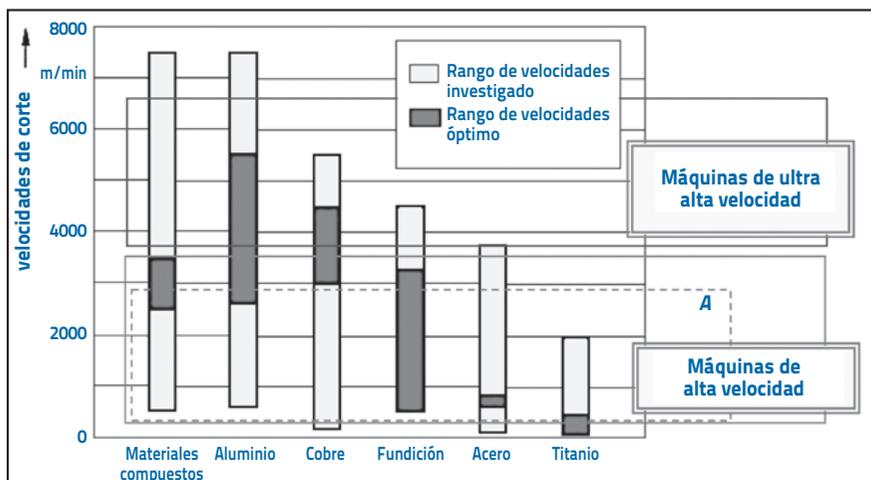


Figura 23: Rango de altas velocidades en el corte de diferentes materiales.

Las velocidades de corte de lo que hoy día se entiende por alta velocidad se reflejan en la Fig. 23, con los valores orientativos de la velocidad de corte en cada caso. Para alcanzar estas velocidades de corte se requieren máquinas dotadas de cabezales capaces de alcanzarlas. Como se puede observar existe una zona (rectángulo superior), donde la máquina a utilizar es de *alta velocidad*, que hoy coincide con la oferta industrial de este tipo de máquinas. Otra zona (rectángulo inferior), requiere una máquina de *ultra-alta velocidad*, que en la actualidad sólo es una realidad en algunos prototipos no comercializados. Sin embargo, ha existido una paralización en la tendencia hacia el incremento de velocidad de rotación, para evolucionar la máquina-herramienta hacia la línea de multitasking, que se comentará más adelante.

2.4 CORTE DE ALTO RENDIMIENTO

En inglés se ha acuñado el término *HPC (High Performance Cutting)*, para aquel corte de aleaciones ligeras que reúne secciones de viruta elevadas y velocidades de giro del cabezal entorno a las 20.000 rpm, lo que suele derivar en una velocidad de corte de 1000-2000 m/min. Estas aleaciones son relativamente fácilmente mecanizables, por tanto este proceso es perfectamente viable.

Las definiciones y siglas anteriores están sometidas al marketing y su significado es poco académico. Lo que realmente implica la aparición de términos y siglas generalmente en inglés, es que la evolución tecnológica ha superado la propia definición y clasificación de los libros, que por otra parte cada día poseen un horizonte temporal más efímero.

IDEA ACTUAL DE MECANIZADO DE ALTO RENDIMIENTO

Toda técnica de mecanizado que aumente el valor añadido del proceso, es decir, que mejore:

Productividad, medida como tasa de arranque, es decir, cantidad de material eliminado en la unidad de tiempo. Dado que la tasa de arranque (caudal de viruta) es:

$$Q = a_p a_r F = a_p a_r (f_z Z N) = a_p a_r f_z Z (1000 V_c / \pi \phi)$$

Se puede por tanto:

- Aumentar la profundidad axial a_p y radial a_r . Esto es posible en aleaciones ligeras, pero no en aceros y aleaciones de elevada resistencia.
- Aumentar la velocidad de corte V_c , idea base del fresado a alta velocidad, aplicable a muchos materiales.
- Aumentar el avance por diente f_z , lo que es difícil sin que se resienta la vida de la herramienta.

Disminuya el desgaste de las herramientas y por tanto su costo. Este aspecto debe analizarse simultáneamente y en función del costo de la mano de obra, costo de la máquina, y costo de la pieza sobre la que se mecaniza.

Maximice la calidad, en cuanto a una mayor precisión dimensional y una menor rugosidad de las superficies.

Reduzca el impacto ambiental, tendiendo al mecanizado ECO eficiente, que es aquel que compatibiliza la Ecología y la Economía (ECO2).

3. MÁQUINAS DE MAYORES PRESTACIONES

Para mayor información sobre cómo son las máquinas de esta segunda década del siglo XXI se recomienda leer el libro *Machine Tools for High Performance Machining*, de la editorial Springer. Los avances han sido tales que poco queda cierto y veraz de los libros clásicos de los años 70 y 80.

Abarcar y describir todo el sector de la máquina-herramienta está fuera del ámbito y del espacio de este informe. Pero merece la pena dar algunas ideas, que permitan entender las principales tendencias y sus evoluciones tecnológicas.

3.1 SOLUCIONES DEL CABEZAL

La solución clásica del cabezal en las máquinas de control numérico ha sido la de motor-correa-husillo. Los engranajes hace tiempo han desaparecido de la mayoría de las máquinas modernas, dado que tanto en el cabezal como en los sistemas de avance la potencia y par del motor eléctrico se gobiernan de forma eléctrica. Los cabezales suelen incorporar motores de corriente alterna de tipo inducción o asíncrono, mientras que los motores de avance suelen ser hoy día de tipo síncrono. Cada eje de la máquina cuenta con sus propio motor de avance.

Las fresadoras de alta velocidad para el mecanizado de pieza pequeña/mediana son generalmente de tres ejes. Las configuraciones de los ejes pueden ser diversas, pero generalmente predominan dos tipos, las de pórtico con mesa móvil, o aquellas de columna móvil. En cuanto al husillo principal/cabezal que se instala en estas máquinas, existen básicamente dos opciones, que se suman a la convencional de conexión con correa (ver Fig.24):

- Electrohusillos compactos de alta velocidad, capaces de suministrar par a bajas revoluciones y por tanto con capacidad de desbaste en acero. Por término medio ofrecen 18kW con una velocidad de rotación máxima de 18.000 a 25.000 rpm. Utilizan rodamientos híbridos, de pistas metálicas con bolas cerámicas, siendo este su principal punto débil, dado que un pequeño golpe puede romper los rodamientos. Por tanto, el usuario debe asegurarse de que sus programas CNC estén libres de errores y colisiones. Algunos fabricantes conocidos son Kessler, GMN, Faemat, IBAG, Mikron y el español Goialde.

Los electrohusillos incorporan sensores de temperatura y sistemas de refrigeración por agua. Ultimamente se trabaja en incorporar discos con piezoeléctricos sobre los apoyos, para detectar fuerzas de corte y así evitar colisiones o sobrecargas de los rodamientos.

- Husillos con acoplamiento directo al motor, en donde ambos elementos están separados. Aunque solamente permiten alcanzar entre 12.000 a 14.000 rpm, su principal ventaja es su mayor fiabilidad y robustez. Se utilizan también en máquinas de

muy elevada precisión dado que el acoplamiento absorbe en parte las dilataciones térmicas.

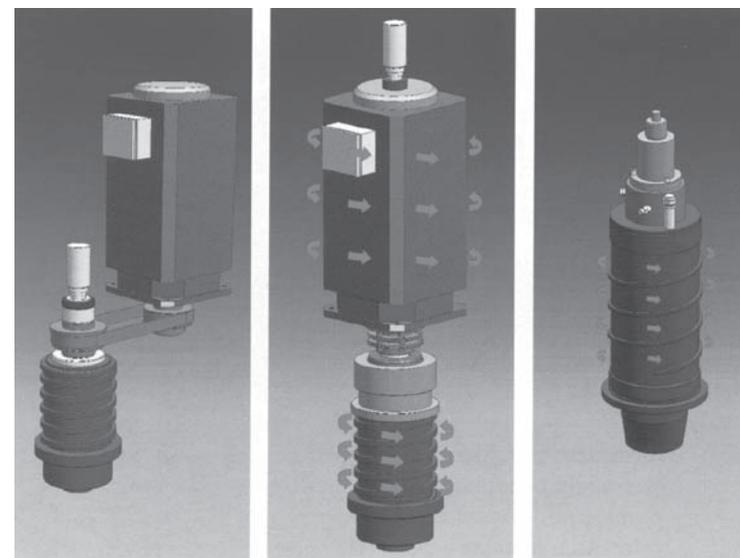


Figura 24: Las tres soluciones de cabezal que propone la empresa española Ibarria

Los electrohusillos actuales permiten desbastar aceros templados a bajas revoluciones (incluso menos de 1000 rpm), ya que han resuelto el suministro de par a bajas rpm, que era un serio problema en la década de los 90. Por este motivo, las fresadoras de alta velocidad también pueden realizar operaciones de desbaste ligero posibilitando realizar todas la operaciones de forma consecutiva.

En la Fig.24 se muestran las tres soluciones de cabezales actuales, desde la tradicional de motor-correa-husillo a la de electrohusillo. En este último caso, la curva par-potencia-velocidad de rotación puede ser como la mostrada en la Fig.25, un caso típico para una fresadora para el sector del molde y matrices de forja.

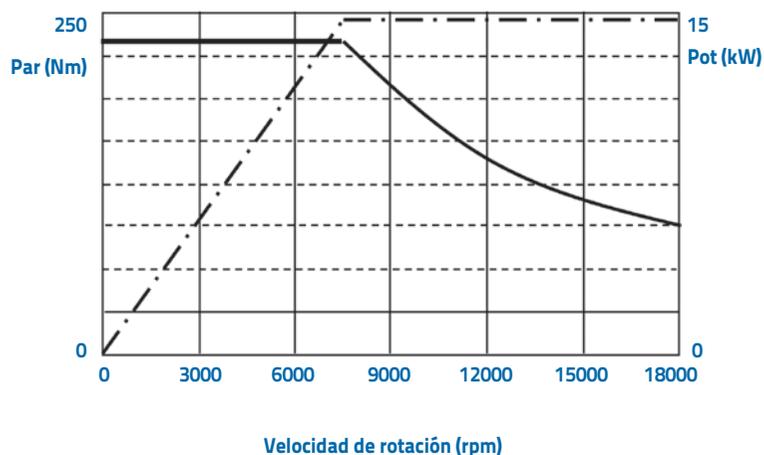


Figura 25: Curvas de par y potencia de un electrohusillo actual ubicado en una fresadora de tres ejes para moldes y matrices

3.2 MÁQUINAS HERRAMIENTA POR SECTORES

Es imposible referirnos a todos los sectores que mecanizan, dado que son muchos con diversos requisitos cada uno de ellos. Por otra parte, en cada sector hay muchas soluciones respecto a las máquinas y no una única. Por este motivo, lo explicado en esta sección, solamente es una foto fija de algunas máquinas típicas, pero que permite definir características genéricas de cada sector y su solución.

3.2.1 Máquina para piezas de fuselaje

En el sector aeronáutico existen varios tipos de máquinas, según sean componentes fabricados en aleación de aluminio o de titanio, y según el tamaño de los mismos. Se habla de producir *piezas monolíticas* (largueros, costillas y larguerillos del fuselaje), extraídas desde bloques prismáticos de aluminio, eliminando hasta el 95% del material en forma de viruta. Su razón de ser es la gran homogeneidad de la pieza final, mucho mayor que la conseguida con subestructuras formadas por piezas dobladas y remachadas.

La directriz a la hora de mecanizar aleaciones de aluminio es la de utilizar la mayor velocidad de corte posible. Así las herramientas de corte, desde el punto de vista de la geometría del filo, presentan ángulos de desprendimiento muy positivos y en general ángulos de hélice de 30° o inferiores, y con gran espacio en la zona de desprendimiento para una correcta evacuación de la viruta. Respecto al material de las herramientas, parece que está completamente asentado el empleo de herramientas o placas de metal duro, ya que proporcionan un mayor rendimiento respecto a las de acero rápido. Si bien pueden encon-

trarse recubrimientos tipo TiAlN, gran parte de los fabricantes optan por no recubrir las plaquitas; en su lugar buscar un gran pulido con el fin de evitar la adhesión del aluminio a la herramienta, que provoca un desgaste acelerado de la misma.

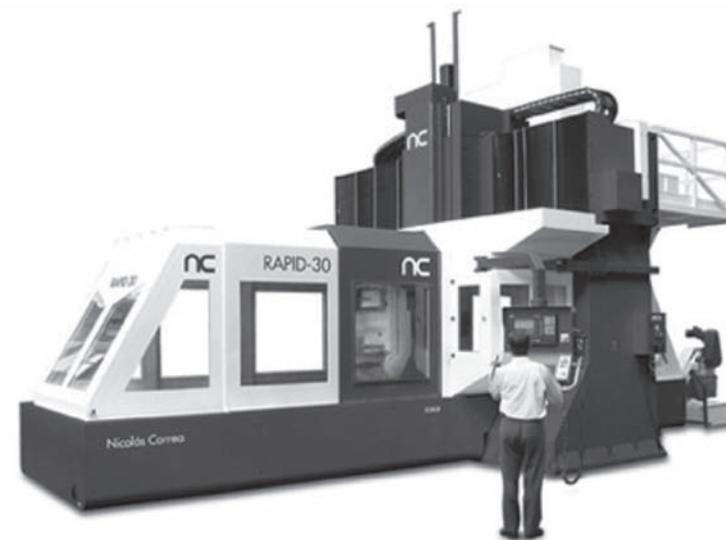


Figura 26: La Nicolás Correa® Rapid orientada a pieza aeronáutica

En este sentido, las limitaciones no vienen dadas por la dificultad en cortar el material una vez superada cierta velocidad de corte, sino por los problemas que de ello se derivan, habitualmente problemas dinámicos como el equilibrado de las fresas y el chatter (retemblado) regenerativo.

- Dado que empiezan a comercializarse husillos que alcanzan velocidades de giro de 24.000 rpm, el equilibrado de la herramienta se torna fundamental, especialmente en herramientas de plaquitas. Así diferentes fabricantes ya hacen actualmente hincapié en realizar un equilibrado adecuado de la herramienta previo a cualquier operación de mecanizado, y en no sobrepasar un régimen de giro máximo a partir del cual la elevada fuerza centrífuga, podría desintegrar la herramienta.
- Por otra parte, el *chatter regenerativo*, comúnmente conocido como retemblado, consiste en la autoexcitación de los modos de vibración del conjunto herramienta-porta-husillo debido al desfase entre la huella dejada por la herramienta en la pieza en la pasada justamente anterior, y su vibración actual. Así, cada vez es más habitual que los fabricantes de herramientas ofrezcan soluciones, bien de cara a rigidizar el conjunto mediante herramientas como las monobloque, que integran herramienta y porta, o bien ofreciendo software para la predicción del chatter, mediante el cálculo de los denominados "diagramas de estabilidad". Dichas herramientas informáticas

permiten incluso, la modelización del conjunto husillo-cono-herramienta para la obtención de los parámetros modales, que conducen a la obtención de estos diagramas. El chatter se conoce desde siempre en los talleres y ha sido en los últimos 20 años cuando más intensamente se ha modelizado de forma matemática.

La máquina donde se mecanizan las piezas monolíticas suelen disponer de una bancada de gran tamaño, y generalmente son de husillo horizontal para facilitar la caída de la viruta. El husillo puede llegar incluso a los 100 kW y hasta 24.000 rpm. Este tipo de máquinas pueden incorporar cabezales bi-rotativos, lo que permite inclinar las fresas durante el proceso y mecanizar paredes inclinadas, dado que en las piezas tipo costillas, largeros y largerillos, las paredes suelen tener unos pocos grados de inclinación, siguiendo la forma suave de los fuselajes y alas del avión.

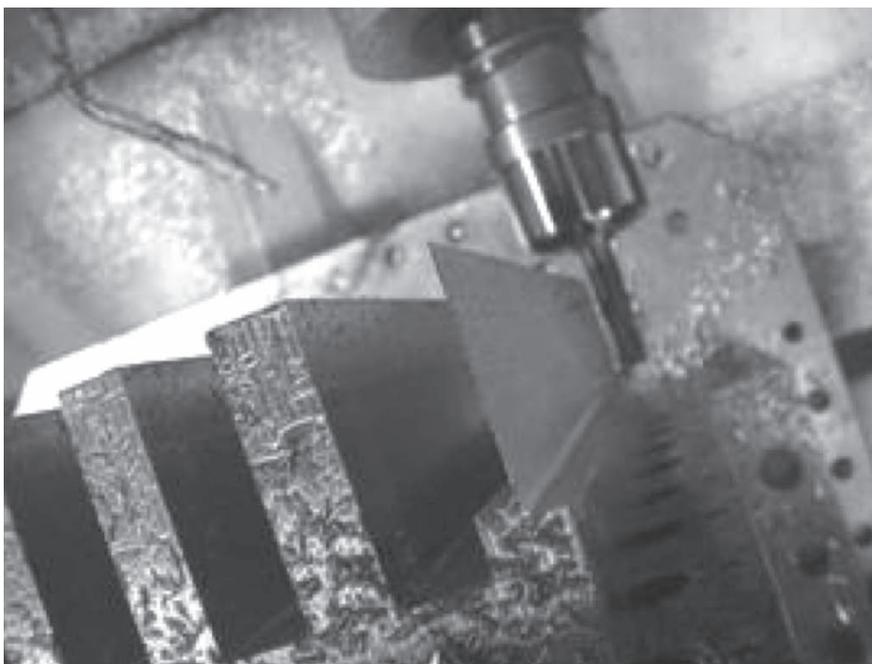


Figura 27: En el sector aeronáutico cada vez se mecanizan piezas de menor espesor, con paredes menores a 1 mm.

