

## EVOLUCION DEL MECANIZADO

El mecanizado es una ciencia fascinante, cuyo interesante pasado, desde nuestro punto de vista, no es muy antiguo. En su mayor parte se desarrolló de forma paralela a la revolución industrial de los siglos dieciocho y diecinueve para luego culminar en el siglo veinte.

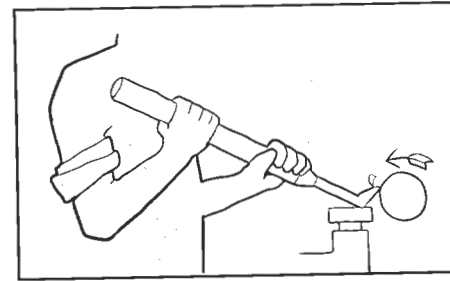
Aunque puede decirse que esta perspectiva es apropiada desde el punto de vista de la productividad, también puede parecer bastante injusto para la artesanía desarrollada previamente a la revolución industrial. En el oficio del trabajador del metal, gran parte de los conocimientos y habilidades personales se desarrollaron mucho antes de la aparición de la industria.

En su relato de técnicas y desarrollo humano "El Mito de la Máquina", el historiador americano Lewis Mumford, dice en referencia al trabajo del metal: "lo que normalmente se denomina el atraso tecnológico de los seis siglos anteriores a la así llamada Revolución Industrial, representa en realidad un curioso atraso en la erudición histórica. De forma significativa, los grandes avances técnicos del siglo dieciocho tuvieron lugar en los primeros

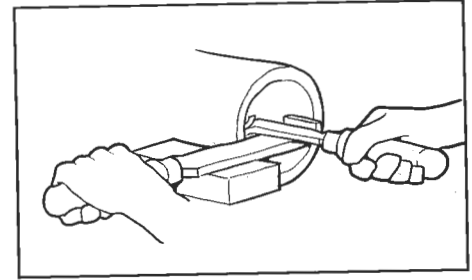
tiempos bíblicos o las labores de la Edad de Cobre y épocas siguientes. Las grandes inversiones de capital en las industrias metalúrgicas (militares) estimularon las economías de la pre-revolución industrial".

En consecuencia, los primeros descubrimientos en este campo deben tenerse en cuenta como la base sobre la que se asienta el desarrollo industrial. No obstante, el mecanizado en máquinas-herramienta es algo relativamente reciente, ya que los materiales de las herramientas y la ciencia han determinado su desarrollo en este siglo. El inmenso interés por la fabricación ha estimulado la búsqueda de la productividad y nos ha conducido a la tecnología actual. Este breve repaso a la historia comienza cuando se introducen las máquinas-herramienta motorizadas.

El mecanizado como tal, no es una ciencia nueva; ha jugado un importante papel en el desarrollo de la civilización. En el siglo dieciocho se trabajaba preferentemente la madera, y el tratamiento del metal en máquinas era muy limitado y bastante rudimentario. Hasta el siglo diecinueve la tarea del herrero era lenta, pero esto cam-



*El primitivo torneado y mandrinado manual*

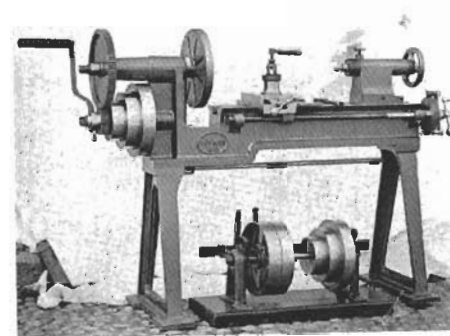


bió cuando se dispuso de máquinas accionadas por motores de vapor al principio y, más tarde por electricidad.

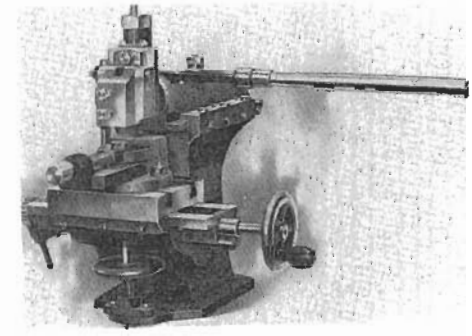
En respuesta a las nuevas fuentes de **energía**, las máquinas-herramienta experimentaron un considerable desarrollo. Por medio de árboles, correas y poleas se transmitía el movimiento a través de los talleres. Existían fresadoras, cepilladoras y tornos que podían llevar a cabo roscados. La introducción del carro transversal en el torno representó un gran paso adelante, ya que permitió fijar las herramientas a la máquina en lugar de tener que hacerlo de forma manual.

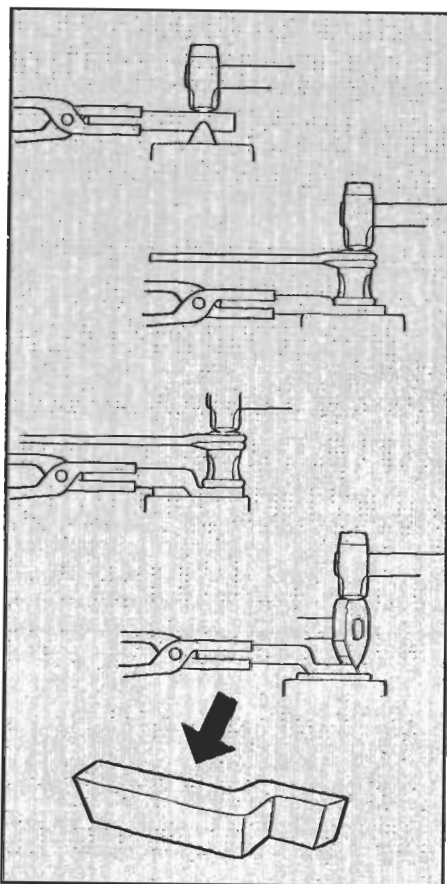
A comienzos del siglo diecinueve, el mecanizado era muy lento; por ejemplo, el

cepillado de una superficie de hierro de 1,5 m<sup>2</sup> llevaba todo un largo día de trabajo. El limado era una operación de mecanizado de superficies ampliamente utilizada. Fue el predecesor del fresado de superficies, y se llevaba a cabo con una herramienta de torno montada en un portaherramientas (carnero), que realizaba movimientos alternativos a lo largo de la superficie, al mismo tiempo que se desplazaba (avance) a lo ancho de la pieza. Este proceso ha sido casi totalmente sustituido por el fresado de superficie (planeado). Permanece principalmente como base para el brochado y operaciones similares. La ilustración muestra una primitiva limadora accionada a mano.



