

Richard Nakka's *Experimental Rocketry* Web Site

Mecanizado de Toberas para cohetes



Traducido por José L. Sanchez

- [Introducción](#)
- [Materiales para toberas de cohetes](#)
- [Empleo de Cianotipos](#)
- [Herramientas necesarias](#)
- [Procesos de torneado](#)
- [Tipos de tornos](#)
- [Mecanizado de la tobera](#)
- [Seguridad](#)
- [Apéndice A – Fabricación de herramientas](#)
- [Apéndice B -- Escariar](#)
- [Apéndice C – Links de utilidad](#)
- [Apéndice D – Ejemplos de toberas](#)

Introducción.

Aprendí el uso básico de un torno de metales en el instituto asistiendo a un curso sobre " Talleres mecanicos " que formaba parte " de los trabajos industriales " del plan de estudios. De hecho, hice una de mis primeras toberas para cohete usando un torno de la escuela, bajo la dirección de mi profesor de taller que me enseñó como realizar los aspectos más difíciles del torneado, como el mecanizado hacia el exterior del cono interior. Algunos años más tarde, mi hermano compró un pequeño torno mecánico para nuestro taller de casa, un modelo compacto fabricado en Austria marca *Edelstal*, de 10 pulgadas de diámetro, y 24 pulgadas entre centros. Con el uso esta máquina, cada vez fui mejorando mis habilidades de trabajo de torno y realizando satisfactoriamente un gran número de toberas como las de los motores *A-100*, *B-200* y *C-400*. He usado este mismo torno en diversas ocasiones recientemente, para fabricar la tobera *Kappa*, que más tarde fue usada para *el cohete Cirrus Uno*. Hace unos años compré un torno mecánico para mi propio taller, un modelo de fabricación china de mediano tamaño de la marca *Craftex*, con una diámetro de 12 pulgadas y también de 24 pulgadas entre centros. Siendo más grande y con un motor más potente, así como mayor capacidad de mecanizado, hace que el trabajo de fabricar una tobera sea mas fácil. La tobera

más grande que he hecho hasta el momento es de 75 mm para el motor *Lambda*. Todas las toberas que he fabricado han sido realizadas con un torno manual, con una excepción. Asistiendo a la universidad, yo tuve la oportunidad de programar y controlar un pequeño torno CNC para hacer una tobera experimental en el que destacaba su perfil interno muy redondeado. El motivo era compararlo con una tobera "conica" estandar para el motor *B-200* en una prueba estática. Este trabajo formaba de mi tesis de graduación.



Figura 1. Izquierda: El torno *Edelstal*, Derecha: My torno *Craftex*.

Sin duda, mecanizar un inyector de cohete es un desafío, sobre todo para los que tienen una experiencia limitada en trabajos de mecanizado metálico. El torneado de un inyector conlleva algunos de los aspectos más difíciles del trabajo a torno, debido a la complejidad de su geometría y la necesaria exactitud, combinada con el deseo de producir una tobera de peso ligero por lo que la mayor parte del material sobrante ha de ser cortado. El mecanizado de una tobera es emplear tiempo, sobre todo cuando se usa un torno pequeño para hacer una tobera grande. Por ejemplo, el inyector *Kappa* me tomó 18 horas de trabajo de máquina. Recientemente, con técnicas mejoradas, mayor experiencia y un torno más grande, una tobera de tamaño medio se puede realizar en 4 o 5 horas.

De todos modos como mucho soy " un mecánico aficionado ". La mayor parte de lo que yo he aprendido en cuanto a técnicas de torneado ha sido sobre el terreno, experimentando con técnicas de trabajo diferentes, de libros e inevitablemente, cometiendo errores. El proceso de fabricación de una tobera presentado aquí, es una compilación (o quizás la destilación) de esta experiencia, usando métodos que han resultado ser razonablemente buenos para mí. Hay indudablemente variantes que se pueden usar satisfactoriamente y como tal, lo que aquí presento debe ser tomado más como una pauta que como una metodología de trabajo. La mejor forma de fabricar un inyector seguramente es el resultado de una evolución continuada de cada individuo incluyendome yo mismo. Habría que perder el miedo a experimentar y cualquier sugerencia para mejorar o simplificar son siempre bien recibidas.

Materiales para toberas de cohete.