En el sector del fuselaje es importante estudiar otros aspectos, como son la forma de evacuar las virutas, muy abundantes dada la alta tasa de arranque, pudiendo alcanzar varias toneladas de viruta al día. También es de gran importancia la fijación y amarre de las piezas a la máquina, dado que son piezas grandes y esbeltas, motivo por el cual, las fijaciones y utillajes suelen ser de gran complejidad y costo.

3.2.2 Máquinas para mecanizar troqueles

Dada las dimensiones y peso de los troqueles de estampación de chapa metálica, las máquinas suelen ser de tipo pórtico donde la mesa es fija. Están dotadas de cabezales con dos grados de libertad de giro adicionales, con objeto de orientar la herramienta en su posición óptima respecto a la pieza a mecanizar, en un mecanizado multieje no simultáneo denominado 3+2, es decir, se orienta el cabezal de forma óptima respecto a una superficie del troquel, se bloquea y se mecaniza generalmente en zig-zag.

Una solución que se está generalizando es utilizar máquinas con cambio automático de cabezal. Uno es de tipo convencional (hasta 5.000 rpm) para las operaciones de desbaste, que recibe su movimiento de alta potencia desde el motor ubicado en la parte extrema del carnero. Otro cabezal incorpora un electrohusillo de alta velocidad (20.000 rpm) para los superacabados. Es una forma de realizar las dos operaciones en la misma máquina, y en una sola fijación.

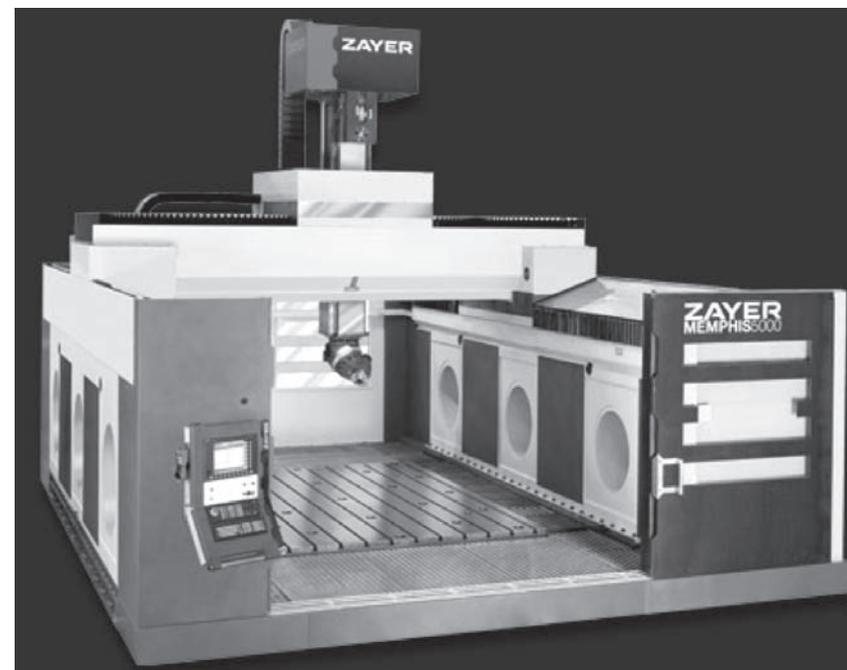
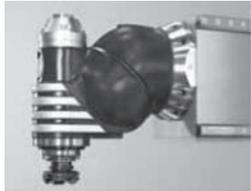


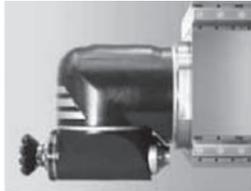
Figura 28: Fresadora de tipo puente Memphis de la empresa vitoriana Zayer®, muy adaptada al mundo de matrices

El cambio automático de cabezales es ya una práctica extendida en los fabricantes de grandes fresadoras, que pueden incorporar cabezales de alesado, de eje U, ortogonales, universales, etc. Algunas de sus variantes se muestran en la Fig.29.

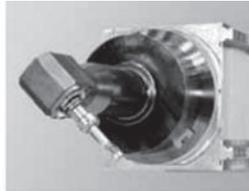
Gama de cabezales FP



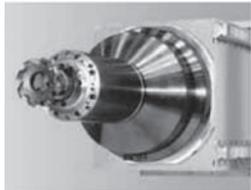
Cabezal universal
32 / 37 kW
2,5° x 2,5° / 1° x 2,5° / 0,001° x 0,001°
3000 / 4000 / 5000 / 6000 rpm



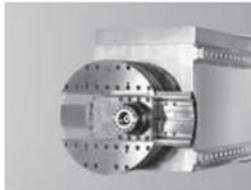
Cabezal ortogonal
32 / 37 kW
2,5° x 2,5° / 1° x 1°
4000 / 5000 / 6000 rpm



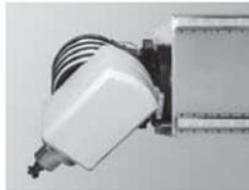
Cabezal angular con cambio de herramienta manual



Cabezal horizontal fijo
32 / 37 kW
3000 / 4000 / 5000 rpm



Plato de refrentar



Cabezal ortogonal de giro continuo
34 kW
0,001° x 0,001° (4° y 5° ejes)
18000 rpm

Figura 29: Gama de cabezales de la empresa vasca Soraluce®

3.2.3 Máquina para automoción

El centro de mecanizado típico es el de tres ejes con husillo horizontal; los husillos son de elevada potencia (mayor a 25 kW), con el objeto de mover fresas de plato de gran diámetro a velocidades superiores a las 10.000 rpm. Suelen estar dotados de sistemas de cambio de palet, de tal forma que su integración en sistemas del tipo de transferencia sea muy sencilla. En algunas ocasiones, es de interés dotarle de un eje de giro adicional (suele ser el eje B), para mecanizar en una fijación las cuatro caras del cubo (que circunscribe a la pieza).

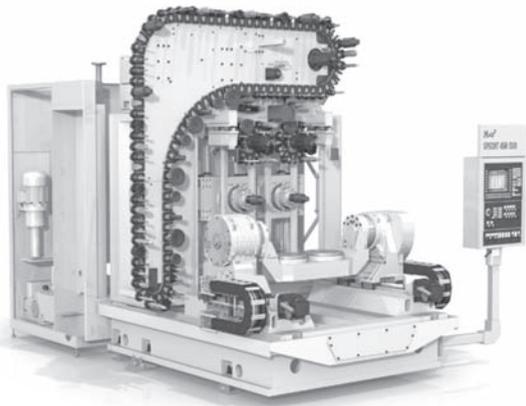


Figura 30: Centro horizontal Specht DUO de MAG®

En estas máquinas son de gran importancia los sistemas auxiliares de cambio rápido de herramienta y pieza, y los sistemas de monitorización que permitan el mecanizado desatendido. En algunos casos, como el de la Fig.30, se puede dotar de dos cabezales gemelos, y la máquina se puede suministrar con accionamientos de avance por husillos de recirculación de bolas o con motores lineales.

En el campo de automoción se mecanizan piezas de fundición de hierro, entre ellas las novedosas CGI (vermiculares), y aleaciones de aluminio fundidas de la familia del Al-Si. Estas últimas son empleadas principalmente en el motor del automóvil (carcasas, bloques y pistones). Respecto al mecanizado, su principal característica es que son muy abrasivas porque contienen silicio.

En mecanizado de autopartes se realizan operaciones sencillas sobre piezas fundidas cercanas a su forma final (Near-net-shape). Por tanto se mecaniza poco en cuanto a volumen de viruta en cada pieza, justamente para acabar las caras y agujeros que van a estar en contacto con otros componentes. Se fresan algunas caras, se taladran, avellanán y alesan los agujeros, etc. Se utilizan centros de mecanizado de husillo horizontal, o bien máquinas transfer automáticas si la producción debe ser de millones de unidades al año.

Las herramientas a emplear en aleaciones Al-Si son:

- Menos del 12% de silicio, se puede mecanizar con metal duro recubierto de TiAlN. La herramienta se desgasta rápidamente, pero el tiempo de mecanizado útil puede ser suficiente.
- Más del 12%, solamente se debe utilizar diamante policristalino PCD, que se ubica en la punta de plaquitas de metal duro.

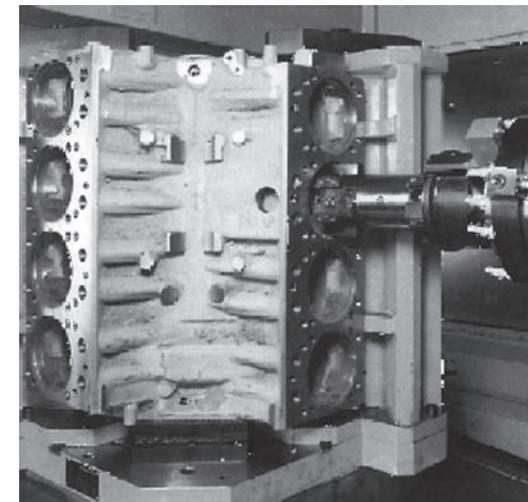


Figura 31: Alesado de bloques de motor en centros de mecanizado horizontales

3.2.4 Máquina para molde y matriz de forja

Un aspecto fundamental para la extensión de la tecnología HSM ha sido su entrada en el sector del molde, donde el tamaño de las empresas es pequeño y el número de usuarios es importante. Seguramente si la alta velocidad siguiese estando restringida exclusivamente al sector aeronáutico, no estaríamos hablando en este texto de esta técnica, dado que el aeronáutico siempre se ha considerado un sector muy tecnológico y un poco elitista, con unos suministradores muy especializados.

Las máquinas de alta velocidad para el mecanizado de moldes son relativamente pequeñas y generalmente de tres ejes, con espacio de trabajo menores a 1x1x1 m. Las configuraciones de los ejes pueden ser diversas, pero generalmente predominan dos tipos:

- Pórtico con mesa móvil
- Columna móvil, para moldes de pequeño tamaño.

Pueden estar dotadas de electrohusillo de alata velocidad o motor con acoplamiento directo. En todo caso el superacabado de acero templado de formas libres, exige elevadas revoluciones del cabezal, en general superiores a 15.000 rpm. Los CNC actuales pueden gobernar con precisión los avances de trabajo, que suelen ser de hasta 10 m/min. Estas máquinas poseen aceleraciones sobre la herramienta en torno a 1G.

Las fresadoras de cinco ejes también están entrando en el campo del molde, ya que permiten acceder a lugares profundos con fresas de menor longitud, y por tanto en condiciones de mayor rigidez / estabilidad.

El fresado a alta velocidad de moldes de acero templado se centra en la operación de acabado con un fresa esférica (o fresa de copiado); en esta fase se elimina un sobrematerial de 0,2 ó 0,3 mm. La geometría del corte en esta operación se refleja en la Fig. 32. Debido a la compleja geometría de las cavidades, se deben utilizar fresas esféricas cuyo diámetro no suele superar los 20 mm. Si se tiene en mente que las pendientes de las formas a generar varían entre 0° y 90° de inclinación, se concluye que alcanzar una velocidad de corte efectiva de 300 o 400 m/min (ver punto A de la Fig. 32), requiere de una velocidad de rotación del cabezal, que sobrepase las 15.000 rpm.

Las velocidades de corte efectivas son de valor 200 a 350 m/min, el proceso de formación de la viruta a estas velocidades es similar al convencional, sin variación de los fenómenos básicos que determinan el comportamiento viscoplástico del material ante el proceso de cizalladura, que es lo que es intrínsecamente un proceso de arranque de viruta, como tampoco modifica los mecanismos de fricción entre material/herramienta (ver apartado 2.3).

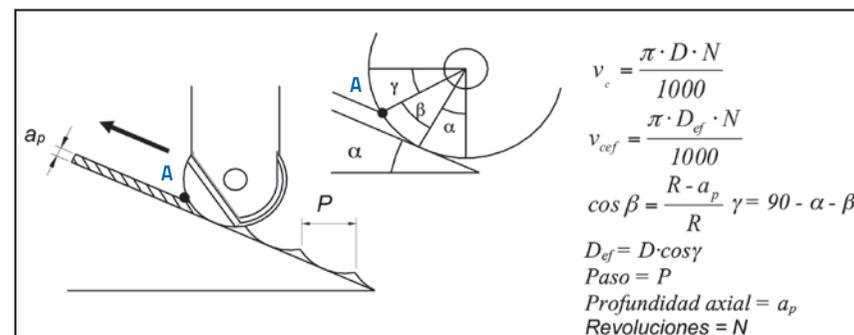


Figura 32: Relación de la velocidad de corte con la profundidad axial y la pendiente.

La Fig.33 incluye el ejemplo de un molde de tirador de armario de cocina, que ha debido realizarse con fresas muy esbeltas. La operaciones de fresado empleadas, se recogen en la Tabla 2.

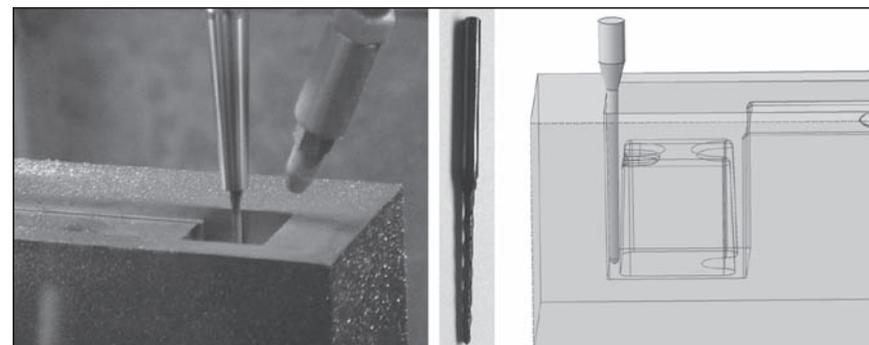


Figura 33: Un molde de tirador de mueble de cocina en acero a 52 HRC, donde se utilizan fresas muy esbeltas. Operaciones en la Tabla 2

Tabla 2. Operaciones del molde de un tirador

OPERACIÓN Y FRESA	a_p	a_e	F (mm/min)	S (rpm)	TIEMPO
Desbaste, Hta toroidal Ø8 radio 2	0.4	3	1600	4000	11 min
Acabado wall, Hta toroidal Ø8 radio 0.5	0.2	/	1000	4000	17 min
Desbaste, Hta de bola Ø6	0.2	0.1	3000	13000	15 min
Bitangencia, Hta toroidal Ø3 radio 0.5	0.15	1.5	360	6000	11 min
SemiAcabado, Hta de bola Ø6	/	0.1	2000	13000	10 min
Acabado, Hta toroidal Ø8 radio 0.5	/	1	450	3500	5 min
Acabado, Hta de bola Ø4	/	0.1	2000	18000	10 min
Bitangencias Acabado, Hta toroidal Ø3 radio 0.5	/	0.5	360	6000	3 min
Corners, Hta de bola Ø2x16	0.1	0.1	900	15900	1h
Acabado, Hta de bola Ø3	0.1	/	900	15900	40 min
Desbaste, Hta de bola Ø2x16	0.05	1	600	15900	1h 40 min
Desbaste, Hta de bola cónica Ø2x30 conicidad 0.5°	0.025	1	500	10000	12 min
Desbaste, Hta de bola Ø6	0.2	0.3	2000	15000	1h

En cuanto a la convivencia de la electroerosión y el fresado en el campo de las matrices de forja y de los moldes para plásticos, el equilibrio se ha desplazado hacia el fresado de

media y alta velocidad. Así en la UPV/EHU se realizó hace 15 años una comparación directa, donde se compitió con ambas tecnologías. En concreto se mecanizó/electroerosionó una sección de un molde de inyección de aluminio. Se partió de un tocho de acero (AISI H13, Orvar Supreme®), con la dureza antes del temple. Las condiciones finales del molde debían ser: dureza de 44 HRC, y la rugosidad máxima Ra de 1,6µm. La tolerancia dimensional oscilaba entre una centésima en zonas de ajuste y la décima en zonas de la huella.