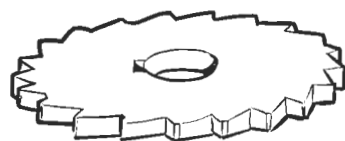
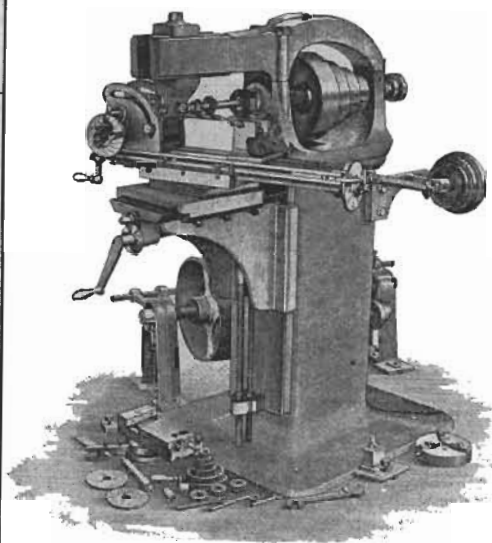
*Torno manual a poleas y cepillo carnero*





Herramienta de acero al carbono forjada y templada

-1900



Fresadora y fresa



Máquinas movidas por polea en un taller del siglo diecinueve



El desarrollo de talleres y su maquinaria fue incrementándose en Europa y América durante el siglo diecinueve. En el continente americano, los fabricantes de armas encabezaron el progreso en el mecanizado, desarrollando máquinas según las iban necesitando e introduciendo métodos de fabricación basados en la utilización de componentes intercambiables y medidas estándares, preparando el terreno para la producción en serie. Hacia la mitad del siglo se contaba ya con fresadoras universales y rectificadoras. Se introdujo la torreta en el torno para conseguir un cambio de herramientas más rápido. Los tornos de torreta y máquinas de avance automático se utilizaban ampliamente en los países industrializados a finales del siglo pasado.

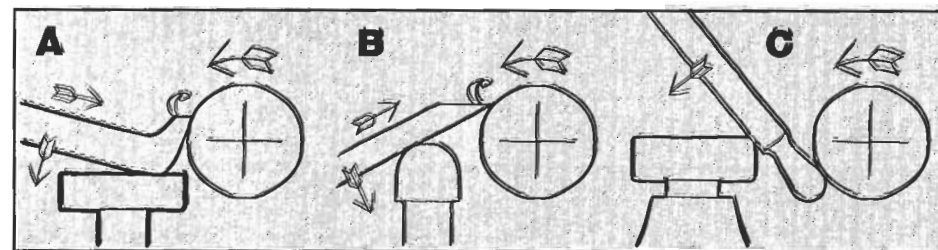
Aunque existieron otras muchas formas paralelas de desarrollo e innovaciones en la industria del trabajo del metal a lo largo del siglo diecinueve y especialmente durante el veinte, este capítulo se centrará en un resumen del desarrollo de los materiales de las herramientas de corte.

En este contexto hay tres operaciones principales de mecanizado en el siglo diecinueve: (A) Torneado de hierro y acero, (B) Torneado de metales blandos y (C) Operaciones de acabado de superficies.

Durante el siglo diecinueve se desarrollaron varios procesos, en primer lugar del hierro, y más tarde del acero, hasta llegar al acero

para herramientas. Los aceros de alto contenido en carbono y los aceros al carbono aleados fueron los mejores materiales disponibles para herramienta. A pesar de los tratamientos térmicos a los que les sometían los herreros, perdían dureza rápidamente debido al calor generado, incluso con una velocidad de corte de tan sólo unos pocos metros por minuto. La vida de la herramienta era extremadamente breve y poco fiable, ya que el tratamiento térmico y la metalurgia eran ciencias sin desarrollar. Los primeros materiales para piezas de maquinaria no eran demasiado difíciles: fundición gris, bronce y hierro forjado. Con los aceros, especialmente los aceros aleados, las exigencias aumentaron, así como su precio.

La primera mejora importante en el material para herramientas que se asemejaba al acero rápido, fue el **acero Mushet**, que fue el resultado de un descubrimiento accidental. Los experimentos con manganeso condujeron al temple al aire del acero, y al descubrimiento del tungsteno en el acero. Se obtuvo un acero aleado con una capacidad de mecanizado mucho mayor que la del acero al carbono; de hecho, con el acero Mushet se alcanzaba a veces el doble de capacidad de mecanizado. Fue la capacidad del material de la herramienta para soportar temperaturas de corte mayores que el acero al carbono, lo que amplió su utilización, promovió el desarrollo posterior del acero aleado y dirigió un mayor interés



Torneado de acero, metal blando y una operación de acabado



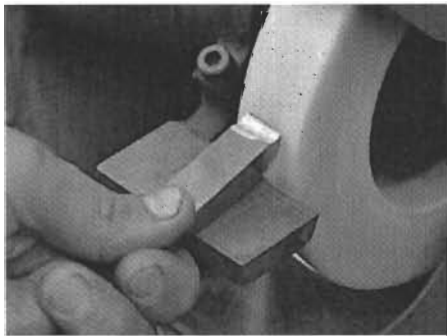
hacia los métodos de tratamiento térmico. Se alcanzaron velocidades de 10 m/min. y pudieron mecanizarse más materiales a velocidades superiores.

A comienzos del siglo veinte tuvo lugar el gran suceso que influyó decisivamente en el mecanizado, y por lo tanto, en la fabricación a gran escala: la demostración realizada por **Fredrick Taylor** en la Exposición de París en 1900. Llevó a cabo un mecanizado a tal velocidad y régimen de avance, que se obtenían virutas azules. La herramienta de corte se puso al rojo y aún se mantenía afilada. En un torno especial automotriz, mecanizó acero dulce forjado a niveles increíbles para los visitantes; los datos de corte eran: velocidad de corte 40 m/min, avance 1,6 mm y profundidad de corte 4,8 mm.