La tobera es un elemento clave en un motor de cohete. Este componente sirve para acelerar una voluminosa masa de gases de combustión inmóviles a velocidades supersónicas, dentro de una distancia muy corta, al hacer esto, produce el empuje útil. En el logro de esta notable hazaña, una tobera está sometida a muy altas presiones, y a un flujo muy veloz y denso de gases a altas temperaturas. Por ello, una tobera debe ser fabricada con un material que sea capaz de resistir tales condiciones de carga estructural y térmica. También, cualquier restricción al libre flujo de los gases debe ser reducida al mínimo, lo que hace necesario que la superficie de flujo esté lo más lisa y pulida posible. Considerando el esfuerzo y el tiempo invertido en la fabricación de la tobera, obviamente es deseable la posibilidad su uso continuado. Por suerte, el acero ordinario suave es adecuado para esta aplicación, al menos, para la mayor parte de los propulsores experimentales. Cualquier acero suave laminado en frío o en caliente puede usarse. El acero laminado en caliente es más suave y como tal es más fácil de cortar. El laminado en frío proporciona un mejor acabado superficial con menos esfuerzo y produce virutas menos problemáticas. Por lo general uso acero AISI 1018, quizás porque es el que está más fácilmente disponible.

Una alternativa posible es "Ledloy" (12L14) que es un acero con una pequeña aleación de plomo. Recientemente he realizado un inyector con este acero, y se corta como un sueño. Quizás el aspecto más agradable de mecanizar Ledloy es que las virutas se desprenden rompiéndose en pequeños trozos que desaparecen de la herramienta de corte, a diferencia de la viruta larga "filiforme" que el acero suave (como el 1018) forma. Hasta el momento, no he encendido ningún motor con esta tobera, por consiguiente la cuestión sobre su resistencia al calor es todavía desconocida. Ledloy se encuentra fácilmente, pero su costo es ligeramente más elevado que el acero normal. Otra alternativa es el acero inoxidable. Ambas posibilidades deberían usarse con precaución ya que éstas aleaciones pueden ser menos resistentes a altas temperaturas que el acero suave. El acero de aleación 4130 no se debe usar, debido a su inferior punto de fusión y dificultad de mecanizado

Actualización: *Mayo 29/05* la tobera para motor cohete "de la clase de I del Liberty" fue mecanizada con acero 12L14. La intención era reducir el trabajo requerido para mecanizar esta tobera de grandes dimensiones, y este era el caso. Después de tres encendidos, la tobera no mostró ningún tipo de erosión en la garganta, ello ha confirmado la capacidad del acero 12L14 de resistir el calor de la combustión.

Un material *no metálico* alternativo especialmente apropiado para este uso es el grafito, aunque el empleo de este material requiera consideraciones especiales, debido a la gran cantidad de polvo sucio y eléctricamente conductor que se genera durante el mecanizado. Una vieja aspiradora con un filtro para polvo muy fino va muy bien para eliminarlo. Las toberas de grafito son ideales para su utilización con propulsores de alta temperatura de combustión como el APCP, para el cual el acero no es conveniente.

Aleaciones con el punto de fusión bajo como el aluminio y el cobre no son adecuados para toberas multiuso, a no ser que se utilice un inserto en la garganta resistente a las altas temperaturas (esto complica la fabricación). Esta técnica constructiva ha sido usada con éxito por Hendrik Lau en su motor cohete [HL6000M](#). (Ver enlace). La tobera ha sido fabricada en aleación de aluminio y destaca el inserto de grafito de alta densidad (Ver las fotos del apéndice D).

Uso de planos.

Es, desde luego, bastante factible hacer una tobera sobre la marcha sin la necesidad de un plano, comúnmente referido como anteproyecto. Sin embargo, el camino más racional para el diseño y la construcción de un motor cohete implica el diseño de una tobera para lograr el objetivo previsto. Este proceso de diseño, define la forma de la tobera y sus dimensiones. Los parámetros de diseño claves para una tobera estándar cónico de Laval, son los ángulos convergentes y divergentes así como los diámetros de entrada y de salida de la garganta. También, el perfil exterior de la tobera se mecaniza para reducir al mínimo la masa de la misma una vez terminada. Una tobera que no ha sido aligerada exteriormente funcionará igual de bien. ¡Sin embargo, si está fabricada en acero, será muy pesada! Las toberas de grafito no requieren ser aligeradas exteriormente ya que este material es muy ligero, tiene aproximadamente la mitad de la densidad del aluminio. Otros detalles de diseño incluyen la determinación del diámetro exterior en la zona que se introduce en el interior de la cubierta del motor, así como las dimensiones y posición de los alojamientos de las juntas tóricas, que sellan esta parte del motor, además del sistema de cierre de la cubierta del motor y que normalmente serán tornillos de acero o anillos elásticos (seger). Es importante reconocer que cuanto más cuidado y esfuerzo se ha puesto en la creación de un plano exacto y detallado, más fácil es fabricar la tobera y menos probabilidad de equivocarse durante el mecanizado, que podría reducir las horas de esfuerzo a un trozo de chatarra. Los programas de diseño CAD (hasta los más básicos) son ideales para realizar un útil dibujo de la tobera. Yo uso QuickCAD, ya que lo encuentro fácil de usar, potente y relativamente barato. La versión freeware, "Shareware (Software de evaluación)" o programas CAD de prueba también están disponibles. O bien, los dibujos a escala también pueden ser realizados por el procedimiento tradicional, a mano.