Se realizaron los programas de mecanizado con el CAM Unigraphics NX. Los programas fueron: 1) desbaste del tocho de acero, 2) acabado por alta velocidad, 3) desbaste del electrodo en alta velocidad, 4) acabado del electrodo por alta velocidad, 5) desbaste y acabado de electrodo parcial.

Tras realizar la pieza por ambas tecnologías se han obtenido los resultados que se indican en la Fig.34. En ella se aprecia la evaluación en tiempo de la realización del molde de inyección de aluminio por alta velocidad y electroerosión. Ante estos datos, la alta velocidad era la solución. Hoy día con la posibilidad de desbastar en las fresadoras de alta velocidad sería aún una victoria más contundente. La electroerosión sin embargo, es aún la respuesta cuando las cavidades son muy profundas y estrechas, y la dureza del acero muy alta.

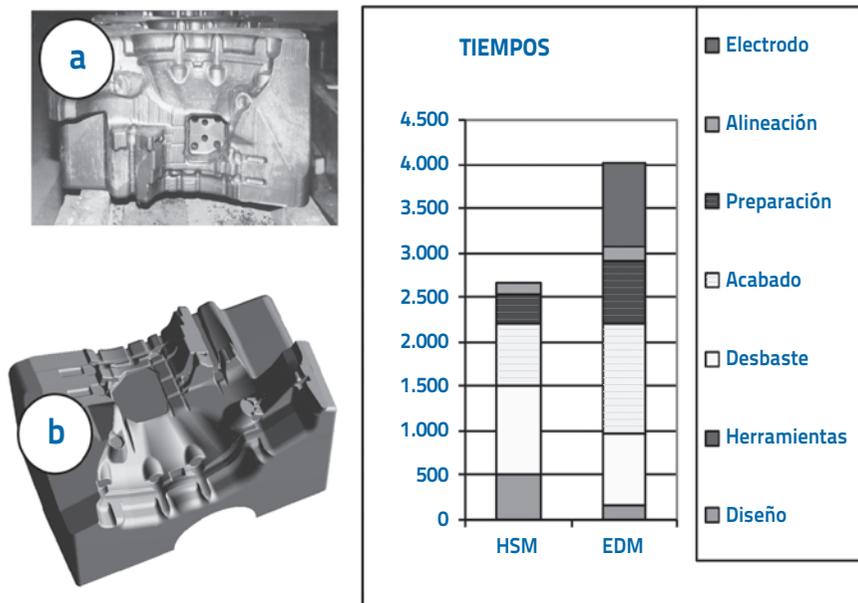


Fig. 34: Resumen de tiempos en la elaboración de un molde de inyección de aluminio, acabado por alta velocidad (HSM) y electroerosión (EDM). (a) Molde de inyección de aluminio. (b) Diseño de molde en CAD/CAM

3.2.5 Sistemas auxiliares que multiplican la capacidad de las fresadoras

Existen numerosos sistemas auxiliares y herramientas especiales para aumentar la capacidad y los recursos en centros de mecanizado tradicionales.

- Una opción rápida y económica para transformar un centro de mecanizado de 4 ejes (3 cartesianos y plato divisor), en una máquina multitarea es incorporar un accesorio de tipo TA-Center 125 de la empresa D'Andrea®.

Este dispositivo dota a la máquina de un nuevo eje llamado "U", que permite el control radial de una herramienta desde el control numérico de la máquina, de forma totalmente automatizada. Un centro de mecanizado preparado con un equipo de este tipo, permite realizar una serie de operaciones diferentes como ser torneados internos y externos, aleados cónicos, radios cóncavos y convexos, roscados, etc. Estas operaciones son adicionales a las convencionales del centro de mecanizado, con la ventaja añadida de no tener que cambiar de máquina. Asimismo, la integración de las operaciones y la adaptación a la pieza de la estrategia de mecanizado, permiten obtener soluciones de mecanizado en un único amarre, eliminando los improductivos tiempos de manipulación, centrado, etc.



Figura 35: Cabezal D'Andrea montado en centro de mecanizado para el perfilado de componentes de revolución.

- Otro tipo de accesorios de interés son los portaherramientas preparados para introducir refrigerante por el interior de la herramienta. La idea se basa en un portaherramientas con un estator exterior por donde se introduce de forma radial el refrigerante, circulando de forma axial por el interior de la herramienta. Estos sistemas son de gran utilidad cuando la máquina no dispone de circuito de la emulsión interno o por ejemplo, cuando se quiere trabajar con refrigeración criogénica por el interior, sin poner en riesgo el husillo de la máquina.
- Los procesos de rebabado, acabado y pulido normalmente se realizan con herramientas manuales. Sin embargo, también existen varios accesorios de interés con los que trabajar en fresadoras de control numérico. Este es el caso de los cepillos de pulido plano Xebec®. Se trata de cepillo flexibles de fibras de nylon y abrasivo,

capaces de pulir superficies planas y eliminar patrones de rugosidades existentes causados por los procesos de mecanizado previos. Un ejemplo claro de esta aplicación es la eliminación de la espiral generada tras el torneado de discos de freno. Otro tipo de cepillos abrasivos flexibles son los Flex-Hone, ideados para el acabado de agujeros, que se explicarán más adelante. Aplicaciones interesantes pueden ser el acabado de cilindros neumáticos y el de componentes críticos con gran número de agujeros. Para el rebabado también se puede trabajar con sistemas neumáticos (turbinas) capaces de operar a velocidades de entre 50.000 y 100.000 rpm, sin necesidad de hacer uso del husillo de la máquina.

- Una de las líneas a tener en cuenta en los últimos años está relacionada con el concepto de *control pro-activo*. La idea se basa en sustituir el clásico concepto de control a fin de línea, por innovadores sistemas de control de calidad durante el proceso. Algunos sistemas a tener en cuenta son por ejemplo la utilización de medidores de fuerza axial y par de la empresa Artis®, colocados en el portaherramientas y que son capaces de controlar la fuerza y potencia consumida en cada instante. Son de gran aplicación en operaciones de taladrado y roscado.

Más adelante se hará referencia al bruñido, pulido y uso de sondas inalámbricas, de gran interés actual.

3.3 FRESADO EN 5 EJES

En 10 años las fresadoras de cinco ejes han pasado de ser una rareza a ser casi la norma en la fresadora de medio y pequeño tamaño. Las razones son varias, pero de forma resumida se puede indicar que no son extraordinariamente caras (o no tan caras como lo fueron antes) y ya son una realidad cercana al usuario medio, quien ha empezado a tener una experiencia propia con ellas. Por otra parte los vendedores ofrecen apoyo a sus clientes sobre cómo sacar partido a las mayores prestaciones de estas fresadoras, y de otra los paquetes de CAM las contemplan como una opción común con lo cual la programación se simplifica. Pero sobre todo, se están extendiendo porque son la 'solución natural' al fresado, desde el punto de vista de la tecnología.

Sobre este último punto y recordando lo que se estudiaba sobre manipuladores espaciales se tiene que:

- 1- Un cuerpo en el espacio debe ubicarse mediante 6 coordenadas, denominadas sus 6 grados de libertad.
- 2- Al ser la fresa un cilindro simétrico respecto a su eje, solamente hacen falta 5 grados de libertad, dado que su propia rotación no es una coordenada representativa.
- 3- El manipulador que atrapa y mueve un objeto de forma cualquiera debe tener 6 ejes o grados de libertad para poder dotarle de sus 6 coordenadas. Un ejemplo de esto son los robots antropomórficos que suelen tener 6 grados de libertad.
- 4- Si el manipulador atrapa a un cilindro, y la fresa es un cilindro, debería tener 5 grados de libertad.

De este conocimiento básico surge una rápida conclusión: una máquina (mecanismo) de 5 grados de libertad puede colocar una fresa en cualquier posición del espacio respecto a la pieza. Por consiguiente, la fresadora de cinco ejes es el mecanismo que se adapta a la necesidad y la resuelve totalmente, y así se ha llegado a la "solución natural" desde el punto de vista de la tecnología. Como hoy es mecánicamente posible hacer una máquina de 5 ejes servocontrolada y con la suficiente rigidez para poder tener precisión, se ha llegado pues a la extensión de oferta y uso de las fresadoras de 5 ejes.

Respecto a la arquitectura de la máquina, a los centros de tres ejes basados en una estructura cartesiana se deben añadir dos ejes de giro. Los 3 ejes cartesianos producen los grandes desplazamientos y los 2 de rotación generan la orientación de la herramienta. De un primer análisis surgen tres configuraciones básicas, con varias variantes. Cada una de ellas puede denominarse sistemáticamente por la sucesión de grados de libertad (ejes) empezando desde la pieza hasta la punta de la herramienta. De esta manera se tiene:

- LLLRR, máquina de tipo pórtico (3 ejes lineales en serie) o de cuello de cisne y cabezal rotativo con dos ejes de giro, el C y el A. En esta solución los cabezales tienden a desajustarse con el tiempo y trabajo, necesiándose reglajes periódicos. Zayer, Correa, Jobs, Rambaudi, Mecof poseen máquinas de gran tamaño de esta configuración. Soraluze en fresadoras de bancada móvil o fija, también estaría dentro de este tipo.
- RRLLL, máquina de tres ejes cartesianos en serie, dotada con mesa basculante (A) y de plato rotativo (C). Es muy habitual en máquinas pequeñas y compactas. Surgen de una evolución natural de las máquinas de tres ejes, donde la mesa es sustituida por un plato divisor tipo cuna. Podríamos decir que han sido las causantes del gran desarrollo de los cinco ejes en los últimos cinco años, dado el gran número de clientes potenciales que tienen las máquinas de pequeño tamaño. Kondia, DMG, Huron, Haas, Mazak, Mori Seiki, Hermle entre otras, poseen productos de este tipo.
- RLLLL, máquina generalmente de columna móvil donde el cabezal es montado sobre un eje basculante. En la mesa se ubica una mesa rotativa (C). Es una configuración para piezas de gran altura o de forma cilíndrica. Algunas empresas como Ibarmia han visto en esta arquitectura un gran nicho de mercado para el sector espacial, eólico y de mecanizado general de piezas grandes.

Tras definir mecánicamente la máquina, surge la necesidad de controlar y sincronizar el movimiento de varios grados de libertad simultáneamente, con una velocidad y precisión suficientes para alcanzar los niveles requeridos de precisión y velocidad. Se podría decir que casi todos los controles numéricos de marcas conocidas poseen capacidad sobrada para realizar la interpolación de los 5 ejes, entre ellos Heidenhain, Fagor, Siemens, Fanuc, Mitsubishi, Fidia y otros. Algunos de estos son customizados por las grandes empresas de máquinas-herramienta, que hacen suyas plataformas de hardware de otros fabricantes.

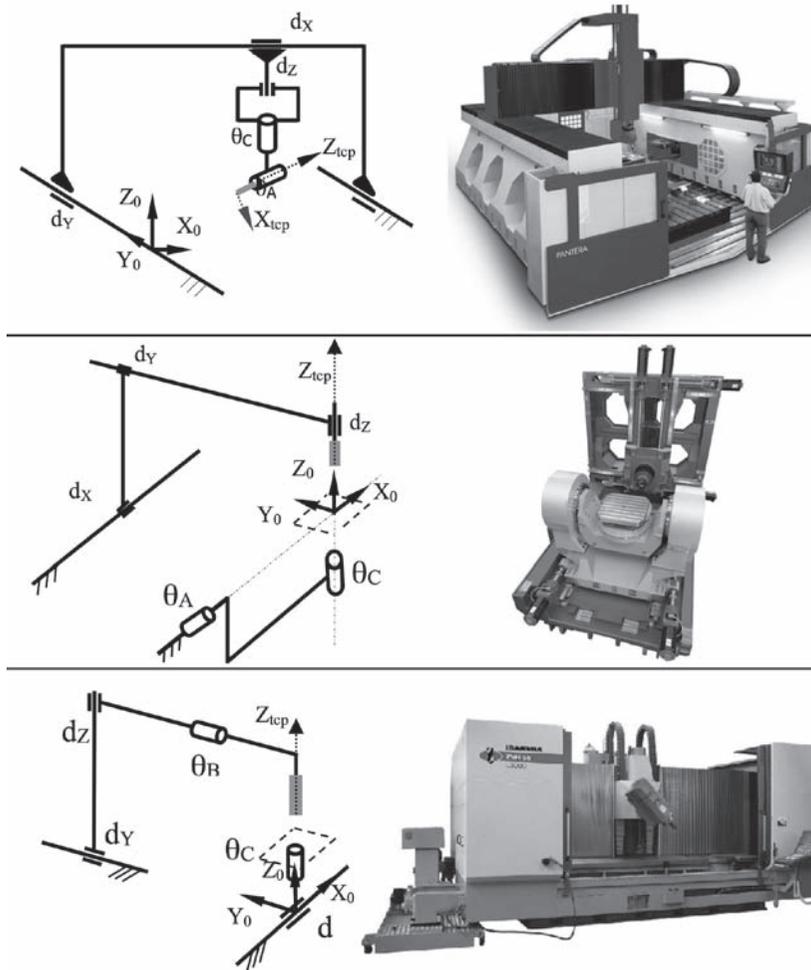


Figura 36: Máquinas de 5 ejes, varias soluciones para la cinemática. Arriba) LLLRR, modelo Pantera de Correa-Anayak. Centro) RRLLL. Abajo) RLLLL, Ibarmia ZVH55.

(R es rotación, L movimiento longitudinal, comenzando por la pieza hacia la herramienta)

La programación CAM en cinco ejes simultáneos es difícil y requiere un aprendizaje y periodo de formación intenso. Sin embargo, ya existe una oferta de cursos importante para la formación continua de los técnicos, que es clave para que la empresa pueda sacar el máximo partido a esta tecnología.

Por otra parte, simular los programas en la etapa de CAM es fundamental para evitar problemas y colisiones, dado que existe riesgo real de impacto durante el mecanizado. En la Fig.37 se muestra una imagen de la simulación de un fresado en 5 ejes.

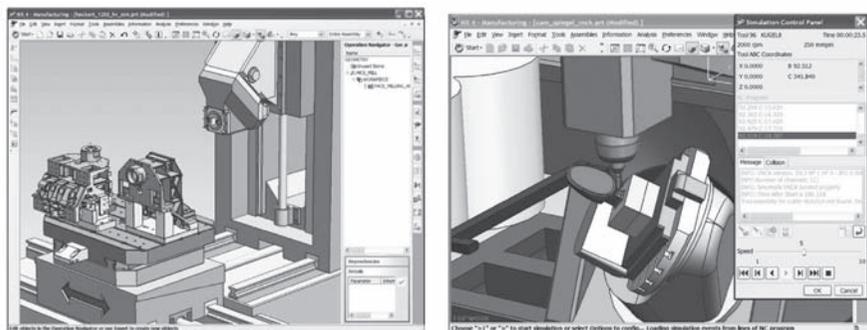


Figura 37: Simulación del entorno de mecanizado completo en operaciones de mecanizado de cinco ejes con Unigraphics NX®.

La última evolución en este tipo de máquinas ha venido dada por el uso de los denominados 'Torque motor', o motores rotativos huecos basados en los motores lineales. Estos permiten reducir el volumen del motor, y propician su instalación directamente sobre el eje de giro, eliminando los engranajes hipoides. Pueden servir para sincronizar y posicionar el eje o también para suministrar el movimiento de trabajo (actuando como plato rotativo). Son por tanto accionamientos directos, y de muy alta dinámica.

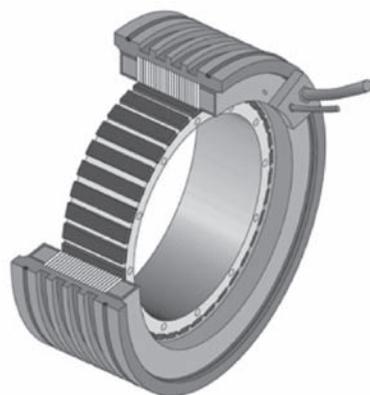


Figura 38: Motor hueco de par

Los 5 ejes abren sin duda un abanico de piezas de gran valor añadido, como los rotores integrales para turbinas, los engranajes especiales, los dientes para odontología, etc. Por este motivo su expansión en la industria ha sido muy rápida. Veremos a continuación

algunos ejemplos, que son simplemente una muestra de la potencia y posibilidades ofrecidas por esta tecnología de fabricación.

3.3.1 Fresado de piezas integrales para rotores

Tanto los *blisks* como los *impellers* forman parte de la turbina del motor aeronáutico, siendo piezas ubicadas en diferentes segmentos de las turbinas, o motores aeronáuticos.