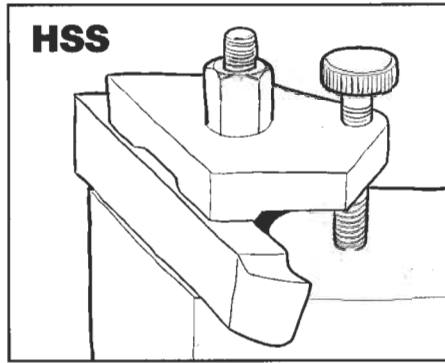
Después, las herramientas de corte se probaron al máximo, midiendo su dureza al rojo, en Alemania, y convirtiendo en chatarra las máquinas que se usaron en menos de un mes. Las máquinas-herramienta de todo el mundo se habían quedado obsoletas con la llegada del nuevo siglo!

### ACERO RAPIDO (HSS)

Se desarrolló en gran manera la búsqueda de materiales de mejores características para herramientas. No se trataba solo de



Acero rápido



Herramienta de acero rápido y sujeción

encontrar una nueva aleación, sino de desarrollar la metalurgia y los tratamientos térmicos para los aceros aleados, para obtener una dureza suficiente en un mayor rango de temperatura: desde 250°C con acero al carbono, hasta más de 600°C. La capacidad de fabricación se disparó y motivó la construcción de maquinaria más avanzada para las industrias incipientes, como la automovilística, la naval, etc.

Taylor convirtió el mecanizado en una ciencia, llevando a cabo decenas de miles de pruebas junto con otro ingeniero, Maunsel White. Su trabajo analítico mecanizando aprox. 400.000 Kg. de acero forjado y modificando las herramientas de las máqui-



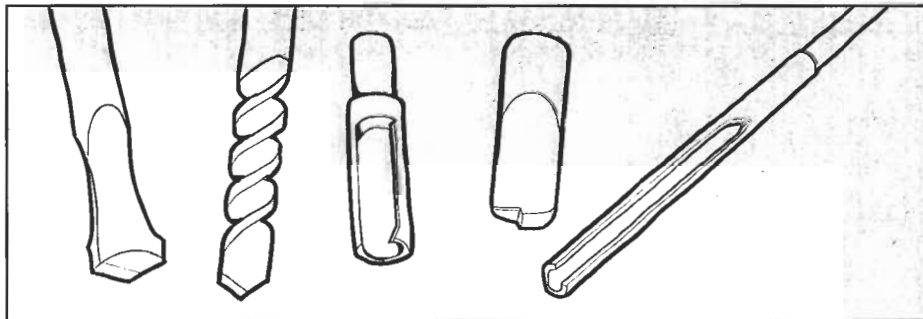
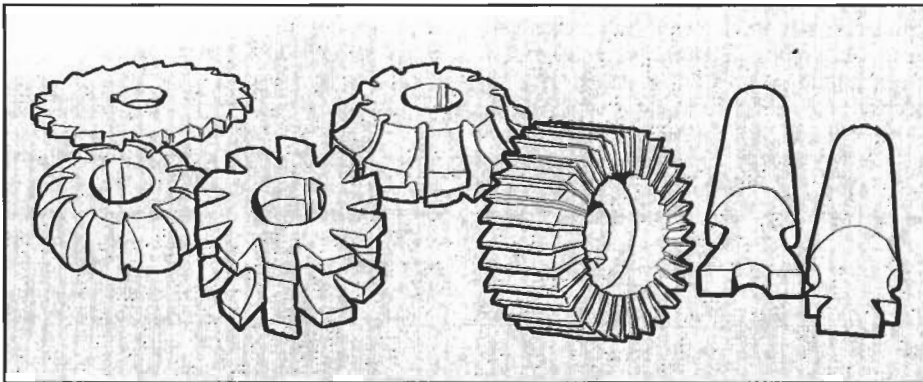
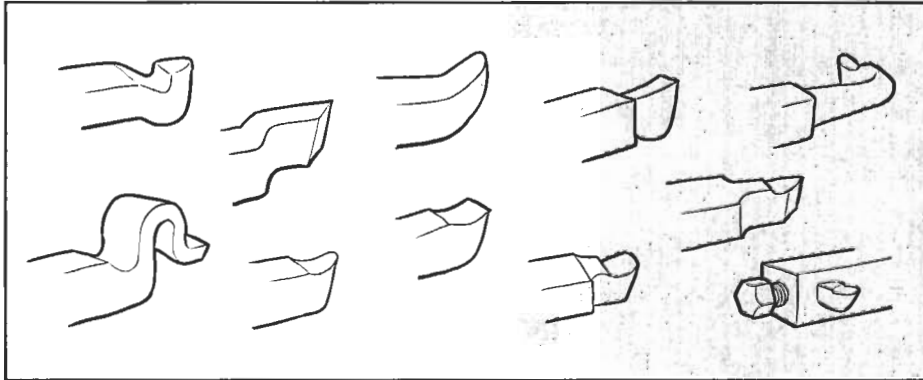
### LATHE CUTTING SPEEDS, STEEL. - I.

Depth of Cut in Inches	Feed in Inches	Standard 1 1/4 inch Tool		
		Soft Steel	Medium Steel	Hard Steel
3/32	0.04	518	259	118
1/16	0.08	182	90.8	41.4
1/8	0.16	157	78.5	35.7
3/16	0.32	37	36.6	18.3
1/4	0.64	27	27	12.9
5/16	1.0	20.9	10.5	4.75
3/8	1.6	15.8	7.2	5.07
1/2	2.5	11.2	5.07	5.07
5/8	4.0	7.2	4.14	4.14
3/4	6.4	5.07	3.57	3.57
7/8	10.0	3.57	2.7	2.7
1	16.0	2.7	2.0	2.0
1 1/8	25.0	2.0	1.5	1.5
1 1/4	40.0	1.5	1.1	1.1
1 1/2	64.0	1.1	0.8	0.8
1 3/4	100.0	0.8	0.6	0.6
2	160.0	0.6	0.4	0.4
2 1/4	250.0	0.4	0.3	0.3
2 1/2	400.0	0.3	0.2	0.2
2 3/4	640.0	0.2	0.15	0.15
3	1000.0	0.15	0.1	0.1
3 1/4	1600.0	0.1	0.07	0.07
3 1/2	2500.0	0.07	0.05	0.05
3 3/4	4000.0	0.05	0.04	0.04
4	6400.0	0.04	0.03	0.03
4 1/4	10000.0	0.03	0.02	0.02
4 1/2	16000.0	0.02	0.015	0.015
4 3/4	25000.0	0.015	0.01	0.01
5	40000.0	0.01	0.007	0.007
5 1/4	64000.0	0.007	0.005	0.005
5 1/2	100000.0	0.005	0.003	0.003
5 3/4	160000.0	0.003	0.002	0.002
6	250000.0	0.002	0.001	0.001