- El *impeller* es una pieza rotativa utilizada para incrementar la presión y velocidad de un fluido, o para su decremento en el caso de que forme parte de una turbina. Generalmente, está formado por dos tipos de álabes diferentes, llamados Blade y Splitter respectivamente, los cuales se colocan de forma alterna sobre una base denominada Hub. También son frecuentes los impellers que solamente cuentan con un tipo de alabes, sobre todo en aplicaciones de bombeo.
- El *Blisk* (*bladed integrated disks*) es un componente del motor aeronáutico formado por un disco con una serie de álabes situados sobre la superficie del mismo, fresados desde un disco macizo inicial. La palabra blisk es un nombre acortado de las palabras blade y disk. Los blisk son también conocidos como IBR (*integrally bladed rotors*).

En el caso de los impellers, se usan principalmente en los compresores de los motores de aviones de tamaño medio. Se utiliza en los motores para comprimir el aire entrante a la cámara de combustión. Dado que están hechos de materiales difíciles de fundir como son las aleaciones de titanio o de níquel-cromo, y requieren un buen acabado superficial y propiedades mecánicas superiores, suelen mecanizarse a partir de un bloque de material. Algunos motores de tipo turbopropeller utilizan un compresor centrífugo (impeller), en vez de un compresor axial, y el impeller es la pieza que forma parte del compresor centrífugo. Este es el caso de Pratt & Whitney Canadá PW100 que utiliza un compresor de doble etapa con un impulsor de alimentación de presión de descarga de aire bajo en el impulsor de potencia alta, que comprime el aire de nuevo en la cámara de combustión.

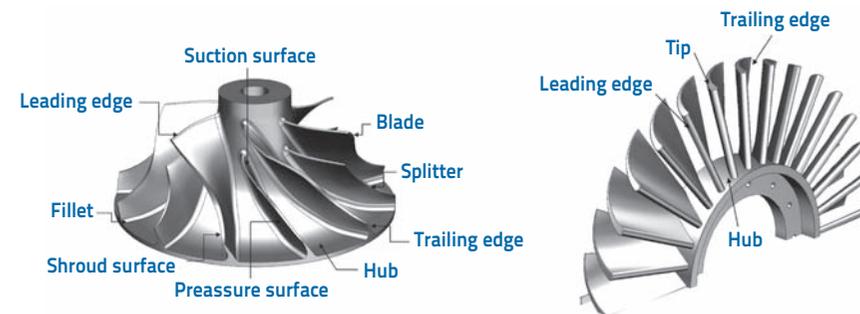


Figura 39: Impeller y blisk

Por otro lado, los blisks fabricados a partir de mecanizado monobloque suelen ir situados en la turbina del motor aeronáutico. En un inicio fueron utilizados en motores pequeños de helicóptero, pero enseguida se incorporaron a la tecnología del sector aéreo militar, y actualmente forman parte de los motores de aviones de uso civil, como por ejemplo el motor turbofan (PW6000) y el motor turbohélice (TP400 D6). Otros ejemplos de la aplicación de blisks en el motor aeronáutico, son los motores PW100G de Pratt & Whitney.

Ambos casos se mecanizan como pieza completa a partir de un bloque macizo, obteniendo así una pieza monobloque, sin discontinuidades entre los diferentes elementos y por tanto, con unas propiedades mecánicas superiores. Se fabrican en la aleación de titanio Ti6Al4V o en aleaciones base níquel (Inconel 718), dependiendo de la zona de la turbina en la que vayan situados.

En proceso de fresado de este tipo de piezas representa un reto dada la complejidad geométrica de las mismas. Nos encontramos ante estructuras que deben ser fresadas en cinco ejes en continuo, en materiales de la serie S, esto es, superaleaciones de muy baja maquinabilidad, y con alas de menos de 1mm de espesor.

En los que se refiere a estrategias de desbaste destacan estrategias de *Plunge Milling* para abrir ranuras entre álabes con herramientas suficientemente rígidas. También se puede recurrir a estrategias de tipo *Trochoidal*, para el desbaste de la mayor parte del material.

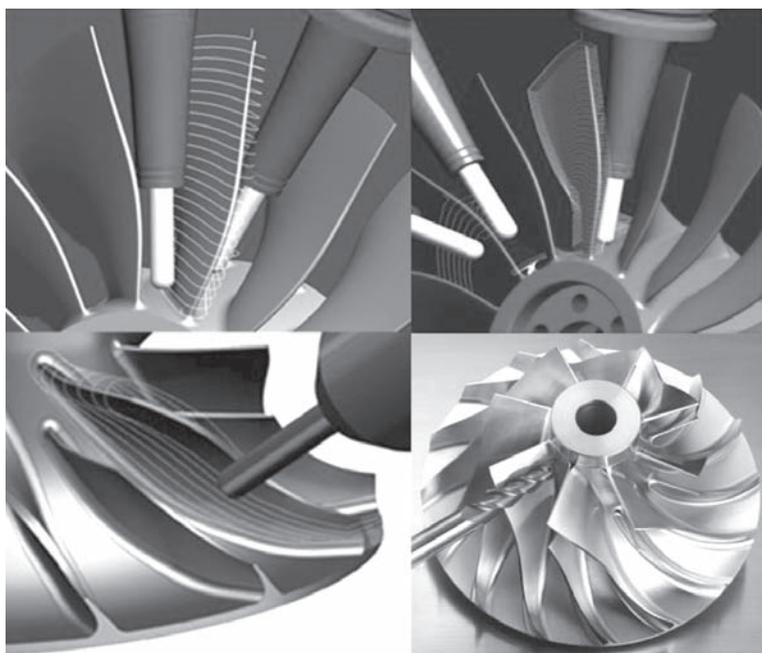


Figura 40: Estrategia de flank milling y de múltiples pasadas

En el proceso de acabado se distinguen dos tipos de estrategias posibles. Por un lado, a) la aplicación de múltiples pasadas en los casos en los que la superficie del álabe no sea una superficie reglada, y por otro lado b) la aplicación de Flank Milling a superficies regladas, siempre que sea posible. En este último caso se fresa con todo el flanco aprovechando la longitud de flanco total y manteniendo la inmersión radial. Esta última estrategia entraña más riesgos en el proceso de mecanizado, debiendo estar totalmente controlado el proceso de fresado, tanto estática como dinámicamente para evitar posibles flexiones de las herramientas, de las piezas o vibraciones en el proceso. Las estrategias basadas en múltiples pasadas demandan mucho más tiempo de fresado, pero implican un menor riesgo.

Fabricar piezas tipo blisks e impellers con elevada productividad y calidad, es objeto de varios proyectos europeos de I+D en el año 2014, a los cuales se dedican muchos millones de euros y dólares.

3.3.2 Engranajes especiales fresados en cinco ejes

En Argentina se reparan engranajes de gran módulo para diversos ingenios azucareros y minería. En alguna empresa existen máquinas de tallado por generación por fresa madre de gran módulo, de un gran valor industrial a la fecha de hoy. El mejor consejo que se puede hacer de estas máquinas es, cuídenlas, si hoy hubiese que adquirir una para esos valores de módulos, con CNC, se estaría hablando de varios millones de pesos.



Figura 41: Engranaje de grandes dimensiones de tipo espirocónico

Desde 2009 se ha avanzado en la dirección de dotar a los usuarios de fresadoras de cinco ejes, de software que permita generar la geometría de los flancos de engranajes de gran tamaño. La idea se resume en los siguientes puntos, siempre pensando en el engranaje especial, de gran tamaño, y que solo debe fabricarse en forma unitaria:

- El fabricante de la máquina oferta el software de diseño, esto es, un software que permite la definición de la geometría del engranaje. Se definen las superficies de los flancos de ataque y de retroceso, y por tanto se determina la forma de la ranura entre dientes.
- El engranaje no es más que la sucesión de esta ranura interdental en el número de dientes de la rueda dentada (z).
- La ranura se vacía programando la fresadora en un software CAM con funciones de 5 ejes.
- La fresadora realiza z veces la ranura, con la repetibilidad que ofrece la máquina, que a fecha 2014 es muy alta.
- Usando fresas adecuadas y controlando el desgaste, se llega a calidades de nivel industrial. Finalmente, los engranajes pueden ser cementados e incluso a terminados por fresado, o con turbina de aire o muela abrasiva.

Como se puede deducir de lo arriba indicado, la llave de este proceso es el software inicial que calcula la geometría de la ranura interdental y los flancos de los dientes. Para la máquina el proceso es simplemente ejecutar z veces la misma secuencia. La empresa DMG ofrece el software GearMill, otras han buscado otras programaciones. Por otra parte, la UPV/EHU ha desarrollado su propia solución utilizando software libre, junto a la empresa de fresadoras Ibarria. La posibilidad de fresar engranajes en las fresadoras de cinco ejes es un buen ejemplo de cómo se puede sacar partido a las máquinas a través de las herramientas informáticas.

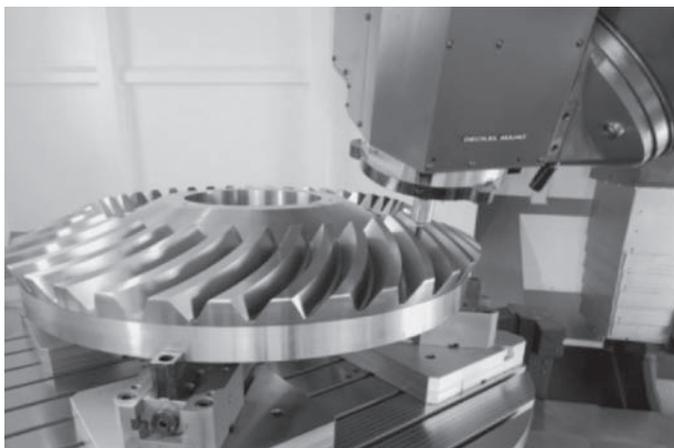


Figura 42: Fresado de un engranaje en una máquina de DMG-MoriSeiki

3.4 MÁQUINAS MULTITAREA

El cambio más significativo de este nuevo siglo ha sido la aparición en el mercado de máquinas multitarea, que son una suerte de híbrido de tornos y fresadoras. Estas pueden realizar ambos tipos de operaciones de forma similar, sin desmontar la pieza, y con todos los procesos realizados en forma sucesiva.

El multitasking es una tecnología que se ha extendido en los diez últimos años. Este crecimiento es impulsado por la necesidad de piezas más complejas y precisas. De hecho, los requisitos de las piezas parecen ser más exigentes cada día que pasa, posiblemente debido al extendido uso de los sistemas de diseño sólido 3D. Los cambios de diseño, de la estética y la especificidad de las piezas generan cambios en los procesos de fabricación aguas abajo. Es fácil encontrar piezas de torno con diseños que requieren procesos de fresado, y también piezas cuyo diseño se ajusta más a un centro de mecanizado, pero que a su vez requieren operaciones de torneado.

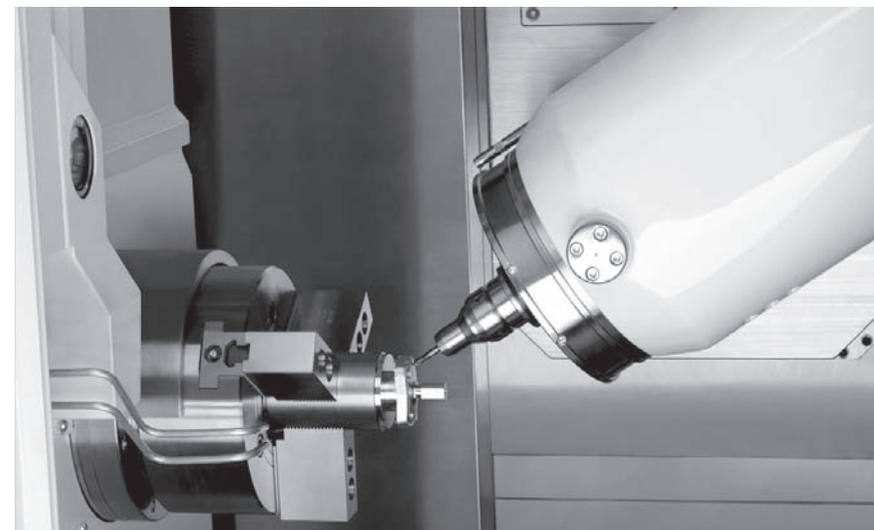


Figura 43: Las Mazak® Integrex: máquinas multitarea. Detalle del eje B

Las máquinas multitarea incorporan múltiples posibilidades de mecanizado, con grandes ventajas:

- Menos retrasos ya sean de máquina o humanos, los tiempos de espera se ven muy reducidos, ya que se da una secuencia continua de operaciones. Hay ejemplo de componentes mecanizados en este tipo de máquinas, habiendo reducido el tiempo de fabricación de 47 horas a unas 7 horas (600% de mejora).
- El espacio de trabajo generalmente se ve reducido a una simple configuración entre torretas y cabezales de mecanizado, que se mueven de una posición a otra en cues-

ción de segundos. Se reduce el espacio necesario para varias máquinas.

- La calidad de la pieza mejora considerablemente, ya que no está sometida a cambios de origen de referencia de cada programa de CNC. Toda la pieza se produce con un mismo cero de pieza. Esta es una gran ventaja de cara a asegurar las tolerancias de fabricación más exigentes.
- Las piezas a mecanizar puede diseñarse con todos los detalles desde un cilindro o bloque inicial, sin necesidad de ensamblar componentes. Es decir, la resistencia mecánica de los componentes puede ser mayor, se evitan zunchados, chavetas y otras uniones.

3.4.1 Tipos de máquinas multitarea

En las figuras sucesivas se observan diferentes máquinas Multitasking. En el caso de Nakamura, Mazak, WFL o MoriSeiki la configuración se asemeja más a un torno, en el cual se ha integrado un cabezal de fresado. Esta idea puede reflejar la procedencia desde la que se parte en su diseño. Pero cada vez es más difícil distinguir este origen y establecer una clasificación, y pueden ser considerados en general como máquinas multiteje.

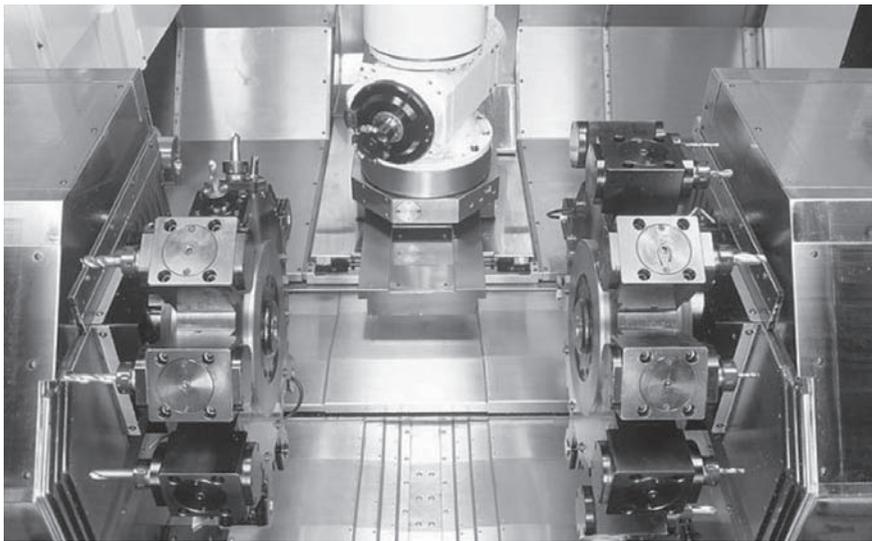


Figura 44: Super Multi-Tasking Machine STW-40, de Nakamura®.

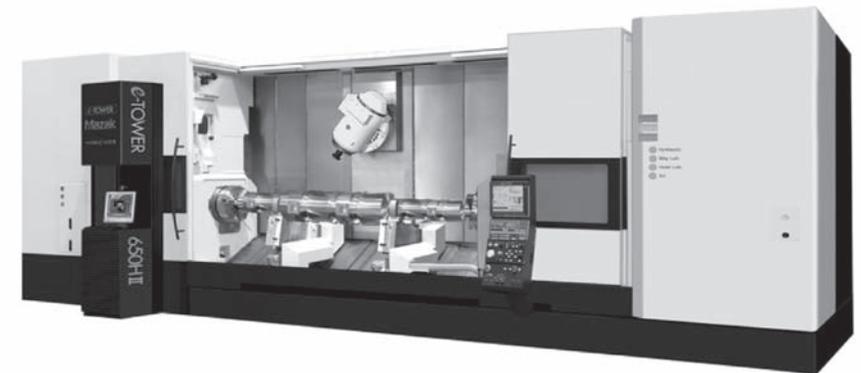


Figura 45: Concepto INTEGREX™ de Mazak.

La serie Integrex de Mazak es capaz de torneear, fresar, rectificar, tallar y mecanizar en 5 ejes simultáneos. La integración de procesos de mecanizado, supone enfrentarse a una célula completa de fabricación, en una sola máquina. La empresa WFL incorpora en sus modelos Millturn nuevas posibilidades integrables, como el Ultra High Pressure Coolant (UHPC) y la medición por ultrasonidos. Los procesos de taladrado profundo y de realización de cámaras interiores en piezas (alesado de forma), representan un punto especial en estas máquinas.



Figura 46: Modelo M120 Millturn de WFL®.

Tras la entrada en escena de estas máquinas en la primera década de los años 2000, el reto ahora es actuar para disminuir su precio, aumentar la sencillez de su programación, y mejorar su productividad. Pero este avance no es una moda o unas siglas, o una palabra en inglés.

No, la multitarea ha llegado para quedarse, revolucionando la tecnología, la mente de los diseñadores de máquinas y de los usuarios y hacer muy compleja la escritura de libros académicos. Simplemente clasificar los tipos de máquinas es tarea imposible. Igual que en aeronáutica el Concorde se retiró y la alta velocidad supersónica cesó en su desarrollo en la aviación civil dejando paso a transportar a más pasajeros a menos precio, en máquina herramienta la ultra alta velocidad ha parado su desarrollo para avanzar en el campo de la multitarea.

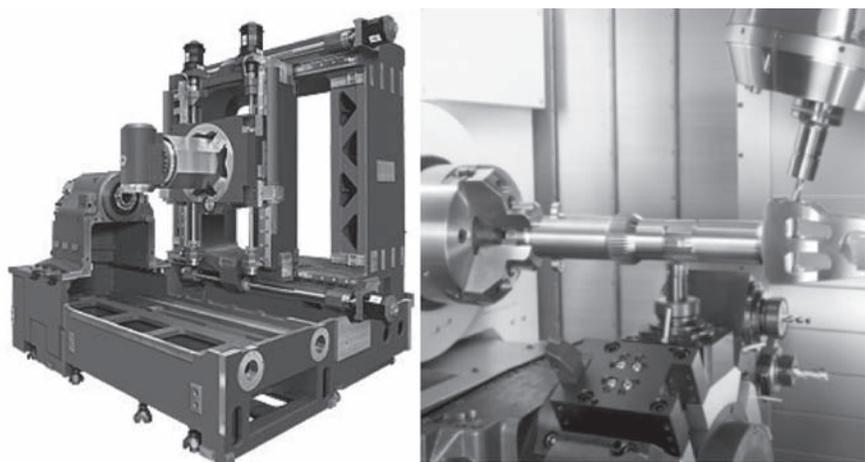


Figura 47: Máquina multitarea DMG-Mori Seiki® Serie NT sin carenado, y detalle de su operación.

En los productores españoles también se ha aceptado el reto de la multifuncionalidad. Así Ibarria está apostando con fuerza por este tipo de multiproceso, integrando en sus centros de mecanizado platos para torner, que permiten efectuar varias operaciones. No solo eso, esta empresa está comprometida con ayudar a sus usuarios en la tarea de desarrollar el proceso de mecanizado. Soraluze y Danobat, también han desarrollado este concepto, así como la empresa GMTK que nace en el País Vasco, precisamente para desarrollar la idea de la multitarea (ver Fig.48).



Figura 48: Máquina multitarea GMTK® Accuracer, del centro de fabricación avanzada aeronáutico de la UPV/EHU

3.5 MECANIZADO DE GRANDES PIEZAS

El mecanizado de grandes piezas es un gran reto, puesto que implica trasladar los niveles de precisión y fiabilidad asociados a cualquier componente, en una ventana dimensional mucho mayor. En un mercado mundial muy competitivo, los fabricantes se dirigen hacia la construcción de máquinas-herramienta para este tipo de piezas, ya que se requiere de una tecnología y valor añadido superiores a los de las máquinas CNC de tipo más universal o para más clientes similares. Componentes grandes se usan en minería, petróleo y gas, eólica, y en general en grandes bienes de capital, que pueden ser de gran interés en Argentina.

Sin embargo, los problemas habituales en máquina *pequeña* tienen un orden de impacto diferente en las máquinas *grandes*. El orden de magnitud de estas máquinas lleva también consigo un enorme riesgo de inversión en materiales, equipo humano y conocimiento de los procesos. Entre otros, pueden enumerarse los problemas siguientes:

- Las proporciones de los componentes de la máquina herramienta no pueden ser mantenidas, con lo cual la rigidez se reduce en forma comparativa.

- Las tolerancias de rectitud, alineamiento, etc. cambian.
- Las deformaciones térmico-volumétricas, tanto en pieza como en máquina son muy grandes y no simétricas.
- Tiempos largos de producción y de manipulación de la máquina (puesta a punto, centrado, etc.). Simplemente poner "en ceros" una gran pieza de varias toneladas es un trabajo arduo y que requiere muchos minutos.

Las piezas objetivo pertenecen a prácticamente todos los ámbitos industriales: propulsión marina, generación de potencia, industria petrolífera, son sólo algunos ejemplos de nichos nítidos para estos componentes. Aunque la definición de pieza grande es algo ambigua, suele referirse con este nombre a piezas de varias toneladas, comparables al peso de una máquina convencional. Como media, se puede hablar de piezas del orden de 5t y diámetro a partir de 1000 mm en adelante.

Un ejemplo de este tipo de máquinas es el torno de Gurutzpe A2000-4G, mostrado en la Fig.49 y capaz de soportar piezas de hasta 35t.



Figura 49. Torno A2000-4G de Gurutzpe®

Para empezar, la fundación de estas máquinas requiere sistemas especialmente diseñados, siendo un requisito fundamental de diseño por su contribución a la rigidez de la misma. En este sentido, la principal limitación para incrementar la rigidez de los cimientos de la máquina será el costo de construcción. En cuanto a los materiales utilizados en la estructura de estas máquinas, la fundición gris suele ser el material escogido, con las opciones de fundición dúctil o hierro fundido para algunas partes críticas. Sin embargo, existe también una tendencia hacia el uso de materiales alternativos como la estructura mecanosoldada, principalmente por razones de costo, plazo de entrega y peso. El proceso de fundición es más lento y puede dar más problemas para componentes de grandes dimensiones.

En cuanto a la configuración de los ejes y movimientos, la tendencia clara es a localizar todos los grados de libertad posibles sobre el cabezal de corte de la máquina, manteniendo

la muy pesada pieza fija. De otra forma, la dimensión requerida para la máquina doblaría el tamaño de la pieza, lo cual es muchas veces irrealizable. Además, el componente sería difícil de mover de forma precisa y económica.

Tabla 3: Características generales de un torno de gran envergadura

CARACTERÍSTICAS GENERALES		PROPIEDADES DE RIGIDEZ ESTÁTICA (MEDIDA EN PUNTA DE HERRAMIENTA)	
Diámetro pieza x longitud [mm]	∅ x L = 1.700 x 5.000	kx [N/μm]	70
Cabezal [rpm]	0 – 500		
Longitud [mm]	9.250	ky [N/μm]	90
Potencia [kW]	88		
Par [Nm]	30.000	kz [N/μm]	115

Así las configuraciones más típicas en fresadoras son las de columna móvil y puente (gantry). Las máquinas de columna proporcionan la mayor libertad desde el punto de vista de la manipulación. En cuanto a la rigidez estática, las columnas móviles son más flexibles, mientras que la estructura pórtico o puente es más rígida y dinámica.

La deformación estática debido al peso propio puede compensarse mediante correcciones en el CNC, en función de las posiciones que ocupan los ejes en cada momento. La deformación angular, debido al peso propio de las partes móviles, también es un punto importante. La Tabla 3 muestra valores de rigidez orientativa en una máquina tipo columna móvil multi-proceso, a partir de los ensayos por elementos finitos, realizados empleando los planos del fabricante.

En el mecanizado de piezas grandes, la mayor clave reside en desarrollar todo el trabajo posible en un único amarre de la pieza. Es por ello, que los tornos suelen llevar incorporados cabezales con capacidad para fresar. Las fresadoras como norma general ofrecen cambio de cabezales y opción de cinco ejes o 3+2.

Bajo esta perspectiva, el mundo del fresado y el torneado, tradicionalmente estancos entre sí, se estrechan cada vez más, por lo que puede hablarse casi indistintamente de tornos que fresan o de fresadoras que tornan. La línea roja entre ambas estará en la potencia del cabezal fresador o del plato de toronar. Para estas máquinas, el plato de un torno, como el de la figura anterior, puede sobrepasar ampliamente los 100 kW de potencia.

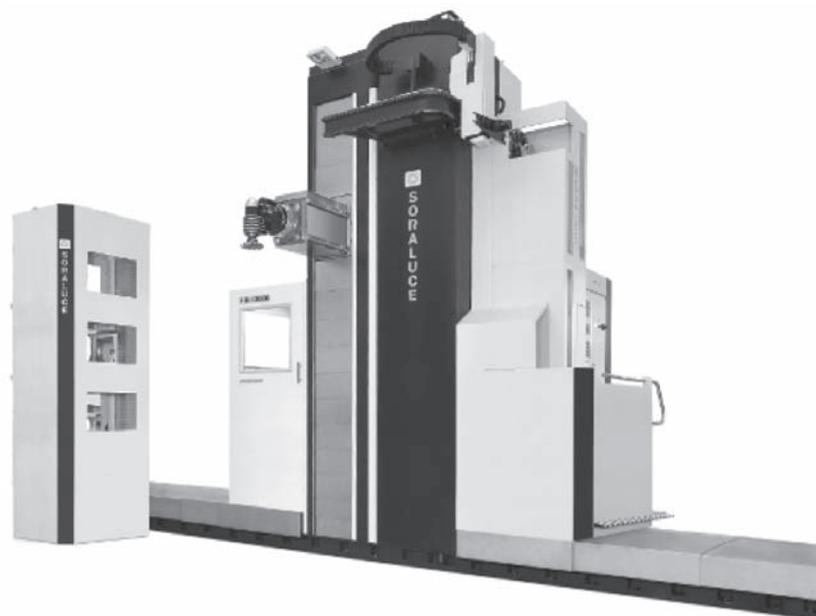


Figura 50: Fresadora-alesadora FR de Soraluce®

A modo de ejemplo, el centro de fresado-alesado Soraluce FR que puede llegar a carreas en X de 30m, puede incorporar un gran abanico de opciones y accesorios, tales como diferentes cabezales de fresado-alesado, sistema de caña modular, de cambio automático de cabezales, de cambio automático de herramientas, placas base, escuadras, mesas auxiliares, mesas giratorias y rototraslantes, y muchas otras opciones especiales.

Las piezas producidas en estas máquinas son componentes de gran valor añadido, por lo que se necesita la máxima fiabilidad. Este requerimiento implica el uso de sistemas de control y medida capaces de cumplir con las tolerancias dimensionales requeridas. Las grandes máquinas deben verificarse y calibrarse de forma periódica, corrigiendo por control numérico los errores detectados.

La precisión de las máquinas-herramienta se debe a errores que pueden dividirse en estáticos y dinámicos. Entre los estáticos, se puede hablar de errores cinemáticos (desalineamientos de las guías, falta de rectitud, etc.), flexiones y deformaciones debidas al peso propio o al de la pieza, o movimientos de la fundación. Entre los dinámicos, los más importantes son los errores termo-mecánicos, efectos de cargas dinámicas durante el corte, o la falta de precisión en el control de la trayectoria. Todos los efectos anteriores pueden afectar a los componentes de la máquina, y provocar desviaciones en la posición final y orientación de la herramienta, siendo el error por cargas térmicas y el debido a los pesos propios, aquellos de mayor peso relativo, en relación al error geométrico.

Para tener bajo control el error geométrico, se han aplicado diversas técnicas y métodos directos e indirectos. Los primeros analizan todos los errores de los ejes de forma separada e independientemente de la cinemática de la máquina, y del movimiento del resto de los ejes. Pueden clasificarse en métodos basados en estándares, en dispositivos láseres o multidimensionales (barras telescópicas), o también métodos basados en la gravedad (niveles). En ellos, la función de aproximación del error obtenido en una zona, no puede ser extrapolado directamente al resto del espacio de trabajo. Son métodos que llevan mucho tiempo, y tienen grandes limitaciones, especialmente para máquinas grandes, donde las deformaciones térmicas son muy importantes, y se requieren verificaciones rápidas.

Los indirectos producen una corrección global de errores en todo el espacio, y requieren de mucho menos tiempo. Se basan en un movimiento multieje de la máquina durante el análisis, y corresponden a métodos basados en artefactos, o en sistemas láser tracer. Por ejemplo, la Fig. 51 muestra un dispositivo de tipo tetrahédrico para la medición de error entre ejes. La corrección es fácil de entender: se obliga a la máquina a palpar la geometría definida, y entre las medidas reales, y las que la máquina-herramienta calcula, se determina la corrección. El láser tracer realiza el seguimiento de un espejo en la punta de la herramienta, y por triangulación múltiple se calculan los errores.



Figura 51: Artefactos 3D para mediciones de error entre ejes y Láser Tracer de la empresa Etalon®

El INTI dispone en su centro regional Córdoba de un Láser Tracer, para poder realizar la calibración de grandes máquinas, tecnología y equipo que está en pleno apogeo en Europa.

4. SOFTWARE DE APOYO AL PROCESO DE MECANIZADO

Uno de los mayores desafíos de las máquinas actuales, reside en la complejidad de programación del código de control numérico. Estas máquinas, se programan en códigos G, pero para su redacción se hace uso de un software denominado CAM. Esta es una herramienta de computadora, la cual, a partir de la geometría a mecanizar, define las trayectorias de la herramienta. Tras esta etapa se traduce el fichero de trayectorias al lenguaje de una máquina en concreto (operación de postprocesado). La máquina y su control siguen permitiendo la programación manual directa, pero está suele solamente utilizarse para realizar pequeñas modificaciones de los programas, o realizar comprobaciones en el taller. Debe pensarse que la programación de códigos G tradicional de control numérico se basa en el estándar generado en los 70 para programar con cinta perforada; por tanto en 2014 se encuentra superado por la complejidad y capacidad de las máquinas.

A la hora de elegir un software CAM para trabajar en cinco ejes o en máquinas multi-tasking, hay que tener en cuenta algunos factores como los siguientes:

- Capacidad de trabajar con todo el potencial de la máquina, y no tenerla infrutilizada en sus funciones.
- Posibilidad de operar con máquinas y mecanizados más complejos. Se entiende que entrar en el campo del fresado en cinco ejes y la multitarea es comenzar un viaje hacia la producción de piezas de mucho valor añadido.
- Capacidad de simular y representar la máquina, que junto al programa de CNC permitirá ejecutar virtualmente el mecanizado, evitando toda clase de colisiones e interferencias durante el proceso real.
- Proporciona el postprocesador para la máquina o facilita su definición. En tres ejes es casi un mero traductor de lenguaje, pero en máquinas complejas, deben resolverse problemas de interpolación de ejes muy complicados.

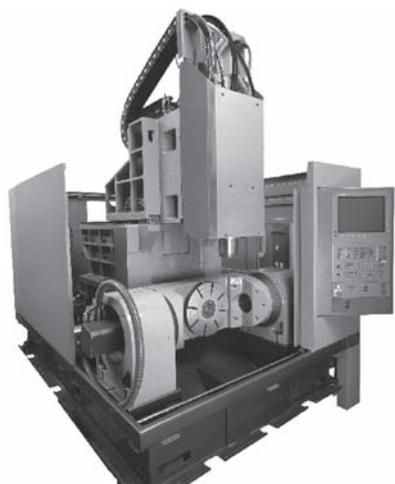


Figura 52a: Verificación de mecanizado en 5 ejes en un centro de mecanizado Ibarria, máquina real.

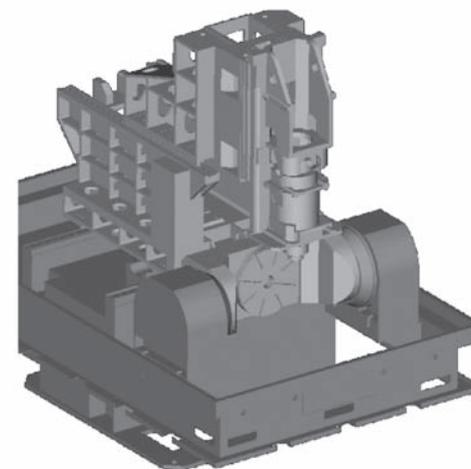


Figura 52b: Verificación de mecanizado en 5 ejes en un centro de mecanizado Ibarria, máquina virtual.