Standard 1 inch Tool	Forged Outline shown by Dotted Lines and Ground Form by Full Lines. Clearance, 6 degrees; Back slope, 8 degrees, and Side slope 14 degrees	
	Clearance	Back slope
1/4	490	245
3/8	339	169
1/2	235	117
5/8	189	94.5
3/4	142	71.0
7/8	102	51.3
1	83.0	41.4
1 1/8	64.3	32.3
1 1/4	50.9	25.5
1 1/2	40.3	20.8
1 3/4	32.3	16.2
2	25.9	12.9
2 1/4	20.8	10.4
2 1/2	16.2	8.1
2 3/4	12.9	6.4
3	10.4	5.1
3 1/4	8.1	4.1
3 1/2	6.4	3.6
3 3/4	5.1	3.2
4	4.1	2.9
4 1/4	3.2	2.5
4 1/2	2.5	2.1
4 3/4	2.1	1.8
5	1.8	1.5
5 1/4	1.5	1.2
5 1/2	1.2	1.0
5 3/4	1.0	0.8
6	0.8	0.7

**DATOS ORIGINALES DE TAYLOR PARA HSS, 1906. (¡Observe vida-herramienta!)**  
Herramientas y condiciones de corte que dejaron obsoletas la población mundial de máquinas-herramienta



Programas típicos de herramientas de corte HSS para torneado, fresado y taladrado, mostrando varios desarrollos en tipos de herramienta tales como placas de HSS sujetas en mangos, fresas de perfil constante, fresas de acanalar, fresas de ranurar, brocas espada así como brocas para trepanado.



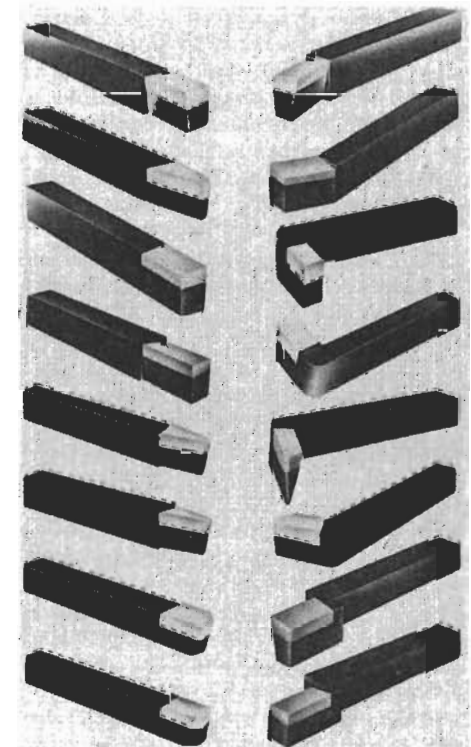
nas para llevarlo a cabo, llevaron al desarrollo de la fabricación y a la civilización con ella, un paso adelante. Se comenzó el siglo veinte con nuevos niveles de producción. Las barras de acero rápido llegaron a convertirse más tarde en las herramientas de torneado más ampliamente utilizadas, hasta que fueron sustituidas. Las herramientas incorporaban porciones de acero rápido que podían reemplazarse para ser afiladas, predecesores de las plaquitas intercambiables. El acero rápido sirvió también para desarrollar importantes herramientas de forma para conseguir radios, ángulos, ranuras y formas más complejas en una sola operación. Como el acero rápido es un material fácil de rectificar, las herramientas de este material se convirtieron en la columna vertebral de los tornos de producción.

¿Cuál fue el resultado de los descubrimientos de Taylor y White? Hicieron que fuera posible utilizar datos de corte considerablemente más altos, pero lo más importante fue el incremento en la vida de las herramientas de corte. Taylor proporcionó también la base para la ecuación económica de la vida de herramienta, que aún sigue siendo válida hoy en día. Trabajó intensamente con vistas a la producción y estudio de tiempos. En 1903 entregó los resultados de sus investigaciones sobre el mecanizado en la sociedad Americana de Ingenieros de Fabricación, incluyendo la fórmula de Taylor.

Taylor y White comenzaron sus experimentos utilizando aceros Mushet, para posteriormente ir variando la composición del acero para herramientas: aumentaron el contenido de elementos aleantes, principalmente de wolframio y cromo, incrementando así el rango de temperaturas de utilización y el contenido en carburos duros resistentes al calor. Así comenzó el proceso que llevó a la aparición de las herramientas en el siglo veinte. **En la práctica, esto**

significó que una operación de torneado que en el siglo diecinueve llevaba 100 minutos con herramientas de acero rápido de alto contenido en carbono, a principios del siglo veinte se podía realizar en 26 minutos con acero rápido.

Bien entrado el siglo veinte, aproximadamente en 1915, se introdujo la aleación fundida y se daba un nuevo paso adelante en la evolución de los materiales para herramientas de corte. Aleaciones fundidas es la denominación general para algunas aleaciones no férreas basadas fundamentalmente en el cobalto, cromo, tungsteno, etc. Estas aleaciones constaban de un 50% de carburos, aprox. Dependiendo del fabricante, tenían diferentes nombres: Stellite,



Herramientas para torneado de aleación fundida



Speedaloy y Tungaloy fueron probablemente las más conocidas. Las aleaciones fundidas eran muy duras y tenían una dureza en caliente relativamente alta: 800°C, y una alta resistencia al desgaste, pero eran muy frágiles y difíciles de conformar.

Estas aleaciones son precursoras y están relacionadas con los carburos cementados por su composición y algunas de sus propiedades. De hecho, se podían soldar puntas de Stellite en mangos de acero al carbono. Sin embargo, se obtienen por fusión y no por pulvimetalurgia, como los carburos cementados. Estas puntas se unían a portaherramientas de acero y fresas, como después se haría con el carburo cementado.

Ofrecían una mejora importante con respecto a los aceros rápidos de esa época, pero sólo tenían la mitad de tenacidad que éstos. La gran dureza a altas temperaturas y la resistencia al desgaste mejoraron el rendimiento en muchas operaciones de aquel tiempo, particularmente aquellas con materiales que generaban mucho calor durante el mecanizado.

**Algunas operaciones que llevaban 26 minutos con acero rápido, se podían realizar en 15 minutos con herramientas de aleación fundida.**

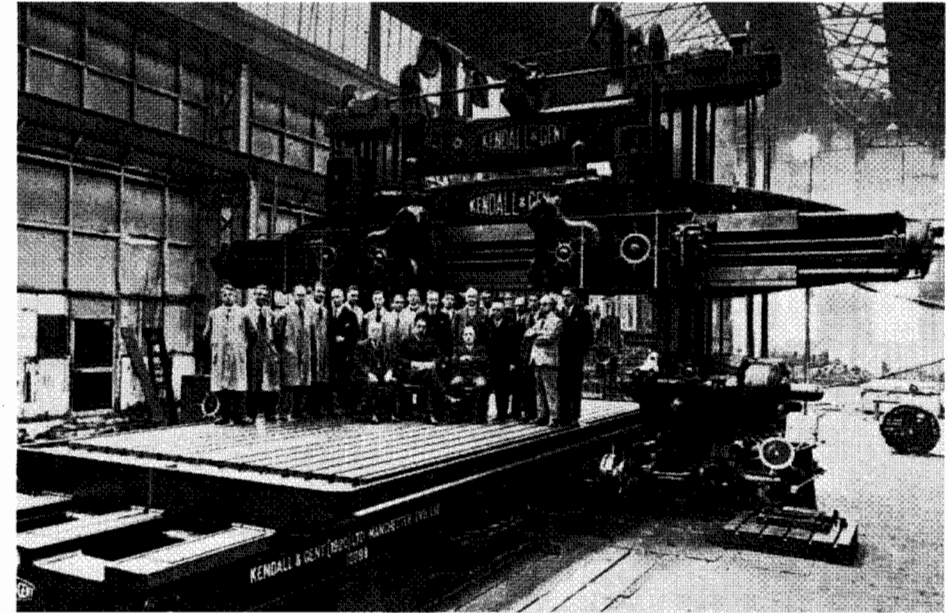
Sin embargo, el desarrollo del acero rápido no cesó. Justo antes de 1930 apareció el acero super-rápido, obtenido añadiendo cobalto al acero rápido. Se convirtió en un buen material para herramientas capaces de mecanizar diversos materiales, incluso aluminio o aquellos que incorporaban magnesio, cuya utilización aumentaba rápidamente. Ya se podían aplicar velocidades de corte de aprox. 70 m/min. La búsqueda de proporciones mayores de carburos (aprox. 25%) combinada con una mayor tenacidad de la herramienta, continuó durante muchas décadas y hoy en día sigue vigente.

Las ilustraciones adjuntas muestran algunos de los primeros modelos de herramientas de torneado, fresado y taladrado. Se hicieron grandes cantidades de herramientas de forma, de acero rápido para torneado y fresado. Las brocas-espada fueron los predecesores de la broca helicoidal, mientras que desarrollaban otros sistemas de taladrado para agujeros profundos.

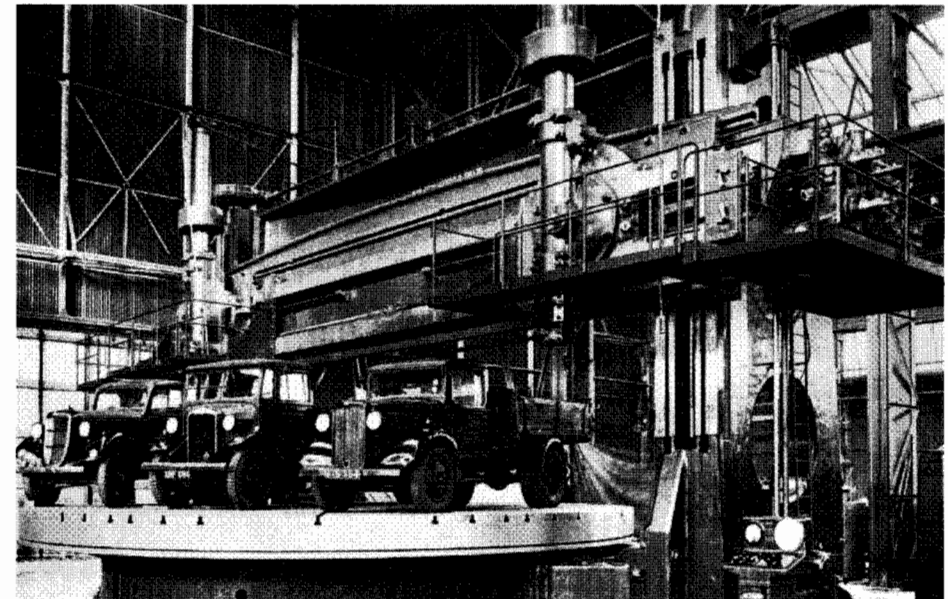
Aproximadamente en los años 50, las máquinas básicas se mejoraron y desarrollaron. Desde entonces las máquinas se perfeccionaron y han ganado en potencia y estabilidad, y los controles más exhaustivos en Métodos e Ingeniería de Producción, junto con los descubrimientos en maquinabilidad, se convirtieron en factores dominantes. El factor de costos comenzó a tenerse muy en cuenta en relación con el tiempo de mecanizado desde un primer momento. La lentitud del mecanizado hizo que los recursos se dirigieran hacia la obtención de nuevas herramientas que produjeron menores tiempos de mecanizado. Los técnicos eran hombres orgullosos y de gran habilidad, que jugaron un papel importante en el desarrollo del transporte, maquinaria, armamento y equipamiento de la era moderna. Las máquinas se convirtieron en el buque insignia de la industria.

Durante el siglo diecinueve y especialmente el veinte, se desarrollaron sierras mecánicas, grandes cepilladoras, limadoras, taladradoras radiales, tornos y mandrinadoras, y se hicieron lo suficientemente rígidas y robustas para estar a la altura de las nuevas herramientas.

**Fue durante la década de 1930 cuando comenzó la era del carburo cementado como material para herramientas de corte. Este fue otro de los grandes hitos en el desarrollo de este tipo de herramientas.**



*El orgullo de la compañía - gran cepillo/puente de los años 30*



*Demonstrando la capacidad de la mandrinadora*



## CARBUROS CEMENTADOS

Los carburos cementados, también conocidos como sinterizados, se desarrollaron paralelamente con otros metales duros y el carburo de tungsteno durante esta década. Estos fueron revolucionarios productos de la pulvimetalurgia, que contenían más del 90% de carburos de gran dureza en un material aglomerante. El material pulverizado es prensado y sinterizado, produciéndose entonces la unión con el aglomerante para formar el material de la herramienta de corte.