Por tanto podemos decir que a nivel filosófico el software CAM es el “*centro de gravedad*” de la producción actual, con una buena oferta de software como ser ESPRIT, UGS NX, MASTERCAM, GIBBSCAM, POWERMILL, EDGE CAM, TOPSOLID, HIPERMILL, ICAM, CIMATRON, etc. Casi todos los CAM disponibles, resuelven las funciones y necesidades comunes de un mecanizador medio.

Por otro lado, este tipo de software continúa en desarrollo ascendente, gracias a la incorporación en sus últimas versiones del módulo de simulación de la operación en máquina. Esta función proporciona al usuario la posibilidad de programar el postprocesador de su máquina (traductor al lenguaje CNC y adaptador a las características de las máquinas), que luego puede utilizar para postprocesar los programas de CAM y posteriormente simularlos, dando un paso más hacia la simulación en su “máquina virtual”, antes de realizar el proceso en la máquina física.

En entornos donde se utilizan máquinas convencionales y los empresarios todavía dudan de si emplear máquinas CNC, el uso de software CAM avanzado puede parecer ciencia ficción. Pero es una realidad que las empresas que aspiran a tener futuro y dedicarse a negocios del mecanizado, van a tener que pasar por este camino. Podríamos hacer una comparación con otros sectores, por ejemplo hay personas que todavía no usan teléfono móvil, y sus hijos no pueden vivir sin su Smartphone, pues el salto puede ser de este tipo.

5. INTEGRACIÓN DE OTROS PROCESOS EN MAQUINA

Además de operaciones de mecanizado que como dijimos dan origen a la idea de multitarea, existen otras funciones que se integran en las nuevas máquinas, entre ellas el uso de láser, sistemas de bruñido y de sistemas de medición. Este último concepto se conoce como metrología in-process.

5.1 METROLOGÍA IN-PROCESS

Conocer en qué condiciones está trabajando una máquina-herramienta en tiempo real, ha sido siempre un sueño compartido, tanto por el usuario de la máquina como por su fabricante. Teniendo datos en tiempo real del proceso, se podría plantear aumentar la productividad, la precisión, la calidad del acabado, o reducir el consumo energético, según las prioridades de cada momento concreto.

La industria está demandando soluciones para evitar piezas defectuosas en las etapas finales de producción, soluciones capaces de predecir defectos antes de que se generen, y sistemas de reacción inmediata capaces de actuar sobre estos defectos generados una vez producidos, todo ello sin tener que esperar a la fase final de control. Con este fin, la demanda se centra en nuevas soluciones flexibles que permitan la *inspección on-line* de los productos, esto es, durante el proceso de fabricación. Es decir, se sigue la máxima de "la calidad se produce, no solamente se controla al final". Existe una clara necesidad de desarrollar nuevos métodos de control de calidad, que eviten la generación de los defectos en el momento mismo que el producto se está fabricando.

Actualmente para poder llevar a cabo la metrología in-process, se dispone por un lado con la utilización de la sonda integrada en la propia máquina para la medición de la pieza. Sin embargo esta solución mantiene los errores inherentes a la máquina, pareciendo más lógico la incorporación de un sistema de medición cuya referencia sea externa a la máquina. En la tecnología de rectificado ya existen sistemas de empresas como Marposs. Entre otras cosas, esta empresa comercializa sistemas de control y medición on-line para rectificadoras, permitiendo la posibilidad de controlar los parámetros de la máquina, así como la medición de la pieza, mientras está siendo mecanizada y no solo una vez finalizado el proceso.

Por otro lado también existen redondímetros in-process para las rectificadoras. Este tipo de dispositivos ayudan a medir y eliminar las variaciones en tolerancia debidos al desgaste de las muelas de rectificado, a la fluctuación térmica de la pieza, y a la inestabilidad del refrigerante. Los resultados de la monitorización in-process para rectificado incrementan significativamente la calidad, y reducen los tiempos de ciclo, mejorando notablemente el proceso de fabricación.

Renishaw y Heidenhain ofrecen un conjunto de sondas inalámbricas con comunicación por infrarrojos o radio, que pueden ser colocadas en los portaherramientas y dispuestas

en los almacenes de las propias máquinas como una herramienta más, y actuar midiendo durante el proceso de fresado. Estas sondas permiten varias funciones interesantes:

- Verificar la existencia de agujeros antes de su roscado. Podría darse el caso de que la broca se hubiese roto y el roscado posterior sería imposible.
- Medir magnitudes básicas sobre la pieza, para comprobar que el mecanizado sigue siendo correcto.
- Y las sondas permiten obtener la posición y referencia de la pieza en la programación de control numérico, disminuyendo el tiempo de preajuste (setup) de producción y aumentando la precisión del proceso global.
- Las sondas no eliminan el control posterior en la sala de metrología, dado que la medida final siempre se debe hacer en entornos desvinculados de los medios de producción para evitar las fuentes de error del mecanizado y de máquina en el proceso de medida. De hecho Henry Maudslay (alrededor de 1800) considerado el abuelo de casi todas las máquinas-herramienta, también inventó el micrómetro entre otras cosas, y lo denominó *Lord Chancellor*, que en la corte inglesa era el noble que ejercía de fedatario y daba por buenas las decisiones reales.

En el caso de las máquinas multitasking podríamos pensar en soluciones en la misma línea, u otras más avanzadas como las que ofrece la empresa Faro Technologies®, que comercializa el Faro Gage, un brazo articulado con encoders de precisión. Este brazo, colocado en cualquier etapa del proceso productivo, proporciona datos referentes a la calidad dimensional del componente. Se trata de un sistema portátil, rentable, para medición en 3D y que requiere un mínimo entrenamiento para los usuarios.



Figura 53: Sondas de contacto inalámbricas de Renishaw®

Un dato sobre el uso intensivo de estos sistemas de sonda inalámbricas en la industria actual es que todas las máquinas del taller de la escuela de Ingenieros de Bilbao disponen de ellas, y los alumnos las usan como si fuesen esenciales en el taller.

5.2 LÁSER

Ya se ha comentado en un apartado anterior la importancia creciente de la fabricación aditiva. Sin embargo el mecanizado sigue y seguirá siendo el proceso finalista, tras la aportación de material se debe mecanizar para generar formas con precisión. La aportación suele utilizar un láser de fibra que funde polvo o hilo aportado sobre la pieza. Esta tecnología permite generar recubrimientos duros localizados en zonas sometidas a desgaste (de ahí el nombre *laser cladding*, del inglés capa) e incluso la reparación de zonas ya desgastadas. Además, es posible generar piezas cercanas a la forma final lo que permite la obtención de piezas con un ahorro en costos de material de hasta un 40%.

En las últimas EMO ya se comienza a ver fresadoras que incorporan sistemas de láser para aporte. La integración de los dos procesos (aportación láser y mecanizado) en una sola máquina hace posible la obtención de piezas acabadas en un solo paso y con un ahorro en costos sustancioso. La incorporación de estas tecnologías a una sola máquina supone la integración de más procesos, una apuesta más allá del Multitasking hasta el Multiprocess, y el mayor número de procesos posible bajo la coordinación de una misma máquina. Un reciente ejemplo ha sido el lanzamiento de la fresadora-aportadora por láser LUMEX 25 de Matsuura.

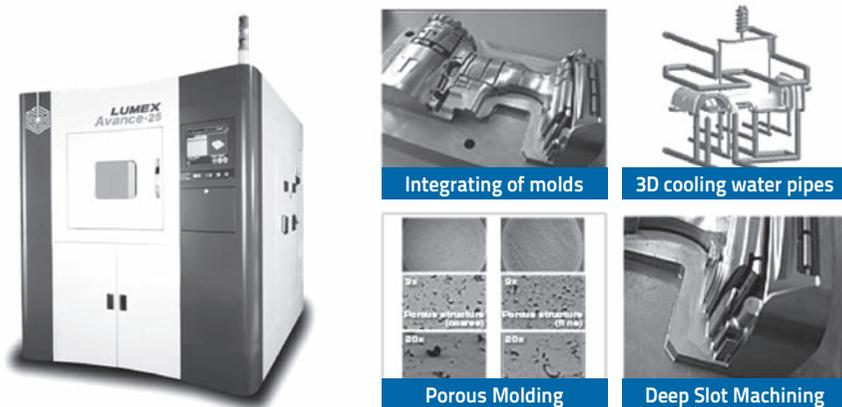


Figura 54: LUMEX 25 de Matsuura®

5.3 BRUÑIDO

El principio del bruñido hidrostático por bola, ilustrado en la Fig. 55, está basado en un muelle hidrostático. El elemento clave del sistema es la bola cerámica, que soportada hidrostáticamente gracias a la presión de la bomba, presiona las crestas de mecanizado aplastándolas, logrando así una mejora en la rugosidad. La presión es suministrada por una bomba hidráulica que se alimenta de su propio depósito de emulsión, y es capaz de

bompear a una presión de 20 a 40MPa. La bomba se coloca junto a la máquina de mecanizado, sobre la que se monta el equipo de bruñido

En este sistema la fuerza normal solo depende de la presión de la bomba. Además, la bola tiene un movimiento libre de 10 mm que ayuda a absorber errores en las piezas, y facilita asimismo la programación del proceso de acabado.

La técnica de bruñido hidrostático puede emplearse en superficies cilíndricas, superficies planas, superficies de forma o perfiladas, superficies cónicas, biseses, respaldos, cambios de sección, etc.

El aplastamiento provoca cuatro efectos sobre la superficie:

- Reducción de la rugosidad superficial en más de un orden de magnitud. El acabado final es del orden del rectificado, esto es, pulido casi a espejo.
- Generación de tensiones residuales de compresión en la superficie de la pieza, lo cual es beneficioso de cara al comportamiento a fatiga del componente. Además, la ausencia de calor evita cambios metalúrgicos.
- Aumento de la dureza superficial entre 30%-60% (HBN), partiendo de niveles propios de aceros comunes, es decir, 180-250 HBN.
- Permite mantener las tolerancias dimensionales (<0.01mm), por ejemplo en agujeros bruñidos. El bruñido ha sido siempre clásico en el acabado de cilindros de motores o sistemas neumáticos e hidráulicos. No confundir el bruñido (*burnishing*) con el *honing* que se realiza para un efecto parecido, este último se realiza con piedras y también en acabado de cilindros.

Este proceso se realiza en la misma máquina que hace el mecanizado, dado que la cabeza de bruñido tanto se coloca en el portaherramientas de torno como de fresadora. Esto implica una reducción de tiempos debido a la eliminación del traslado de piezas, además no supone grandes inversiones en una nueva maquinaria.

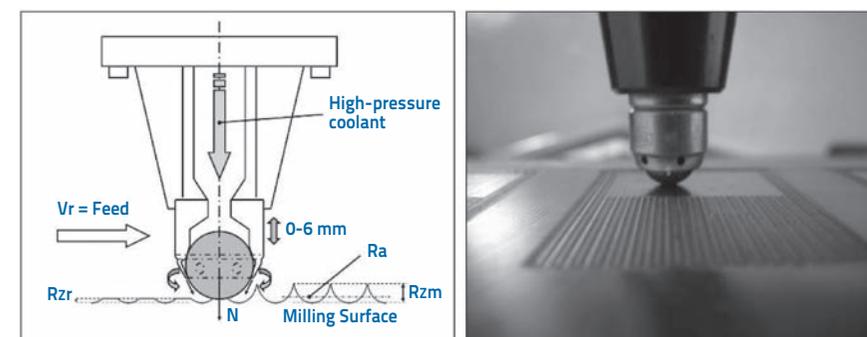


Figura 55: Principio de bruñido hidrostático con bola. Detalle de la bola (Dcha)

La principal limitación de este proceso es geométrica, dado que el ángulo entre la normal a la superficie bruñida y el eje de la herramienta debe estar comprendido en $\pm 28^\circ$ para que la bola este en contacto y se evite el choque lateral de su receptáculo. Dentro

de este intervalo la fuerza normal permanece aproximadamente constante. En el caso de piezas con superficies complejas las pendientes normalmente superan este rango. Es este el motivo principal, por el cual se aborda la posibilidad de realizar el bruñido en 5 ejes, como se muestra en la Fig.56.

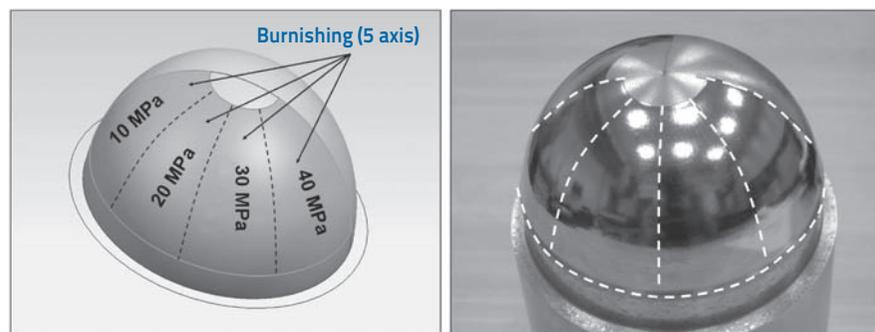


Figura 56: Esquema de los ensayos de bruñido continuo realizados. (Dcha.) Pieza ensayada.

El acabado final se puede ajustar en función de la dureza, la presión y el paso radial del bruñido, llegando a muy buen acabado, como se puede ver en la Fig. 57.

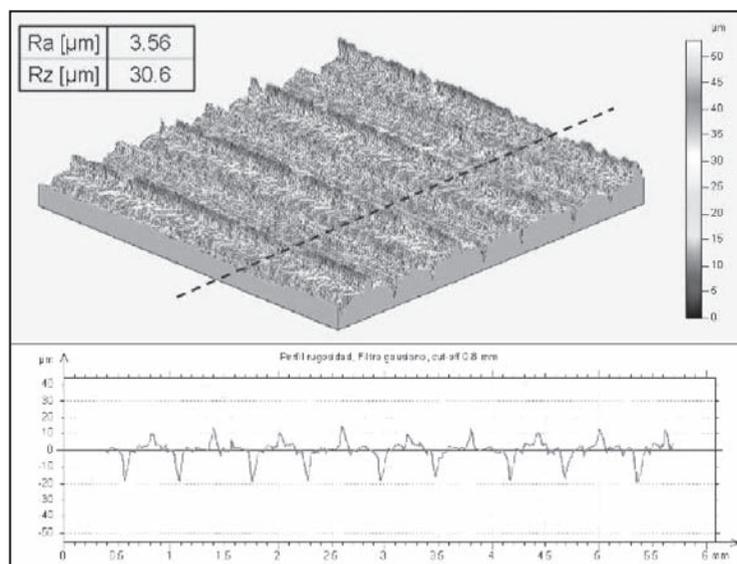


Figura 57a: Topografía y perfil de rugosidad de la superficie fresada.

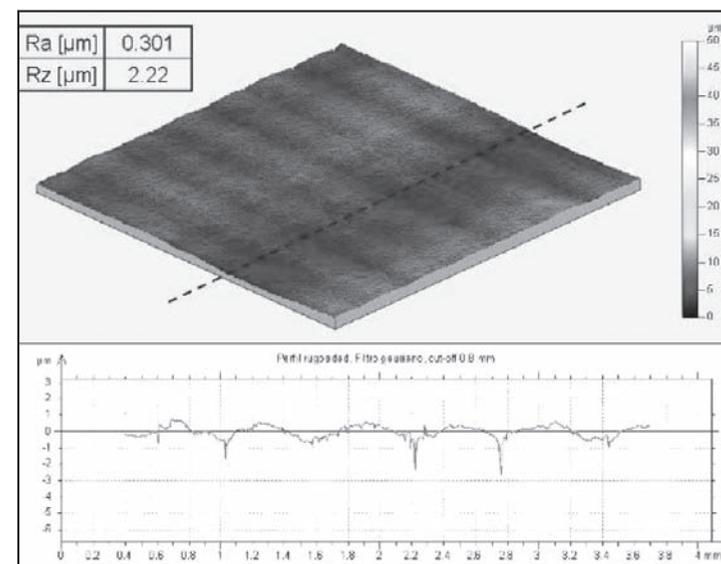


Figura 57b: Topografía y perfil de rugosidad de la superficie después de ser bruñida.

En la tabla se observan algunos resultados conseguidos en una campaña de ensayos realizados en la UPV/EHU, llegando a superacabados que además implican un aumento de dureza de la superficie.

Tabla 4: Acabados por bruñido sobre acero de 290 HBN, a diferentes presiones

PROCESO	PRESIÓN	R _A [μM]	R _Z [μM]	DUREZA [HBN]
	-----	2,07	10,50	261
Bruñido	10 MPa	0,40	1,68	308
	20 Mpa	0,20	0,98	328
	30 Mpa	0,29	1,82	342
	40 Mpa	0,33	2,64	351

Los sistemas hidrostáticos son muy interesantes, pero existen otros más sencillos orientados a ser utilizados en tornos incluso convencionales, que se fundamentan en un sistema mecánico de resorte. Este muelle, al cargarse contra la pieza, produce la presión necesaria. El sistema de bruñido es un disco o rodillo de metal duro, siendo denominado este proceso *Rolling* o Rulado. Este sistema no necesita bomba exterior, y produce un efecto de superacabado de múltiples beneficios en la pieza final.