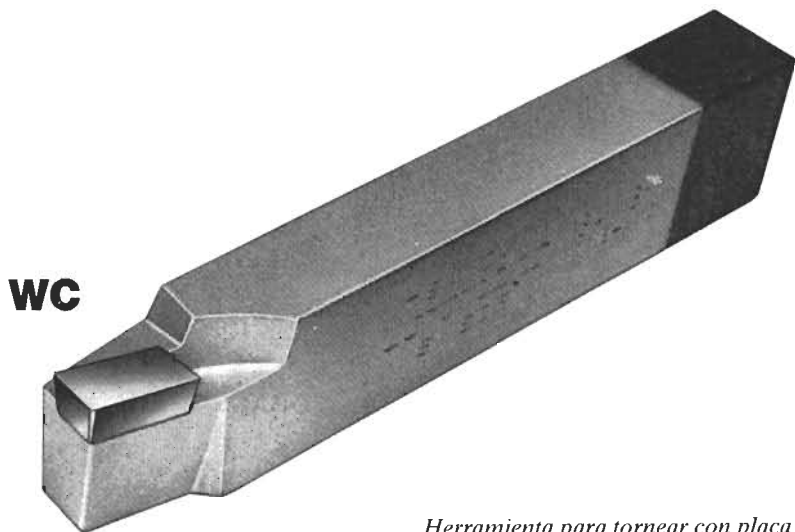
Este material tuvo su origen en la Alemania de los años 20 durante otra exhibición, en la muestra de Leipzig de 1927, donde se demostró un nuevo logro en el mecanizado. También se realizaron ensayos previos en los Estados Unidos. Se emplearon velocidades de corte varias veces superiores a las del acero rápido y se obtenían vida de herramienta que parecían eternas.

Durante los años 30, algunos fabricantes desarrollaron el carburo cementado como material de herramienta de corte en dife-

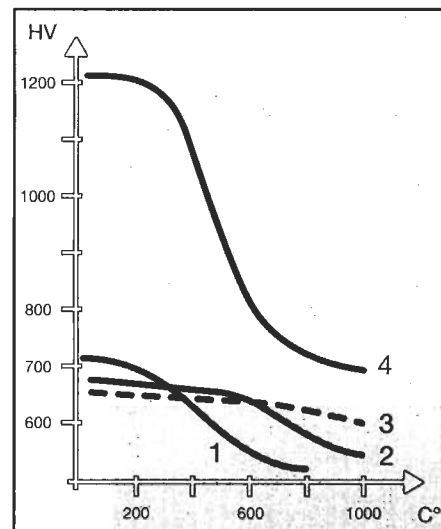
rentes países. Eso significó un nuevo paso adelante en el rendimiento del mecanizado.

**Una operación que con acero rápido requería 26 minutos y con aleaciones fundidas 15 minutos con herramientas de carburo cementado se llevaba a cabo tan solo en 6 minutos.**

Los primeros tipos de carburo cementado (Wc) se basaron en el carburo de tungsteno como partículas duras y en el cobalto como aglomerante. Estos primeros filos de corte eran excelentes y trajeron consigo una gran mejora en el mecanizado de hierro fundido, aluminio, etc., no tan acusada en el caso del acero debido a la rápida aparición del cráter en la punta de la herramienta. Esto llevó a una búsqueda intensiva en el nuevo campo de las herramientas de carburo cementado. Basándose en la forma y geometría de las herramientas enterizas de acero rápido, se soldaron pequeñas placas de carburo cementado en alojamientos en los mangos de herramientas para constituir el filo de corte.



*Herramienta para torneado con placa soldada*



*De nuevo, una de las principales razones para mejorar el rendimiento fue la mayor dureza en caliente del material. (1) acero al carbono, (2) HSS (3) aleaciones fundidas, (4) carburo cementado (WC)*

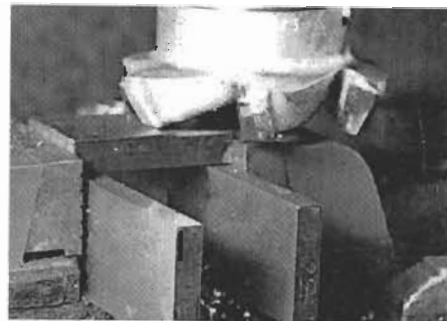
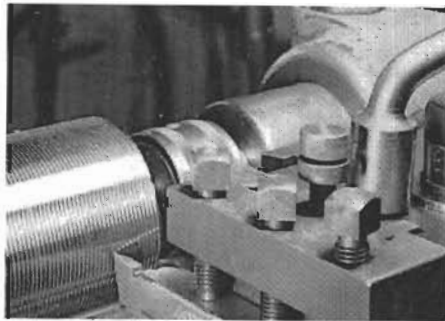


*Una nueva era en el mecanizado*

Sin embargo, volvió a ocurrir que las máquinas-herramienta existentes no tenían la fuerza, rigidez y resistencia necesaria para sacar el máximo partido a las herramientas de carburo cementado. También las plaquitas de carburo cementado fueron consideradas como un material exótico y de duración muy especial durante la depresión de los años 30. Por lo que la introducción de este material fue lenta hasta finales de esa década, y no se realizó a gran escala hasta la guerra, cuando ya había disponibles máquinas más potentes y las ruedas comenzaron a girar para fabricar armas y transportes. Fue entonces cuando se generalizó el uso de herramientas de carburo cementado.

El desarrollo de los carburos cementados, basado en el rápido éxito de la calidad WC-Co, continuó con la ambición de supe-

rar el desgaste por difusión y a una rápida rotura de los filos de corte en el mecanizado del acero. Esto sucedía incluso a velocidades de corte no muy superiores a las utilizadas con herramientas de acero rápido. Se estudiaron algunos otros tipos de carburos como el TaC, NbC, TiC, etc. Se descubrió enseguida la ventaja de utilizar los mencionados tántalo, niobio y titanio como elementos adicionales del carburo de tungsteno. **Esto condujo a calidades de carburo cementado basadas en el carburo de tungsteno como una fase, otros carburos como segunda fase y el material aglomerante como tercera fase.** Aproximadamente en 1934, existían 134 calidades patentadas de carburo cementado. Por tanto, el desarrollo fue rápido, pero la explotación comercial y el aumento de potencial en la productividad quedó relegado durante varios años.



Primeras aplicaciones del metal duro en torneado y fresado



La investigación del carburo cementado como material para barrenas y herramientas de corte comenzó en Suecia, en Sandvik Steel Works, durante la década de 1930. En el año 1939 se instaló una planta de Investigación y Desarrollo para la fabricación, en colaboración con un fabricante de bombillas, el cual utilizaba métodos puli-metalúrgicos para obtener los filamentos de tungsteno.

Sandvik Coromant se formó y comenzó a funcionar como departamento dentro de la compañía en 1942. Desde el principio, el objetivo fue el desarrollo, fabricación y venta de herramientas de corte completas para torneado, fresado y taladrado. Había tres calidades para el mecanizado: una para el acero, otra para hierro fundido, y la tercera para piezas de otros materiales. Al principio de los años 40 se desarrolló el servicio con talleres de afilado próximos a clientes para ofrecerles servicios de reparación y entrenamiento.

La utilización de **herramientas soldadas de carburo cementado** creció considerablemente hacia finales de los años 40 y durante los 50. Estas eran relativamente caras en comparación con las herramientas de acero rápido existentes, y quedaba por realizar una gran tarea para impulsar su utilización, especialmente en fábricas donde las máquinas-herramienta eran anticuadas. Pero el empuje subyacente para mejorar la productividad en la fabricación seguía existiendo, como al principio de la revolución industrial y los tiempos de mecanizado

debían mejorarse si las compañías querían seguir siendo competitivas. Y es aquí cuando los técnicos de ventas llamaban a la puerta ofreciendo eso precisamente. En España, a los carburos cementados con base de carburo de tungsteno se les denominó METALES DUROS.

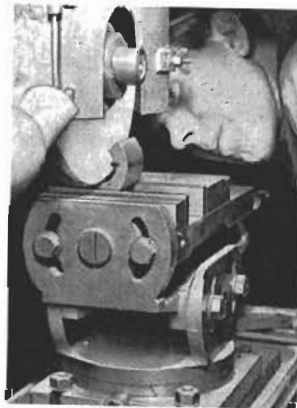
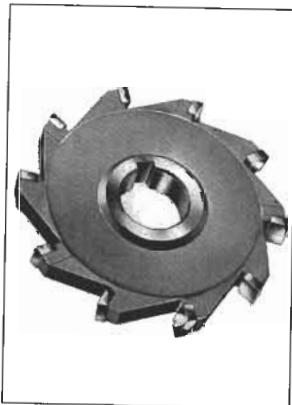
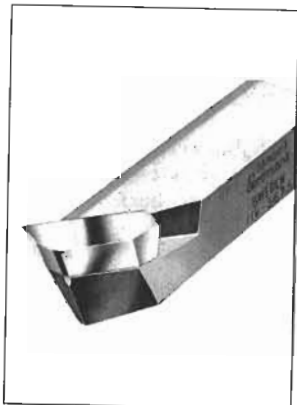
Las herramientas soldadas eran más caras. Las plaquitas de metal duro tenían que hacerse para satisfacer tanto las demandas del mecanizado como para ajustarse en sus alojamientos en los mangos de las herramientas, donde se soldaban. Las tensiones residuales provocadas por la soldadura y los continuos reafilados, no eran favorables para la herramienta. Los costes de la herramienta para los utilizadores debían incluir por tanto algo más que el precio de compra y los costes de inventario.

Por otra parte, no había mucha flexibilidad en la consecución de grandes variaciones en la geometría de corte para los filos. Debía hacerse un esfuerzo para obtener ángulos de desprendimiento e incidencia adecuados, junto con un filo que pudiera servir como rompevirutas.

El afilado de las herramientas de plaquita soldada podría variarse de acuerdo con unos pocos tipos de filo diferentes, donde la forma de la muela de afilar producía la geometría del rompevirutas. Se consiguieron ángulos de desprendimiento, radios y otras características adecuadas para varias aplicaciones, mediante la utilización de muelas de afilar de diamante y dispositivos ajustables.



Producción en serie de herramientas soldadas durante los años 40



Herramientas con placas de metal duro soldadas para torneado y fresar



También había comenzado el desarrollo de las calidades de metal duro para herramientas soldadas, con vistas a optimizar varias operaciones. En 1947, existían seis calidades en la gama Coromant, y había un gran número de fabricantes de metal duro en el mundo industrial. Cada una de las seis calidades tenía un color diferente en el mango para identificarlas y para hacer frente al mecanizado de diferentes materiales. La capacidad en cuanto a la velocidad de corte con estas calidades era mayor que con las mencionadas en la tabla anterior, limitadas por las máquinas-herramienta.

- S1: acero y fundiciones de acero con altas velocidades de corte, preferentemente para acabado en máquinas modernas.
- S2: el mismo material y datos, pero con operaciones con las mayores exigencias que conllevan creces variables.
- S3: de nuevo, el mismo material, pero con velocidades moderadas que requieran mayor tenacidad en condiciones desfavorables, pero con velocidades varias

veces superiores a las del acero rápido en la operación correspondiente.

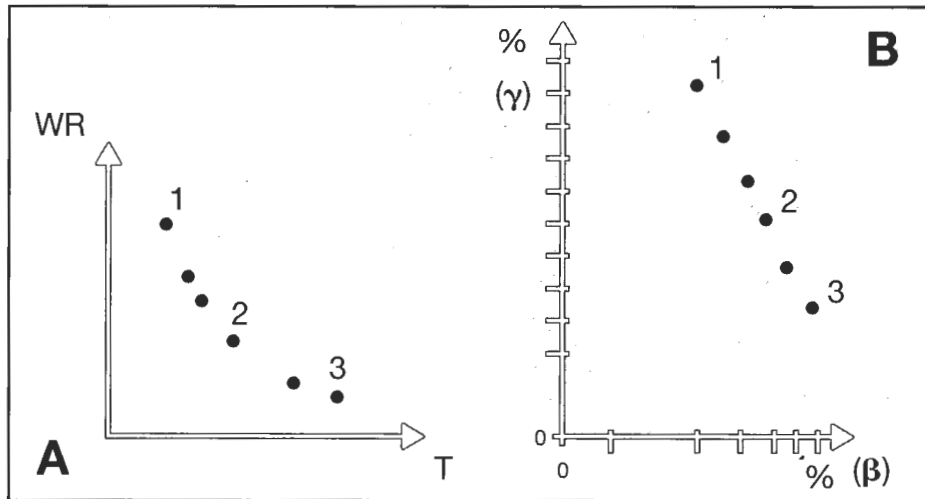
- G1: fundición y otros materiales de viruta corta, así como aluminio, con altas velocidades de corte.
- G2: madera dura, plásticos, etc.
- H1: fundición dura, aleaciones de aluminio y otros materiales muy abrasivos.