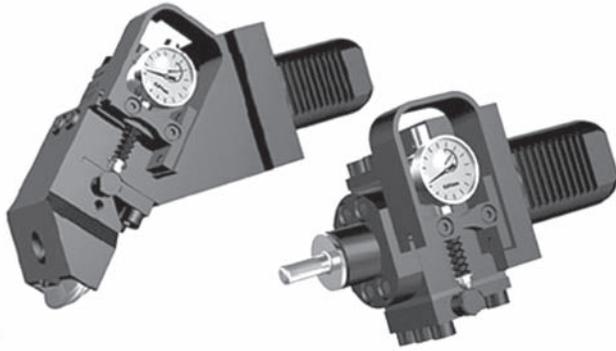


Figura 58: Sistema de Rolling, de ECOROLL®

5.4 TALADRADO POR FRICCIÓN

El taladrado por fricción (llamado *Flow Drilling - Friction Drilling - Form Drilling*) es un método no convencional para la generación de agujeros en tubos, chapas, y piezas de poco espesor. Una de las características de este proceso es que la herramienta rotativa empleada carece de filos de corte, estando su geometría definida básicamente por dos secciones distintas: una superficie cónica a la entrada, y otra cilíndrica más atrás.

El proceso emplea el calor generado por la fricción entre la parte cónica de la herramienta y la pieza, lo que provoca un ablandamiento del material, permitiendo penetrar en él, y generando a su vez una rebaba en la salida del agujero. La parte cilíndrica es la encargada de definir el diámetro final del agujero.

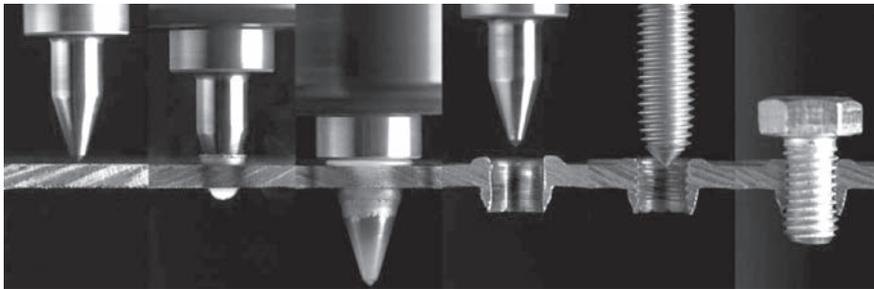


Figura 59: Proceso completo de friction drilling y roscado por laminación (foto Zecha®)

De esta manera, las ventajas que ofrece este proceso frente a un taladrado convencional son:

- En un proceso de taladrado tradicional con mecha se hace necesario el empleo de

refrigeración con el fin de reducir la fricción y el calor generado, justo lo contrario de lo que pretende esta técnica. Por lo tanto el taladrado por fricción se convierte en un proceso limpio.

- La rebaba generada es susceptible de ser roscada por macho de laminación, lo que permite eliminar el empleo de tuercas soldadas. Esta aplicación cobra gran interés cuando se trata de hacer agujeros roscados en piezas tubulares o con geometrías complejas, que no permitan un fácil acceso. Se realiza una unión roscada sin tuerca. Esta técnica se conoce y aplica de forma sistemática en casos de muebles de oficina y otros materiales. En estas aplicaciones se taladra y rosca habitualmente con brazos roscadores, pero también puede ejecutarse en centros de mecanizado. En los últimos cinco años se está comenzando a aplicar en dos nuevas direcciones:
 - Tuberías de acero inoxidable, especialmente en tipo austenítico. En la actualidad la técnica está depurada totalmente.
 - Aceros de alta resistencia, AHSS, hoy día en fase de experimentación.

Hay varios fabricantes de cabezas de taladrado, entre ellas: Formdrill, Flowdrill, Somex, Zecha, Centerdrill, Ontool y mucho fabricante local dado que la técnica está fuera del tiempo de patente. Las herramientas empleadas son de metal duro, esto es carburo de tungsteno con matriz de cobalto. Es posible la aplicación de recubrimientos a la herramienta para incrementar la resistencia al desgaste, disminuir el coeficiente de fricción y modificar la conductividad térmica.

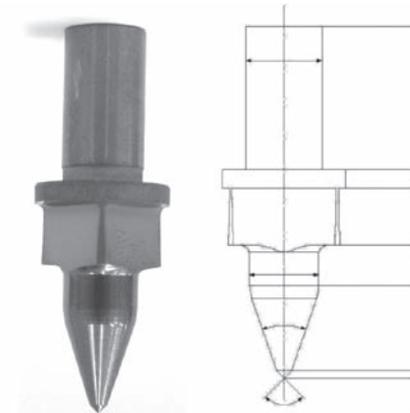


Figura 60: Diseño de la herramienta de taladrado por fricción

En la UPV/EHU se han realizado trabajos basados en la experimentación de distintos tipos de recubrimientos. La geometría de la herramienta de taladrado está dividida en 6 secciones, como se puede apreciar en la Fig. 60, que de la punta hacia el mango se denominan:

- Zona de centrado: es una superficie cónica definida por un ángulo de valor elevado

ya una altura reducida, para dotar de mayor robustez a esta zona de la herramienta. Se trata de la superficie que contacta primeramente con el material, donde se generan los mayores esfuerzos axiales del proceso y la generación de calor, como consecuencia de la fricción.

- Zona cónica: esta superficie de la herramienta tiene un ángulo más agudo que la zona de centrado. La herramienta en esta zona, como consecuencia del giro, fricciona con el material de la pieza, produciendo calor para facilitar la deformación del material. Combinando este fenómeno, con el movimiento de avance, permite penetrar y generar la rebaba.
- Zona cilíndrica: esta sección determina el diámetro máximo del agujero y la longitud de la zona cilíndrica de la rebaba.
- Zona del rompevirutas: consiste en una región de sección triangular que al contacto con el material, lo deforma previamente a arrancarlo. De esta manera se elimina el material que ha fluido hacia la parte superior de la pieza, proporcionando así una mejor superficie final.
- Zona del apoyo: proporciona una superficie de apoyo contra la pinza del portaherramientas o contra el portaherramientas directamente, e impide el desplazamiento axial de la herramienta.
- Zona del mango: consiste en una superficie cilíndrica. Su finalidad es permitir la sujeción de la herramienta de taladrado al husillo de la máquina, a través de un portaherramientas.

En la Fig. 61 se recoge el esfuerzo y el momento axial que se realiza en el proceso de taladrado, sirviendo la figura de apoyo para describir el proceso:

- O-A: la zona de centrado de la herramienta fricciona con la superficie de la pieza al mismo tiempo que avanza por lo que la fuerza de empuje se incrementa. Se alcanza el máximo de la fuerza de empuje cuando por el aumento de la temperatura del material en contacto con la herramienta, disminuye la resistencia a ser deformado.
- A-B: a medida que se avanza, aumenta la superficie de contacto entre la parte cónica de la herramienta y la pieza. Esto provoca un aumento de la fricción entre ambas superficies, originando un incremento del par.
- B-C: la zona cilíndrica de la herramienta, entra en contacto con la parte de la rebaba de mayor espesor, lo que produce un leve incremento de la fuerza de empuje y un aumento rápido del par.
- C-D: el par disminuye cuando la zona cilíndrica de la herramienta comienza a deformar la región de la rebaba de menor espesor. La fuerza de empuje también experimenta un descenso progresivo.
- D-E: esta región corresponde con la zona de rompevirutas de la herramienta. La viruta superior es aplastada por la herramienta al mismo tiempo que es arrancada, como consecuencia se experimenta un incremento en el valor, tanto del par como del esfuerzo axial.
- E-F: esta región comprende el retroceso de la herramienta. La fuerza de empuje

disminuye rápidamente hasta cero aunque existe una ligera fricción entre pieza y herramienta, como se refleja en el momento axial medido.

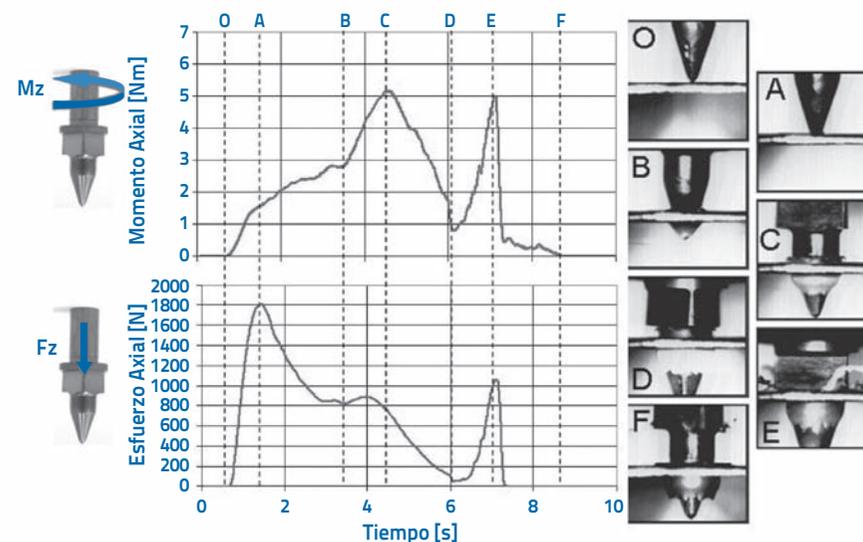


Figura 61: Evolución del momento y esfuerzo axial en el taladrado por fricción

A través de la experimentación se observa un incremento tanto de la fuerza de empuje como del par, cuando el espesor de la pieza aumenta. Esto se debe a que el volumen de material a reblandecer y la resistencia a la deformación aumentan con el espesor, lo que conlleva el incremento de las fuerzas de empuje. En cuanto al momento axial, el área en contacto entre la parte de la rebaba y la herramienta es mayor, generando fuerzas de fricción más altas.

Para un espesor de pieza y velocidad de rotación constante, al incrementar el avance, las fuerzas de empuje también son mayores. Esto se debe a la disminución del tiempo de contacto entre pieza y herramienta. Se genera menos calor para ablandar el material. Así mismo, cuando se incrementa la velocidad de rotación, manteniendo el avance constante, el valor de las fuerzas de empuje y del par disminuyen.

6. OTROS PROCESOS DE INTERÉS Y APLICACIONES

En este apartado se indicaran algunas aplicaciones que pueden ser interesantes para el lector o que fueron objeto de conversaciones durante la misión del experto en el norte de Argentina.

6.1 EL TORNEADO DURO

En el torneado duro (en inglés *hard turning*) se trata de tornear con herramientas de PCBN piezas de acero ya templado, sustituyendo de esta forma a operaciones de rectificado. La principal ventaja es que el torneado es una operación cuya trayectoria es absolutamente controlable, ejecutada con una herramienta de contacto casi puntual, pudiéndose perfilar las piezas casi sin limitaciones geométricas. Una aplicación típica de este proceso son las pistas de rodamientos, aunque el torneado duro también ha penetrado en el sector de componentes de automoción, concretamente en el acabado de ejes de cajas de cambio.

La profundidad de pasada (entre 0,05-0,2 mm) y el avance por revolución (entre 0,05-0,1 mm) a utilizar son reducidos, con objeto de conseguir una rugosidad dentro de una especificación final muy estricta. La velocidad de corte es moderada (entre 110-160 m/min), para que la herramienta pueda durar más de 30 minutos. Se mecaniza en seco, como se ve en la figura.

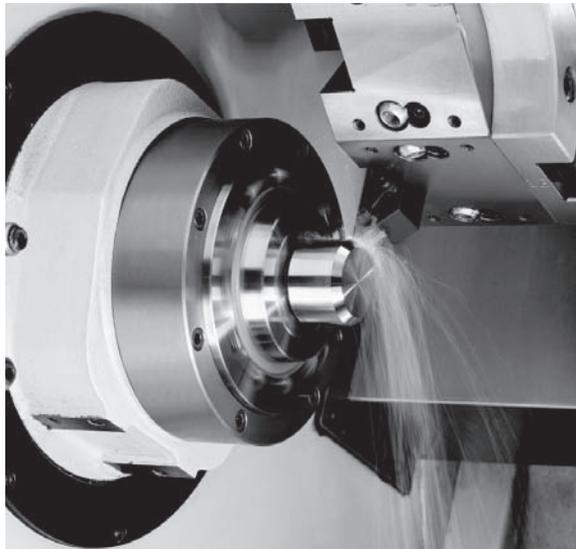


Figura 62: Torneado duro en un torno Hardinge®

Las fuerzas de corte sobre aceros templados son muy elevadas, especialmente la fuerza radial. Por tanto la pieza debe ser rígidamente amarrada, existiendo platos de 9 garras para mejorar la concentricidad del amarre, y también los platos magnéticos. Dado que se trata de sustituir al rectificado, operación que busca obtener una elevada precisión, el torno debe ser capaz de permitir obtenerla. Por este motivo los tornos dedicados a este proceso deben ser especialmente rígidos y estables, ante deformaciones de origen mecánico y térmico.

El principal problema del torneado en duro es la forma en hélice del acabado final, que es una rosca a todos los efectos. Su eliminación es objeto de varios desarrollos actuales, como el mostrado en la Fig.63.

En Argentina hay empresas que tornean discos templados a 70 HRC con insertos de PCBN, en tornos convencionales con reglas, pero indudablemente un torno muy rígido dotado de control numérico sería la solución óptima.

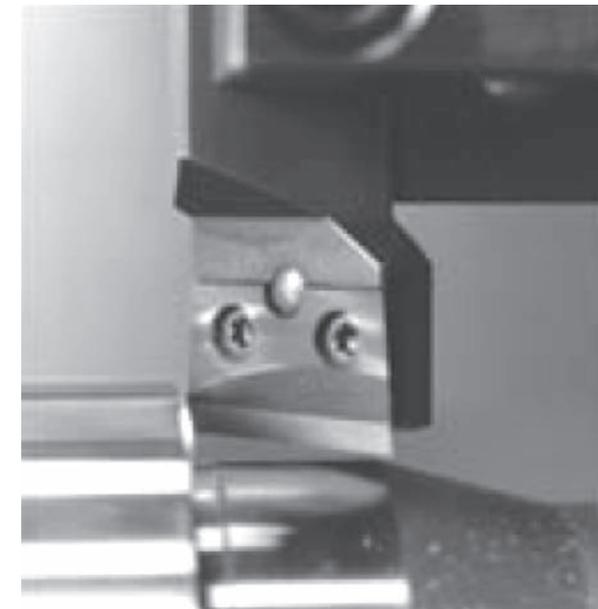


Figura 63: Cuchilla para eliminación de la hélice en torneado duro, por Sumitomo®

6.2 SUPERACABADO POR PULIDO

Muchos son los sectores donde un acabado perfecto es necesario. Durante el proceso de mecanizado, operaciones como el fresado o el taladrado pueden generar rebabas o acabados insuficientes. Desde hace décadas muchos de los procesos de acabado han

sido realizados a mano, este hecho se acentúa cuando se trata de piezas de geometría compleja o de elevado valor añadido, donde un error puede suponer el rechazo de la pieza completa, con el elevado costo que ello supone. En los últimos años, la tendencia es la de automatizar este tipo de procesos. La principal ventaja de implementar herramientas de acabado en robots y centros de mecanizado se resume básicamente en dos conceptos; repetibilidad y precisión, sin olvidar por supuesto una notable reducción de tiempo y por lo tanto del costo en la obtención de la pieza final.

Empresas como Brush (BRM) poseen un gran historial en la tecnología del cepillado. Comúnmente se asocia el término "cepillo" a los clásicos cepillos de alambre trenzado o de nylon, empleados para el desbarbado o suavizado de aristas. Esta empresa ofrece herramientas flexibles de abrasivo, bautizadas como Flex-Hone®. Se trata de una herramienta abrasiva flexible y elástica, de corte suave, ideal para el acabado, "bruñido plateau" y desbarbado de camisas de cilindros, elementos hidráulicos y neumáticos, así como para otros sectores de la industria como la aeronáutica, piezas de automoción, decoletaje, etc.