El desarrollo continuó variando el sistema de fabricación del polvo y el proceso de sinterizado, así como el tamaño de los granos, siendo posible obtener características muy diferentes. Algunas de las calidades tenían una estructura de grano muy fino, lo que permitía llevar a cabo afilados con filos muy agudos, haciendo que las herramientas fueran adecuadas como herramientas de torneado para trabajar con espesores de viruta muy pequeños. Por otra parte, existían otras calidades con mayor tenacidad, permitiendo desprendimientos muy positivos y bajas velocidades de corte en condiciones muy desfavorables. Sin embargo, la resistencia al desgaste era bastante baja.



Diferentes calidades de metal duro mejoran el rendimiento





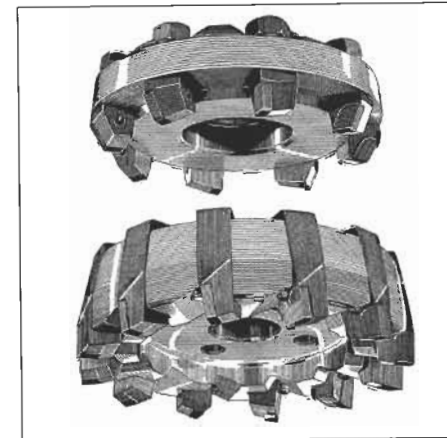
Resistencia al desgaste/tenacidad y fases del metal duro

Esta fue la situación de compromiso que caracterizó a las calidades de metal duro durante muchos años. La calidad (1) tenía un alto nivel de resistencia al desgaste y un bajo nivel de tenacidad. La calidad (2) tenía niveles moderados, tanto de resistencia al desgaste como de tenacidad y la (3) tenía altos niveles de tenacidad pero bajos niveles de resistencia al desgaste. (En el diagrama (A) WR es la resistencia al desgaste y T es la tenacidad.

Los metales duros desarrollados se componían normalmente de dos o tres fases: Carburo de tungsteno, WC, metal aglomerante ( $\beta$ ), y si había incorporado algún carburo adicional como TiC, TaC o NbC ( $\gamma$ ). Con una composición dada, las propiedades de las fases eran controladas por el proceso de fabricación. Se decía que la fase WC era para proporcionar la resistencia básica, la ( $\beta$ ) determinaba la tenacidad y la ( $\gamma$ ) tenía una particular incidencia en la resistencia al desgaste. Haciendo un diagrama (B) con las fases ( $\gamma$  y  $\beta$ ) esto reflejaba el compromiso entre las principales propiedades del material de la herramienta de corte.

Con el tiempo se desarrollaron nuevas calidades capaces de reemplazar a dos o más de las calidades existentes, cubriendo una amplia gama de aplicaciones con propiedades mejoradas. La lucha consistía en ampliar las calidades, disponer de una mejor combinación de tenacidad y resistencia al desgaste, moviéndose en dirección hacia la derecha y hacia arriba en el diagrama WR/T. Esto se logró más tarde con las calidades mejoradas "Premium". En los extremos finales estaba F1, a la que se le describía con propiedades cerámicas, y S8, con propiedades de acero rápido.

Los ensayos con cerámicas como herramientas de corte, comenzaron durante los años treinta. Pero en lo que respecta a plaquitas, se desarrollaron más ampliamente durante los años cincuenta. Entonces solamente se encontró adecuado al óxido de aluminio. De nuevo, el material de la herramienta era difícil de utilizar satisfactoriamente, puesto que requería condiciones muy estables y altas velocidades. Su gama de aplicación era muy limitada y aún sigue siéndolo relativamente, a pesar de que las



Primeras fresas de planear

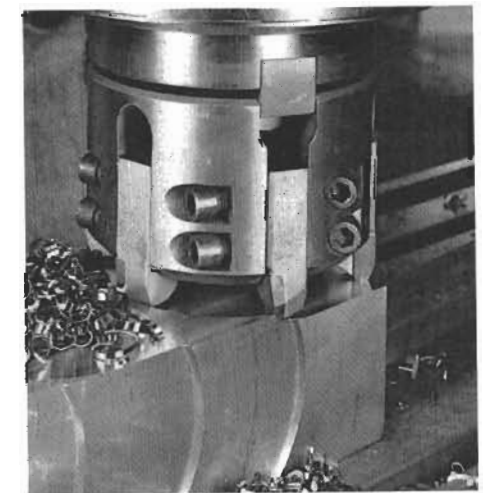
calidades más modernas han ampliado la utilización de las cerámicas. Los materiales super duros de herramientas, como por ejemplo, nitruro de boro cúbico y diamante policristalino, no se introdujeron hasta finales de los años setenta. Estos tienen áreas de aplicación más limitadas.

### DESARROLLO DE HERRAMIENTA

Las fresas también se desarrollaron mucho más que las fresas frontales soldadas, en las que las plaquitas de metal duro eran soldadas en alojamientos en el cuerpo de la fresa, y después afiladas. Las fresas frontales de gran diámetro eran diseñadas basándose en la utilización de las herramientas soldadas de torneado. Al principio, las herramientas de torneado eran fijadas de diferentes formas en los cuerpos de las fresas, llegando a diámetros de hasta 400 mm. Se introdujeron las fresas escalonadas, con herramientas posicionadas para llevar profundidades de corte individuales. Las herramientas eran posicionadas a diferentes profundidades y distancias desde el centro de la fresa. Era posible profundidades de corte de 12 mm. en incrementos de cuatro

x 3 mm. Se pudieron utilizar mayores avances por diente, llegando a avances por revolución de 0,4 mm y superiores, para las aplicaciones ordinarias en acero. Se mejoró la calidad superficial puesto que ésta era generada consecuentemente por un solo filo de corte. Si las fresadoras tenían la suficiente capacidad, y muy pocas la tenían, podían emplearse avances de mesa de 650 mm/min y velocidades de corte de 100 m/min. Esto era un rendimiento impresionante a finales de los años 40.

Con estas fresas la geometría y el ángulo de posición podía variarse considerablemente para adaptarse mejor a las distintas aplicaciones. Sin embargo, el afilado y puesta a punto de las herramientas era un trabajo que llevaba tiempo. Aunque muy productivas con altos regímenes de arranque de metal y una razonable calidad superficial, era necesario un laborioso trabajo de preparación en el cuarto de herramientas y puesta a punto en la máquina.



Fresa escalonada