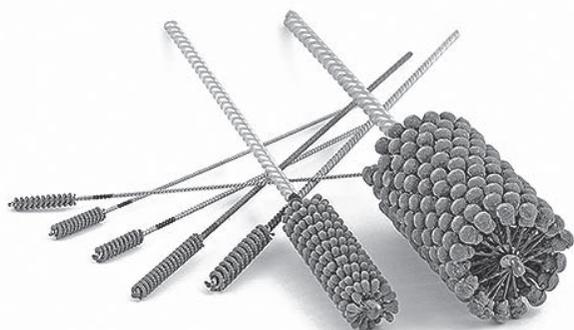


Figura 64: Herramientas Flex-Hone®

El Flex-Hone es una herramienta de uso general. Su gran versatilidad reside en las pequeñas bolas abrasivas que se encuentran solapadas en el extremo de unos filamentos de nylon. Cada bola es independiente de las demás, lo que asegura que sea autocentable y autoalineable con el agujero. De cara a una eficiente implementación de este tipo de herramientas en máquinas CNC o robots, se hace imprescindible tener un absoluto control de los parámetros del proceso, así como conocer y evaluar la influencia de estos, sobre la superficie final obtenida.

Una de las aplicaciones de este tipo de herramientas es el acabado y matado de aristas en agujeros. La amplia gama de abrasivos y tamaños de grano ha llevado a la necesidad de realizar una comparativa entre las diferentes calidades posibles, de cara a obtener los datos necesarios para saber cuál es el abrasivo más adecuado, para cada proceso y material. Un detalle de la experimentación se muestra en la Fig.65.

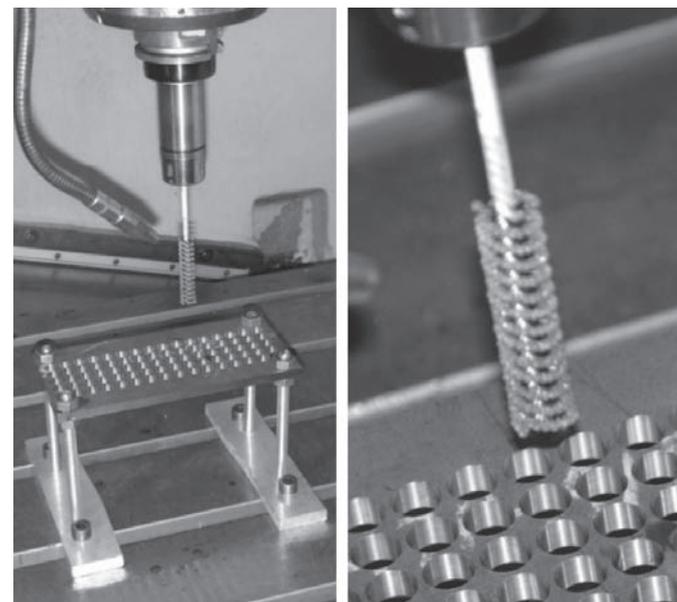


Figura 65: Montaje experimental para pruebas de cepillado de agujeros en Ti6Al4V realizado en la ETSI de Bilbao

Como principales conclusiones de estos ensayos cabe destacar que la utilización de estos sistemas posibilita una marcada reducción de la rugosidad inicial (en algunos casos superior al 60%). También son de uso sencillo y es posible de implementación directa en máquinas CNC.

6.3 MECANIZADO DEL GRAFITO

El mecanizado a alta velocidad de grafito es práctica habitual en muchos talleres de moldes, donde se generan los electrodos a utilizar en electroerosión por fresado a alta velocidad.

Las velocidades de corte pueden ser tan elevadas como la máquina permita, utilizándose husillos de muy alta velocidad (40.000 rpm), aunque de poca potencia, dado que la fuerza de corte es muy reducida.

El grafito es blando pero posee carácter abrasivo, por lo que se recomienda emplear herramientas recubiertas de diamante, consiguiéndose así una muy elevada duración. Otro problema es el polvo que se genera, que debe ser aspirado de forma muy efectiva: de no ser así puede ir infiltrándose en el CNC, y demás elementos eléctricos, provocando cortocircuitos. Además posee un efecto abrasivo que puede conducir al daño de las guías de los carros de la máquina.

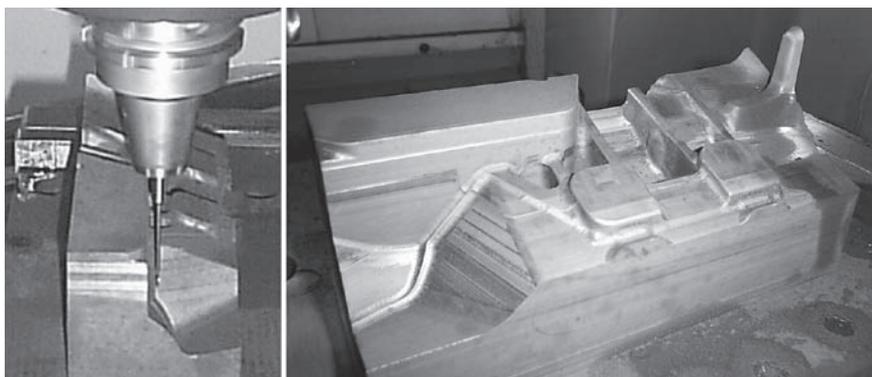


Figura 66: Fresado a alta velocidad de un electrodo de grafito. Dcha.) Imagen del electrodo, para un molde de inyección de aluminio.

La Fig.67 muestra una fresadora de Makino, empresa de gran precisión y dedicada a aplicaciones de alto rendimiento, especialmente diseñada para el sector moldista.



Figura 67: Centro de mecanizado Makino E33, para grafito y aceros templados, dotado de un husillo de 40.000 rpm y sistema de aspiración de polvo.

7. CONCLUSIONES

La productividad a nivel mundial aumenta a una razón de un 3% anual, esto implica que en los últimos 20 años se ha duplicado la tasa de arranque de viruta (cantidad de material arrancado por minuto). Las herramientas se han especializado en cada operación, pasando de la herramienta que valía para muchas cosas, a la que solo sirve para una operación/material, y por otro lado, se han mejorado significativamente las capacidades de las máquinas, etc.

Además, la precisión exigida en la pieza final, sigue siendo cada día mayor, con muchas empresas pensando en conseguir las centésimas de milímetro, o incluso menos aún.

El futuro de la industria de la fabricación mecánica, donde el mecanizado es la tecnología principal, apunta a varios hechos:

- **Fiabilidad de proceso:** se deben evitar colisiones de la herramienta, como también alcanzar que el 99% de los mecanizados sean buenos a la primera. Todos los avances en los procesos primarios, esto es la forja, fundición o el laminado, conducen a una pieza recibida en el taller de mayor valor añadido. Por tanto, aunque baje el volumen de viruta a mecanizar, el valor de la operación aumenta.
- **Productividad:** la meta es mecanizar más en menos tiempo, con menor intervención del ser humano. Este tema puede incluso abrir un debate social, pero es el único camino para disminuir los costos y poder competir con países emergentes.
- **Programación de la máquina de CNC amigable y orientada al usuario:** el mecanizador se va a ver favorecido por asistentes a la programación e interfaces muy orientados hacia la aplicación final. El control numérico busca facilitar su uso y cada día presenta nuevas funciones de programación.
- **La programación de pieza compleja se realiza y realizará utilizando un software CAM,** dado que permite optimizar las operaciones. El entorno de programación es una oficina, lejos del ambiente más estresante de los talleres.
- **Herramientas de corte orientadas a la aplicación,** originadas por el desarrollo conjunto de los usuarios y los fabricantes de herramientas. Los fabricantes que pueden entrar en esta dinámica son los grandes (Walter, Mitsubishi, Sandvik, Kennametal, Seco, Iscar, Titex, etc.), aunque hay empresas pequeñas que pueden orientarse a nichos muy interesantes, si trabajan en conjunto a los centros de investigación y a las universidades. Así lo están haciendo Kendu en el País Vasco, Ezeta y Sin Par en Argentina, o recubridores como Metal Estalki, entre otros.
- **Multitarea:** el centro del futuro de la máquina-herramienta será la multitarea, por ser la opción que permite realizar todas las operaciones necesarias, en una sola máquina. WFL, Stama, además de DMG-MoriSeiki, Mazak, Okuma y muchos fabricantes de tornos, ya han desarrollado sus productos en esta línea. Y los de fresadoras comienzan a dotar a los platos divisores de la posibilidad de girar a altas revoluciones para poder torneár.
- **Ecoeficiente:** con menor consumo de las máquinas en cuanto a electricidad y a flui-

dos de corte. Varios proyectos realizados en España por diversas empresas, están efectuando un gran esfuerzo en esta línea. Las empresas participantes en el proyecto son Danobat Sistemas, Danobat, Doimak, Estarta, Etxe-tar, Fagor Arrasate, Fagor Automation, Goratu, Ibarria, Juaristi, Kondia, Lazpiur, Lealde, NC Manufacturing, Nicolás Correa, OnaPres, Puigianer, Shuton, Soraluze, y Zayer.

- Mecanizado de grandes piezas: este nicho es muy importante dado que está asociado a la minería, petróleo y aerogeneradores, todos ellos en alza. En Argentina tiene ya presencia, y puede incluso crecer por la existencia de grandes factorías y bienes de capital de los ingenios azucareros, la minería y el petróleo.

Respecto al uso de TICs, con la tecnología actual se podría crear máquinas mucho más evolucionadas que las actuales, si fuese el caso que las empresas dedicadas a su desarrollo tuviesen el volumen de negocio y tamaño por ejemplo de la automoción. No hay barreras tecnológicas, las barreras actuales a la evolución son más bien económicas, e incluso de costumbre del tipo "esto siempre se ha hecho así". Pero sólo hay que contemplar la evolución de la informática y de la transmisión de datos para darse cuenta que este aspecto de la tecnología no es un problema.

Y la formación es y será el eje de la innovación. Así y a modo de ejemplo la ETSI de Bilbao trabaja en este cambio desde la base, la formación. El Aula de Máquina-Herramienta de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU) surge como una iniciativa coordinada por parte tanto de empresas del sector (AFM/INVEMA, Asociación de Fabricantes de Máquina-Herramienta) como de instituciones públicas (Gobierno Vasco y Diputaciones de Bizkaia y Álava), con el objetivo de promover la formación especializada de técnicos superiores, la realización de proyectos de investigación, y la difusión de actividades hacia otros sectores de la sociedad. Entre las actividades educativas, cada año 24 estudiantes seleccionados del último curso, reciben formación específica, siguiendo un programa diseñado de forma coordinada con las empresas del sector.

Estos ingenieros deben tener y tienen una mentalidad abierta, que puede servir para romper moldes del sector. Y los resultados son evidentes, dos son especialistas jefe en la empresa japonesa Makino, tres son ingenieros en el fabricante de electrohusillos Kessler, el 45% trabajan en las empresas vascas de máquinas-herramienta, y son en sus puestos de trabajo, el motor de la innovación. Otros profesionales son también jefes de ingeniería de fabricación, en empresas de fabricación aeronáutica. La formación avanzada es sinónimo de potencia de evolución, juventud orientada a la innovación, y capacidad de seguir el rápido avance que imponen los líderes del mercado de la máquina-herramienta.

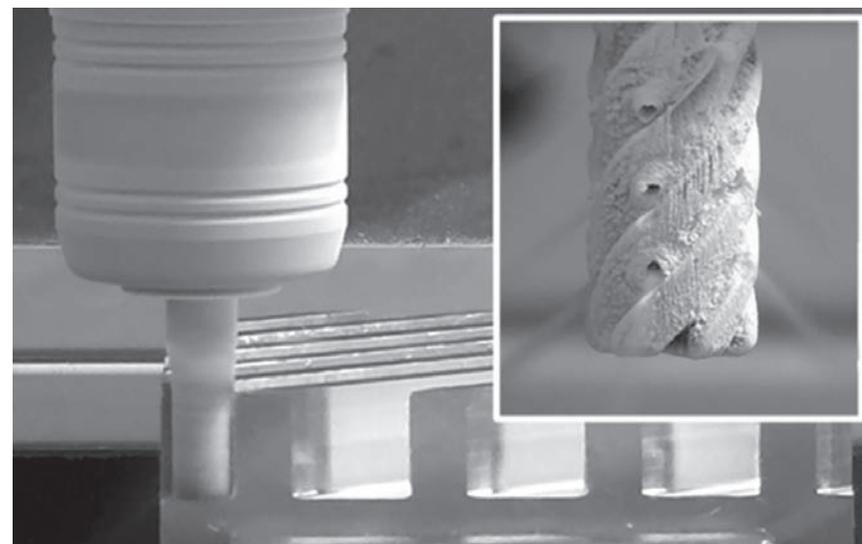


Figura 68: Innovación en 2014, pruebas con gases criogénicos (CO2 y LN2) como refrigerante en la Escuela de Ingenieros de Bilbao

Otro aspecto importante en la ecuación del éxito del mecanizado, es el vendedor de herramientas. Un vendedor formado es un valor seguro para la empresa, pues el éxito de la herramienta es dependiente al 100% de las condiciones de aplicación. Por tanto, el técnico que acude a casa del cliente a demostrarle la validez del producto, debe ser capaz de:

- Definirle al cliente las necesidades y requisitos de su herramienta, dejándole claro la importancia de trabajar con portaherramientas adecuados y en condiciones de lubricación óptimas.
- Evaluar el comportamiento de la máquina y las fijaciones: las pruebas muchas veces se hacen en condiciones precarias, dando lugar a malos resultados.
- Formar sobre la técnica de mecanizado, siendo flexible ante los comentarios de los clientes, pero dejando claro que las nuevas herramientas y conceptos, muchas veces requieren nuevas ideas y tener la mente abierta.

Los técnicos de herramientas vienen a ser una especie de "juglares" que llevan las novedades de un lugar a otro, favoreciendo la innovación de las empresas. Los usuarios exigen apoyo al vendedor, y si este apoyo es ofrecido y es sólido se gana un cliente para un largo trayecto.

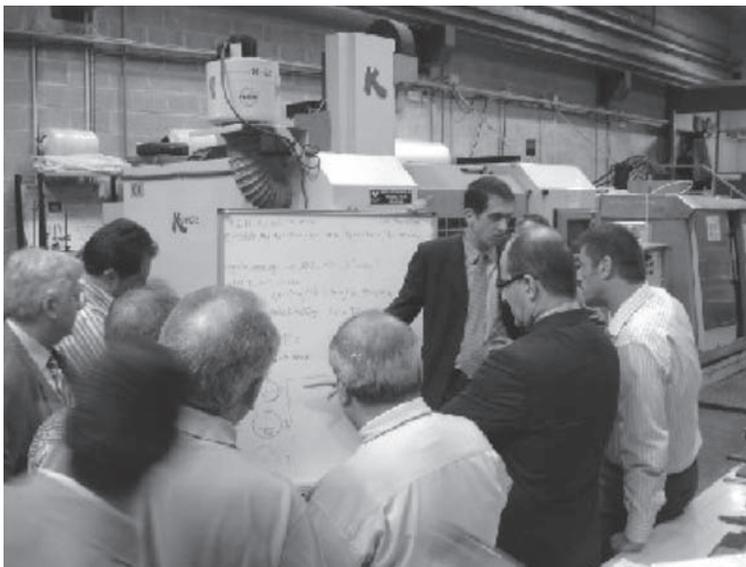


Figura 69: El apoyo al distribuidor mediante formación de la empresa Ceratizit, en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, realizando demos prácticas a sus distribuidores

Argentina posee las piezas del puzzle que pueden alumbrar un futuro brillante en las empresas de mecanizado, pues en las visitas del Norte, en el propio INTI y en las universidades existen profesores y tecnólogos formados, que pueden ser un elemento dinamizador de las empresas. El esfuerzo a realizar es grande; para hacerse una idea de la distancia a recuperar, simplemente se debe comparar las máquinas convencionales de las visitas a empresas del Norte, que se describieron en la parte A de este informe, con las del apartado de Multitarea de la segunda parte. Pero no es imposible recuperar terreno y seguir el camino imparables de la automatización, el reinado del control numérico y la carrera por la productividad. Lo que sería claramente suicida es no querer ver que la realidad y el mercado van por los caminos que hemos intentado marcar con este informe, y seguir conformarse con hacer las cosas "como siempre se han hecho".

Para este esfuerzo, el INTI y la colaboración de expertos y centros asociados, como la Universidad del País Vasco están ya trabajando, y una muestra es este informe fruto de la visita y relación establecida en Junio de 2014.



Unión Europea

PROYECTO **MEJORA DE LAS ECONOMÍAS
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL**

UNA GUÍA
**PARA LA MEJORA
DE PROCESOS EN LAS
PROVINCIAS DE MENOR
DESARROLLO EN LA
REPÚBLICA ARGENTINA**

Fundamentos de la
Tecnología de Mecanizado



INTI



Unión Europea

Instituto Nacional de Tecnología Industrial
Gerencia de Cooperación Económica e Institucional
Avenida General Paz 5445 - Edificio 2 oficina 212
Teléfono (54 11) 4724 6253 | 6490
Fax (54 11) 4752 5919
www.ue-inti.gob.ar



Presidencia de la Nación

INDUSTRIA