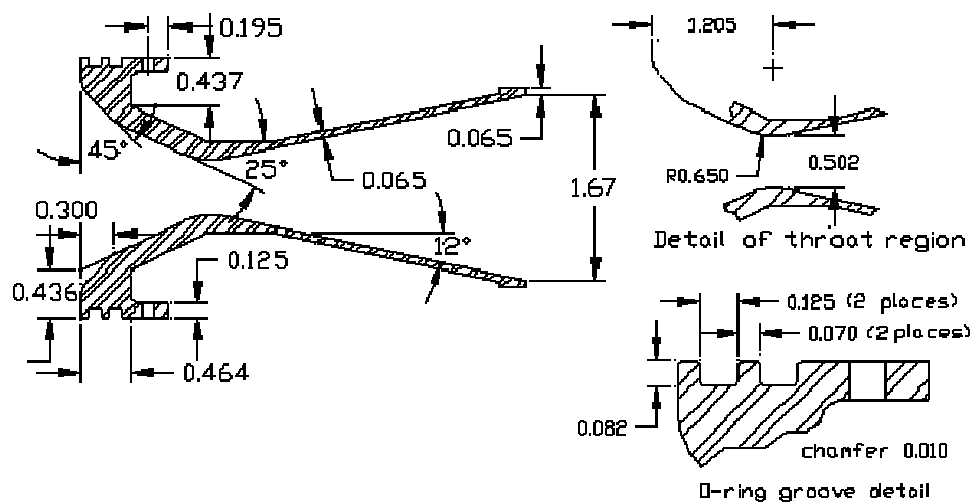
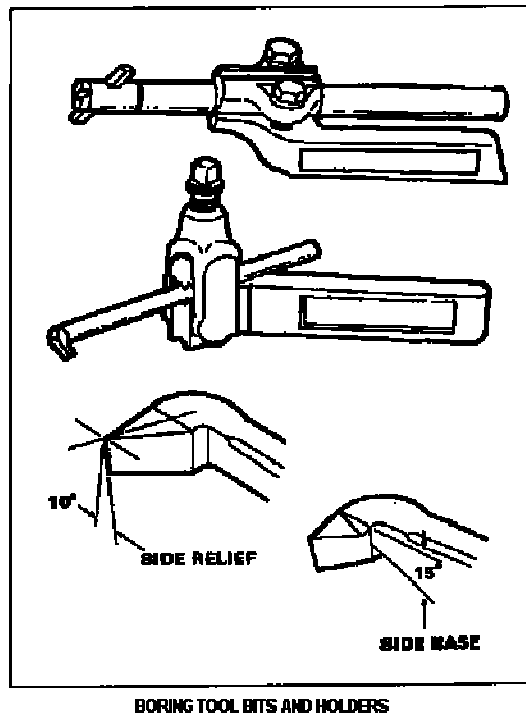


Figura 2. Dibujo de la tobera Kappa

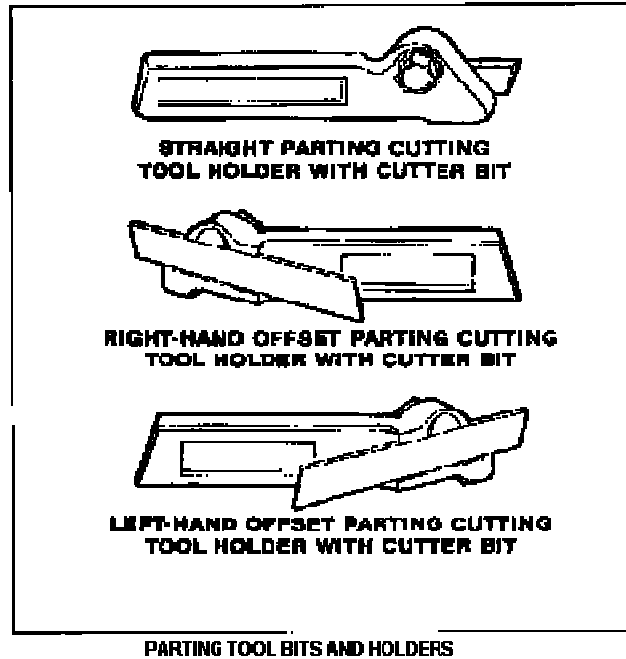
Herramientas necesarias.

Además de un torno mecánico y herramientas de corte básicas como cuchillas de cilindrar y refrentar, unas y otras son necesarias para la fabricación de una tobera. Herramientas de corte para interior son necesarias para torneear los perfiles interiores convergentes y divergentes de la tobera. Para mecanizar toberas con gargantas de un diámetro pequeño, como la A-100, probablemente será necesario fabricarse la herramienta, ya que las comerciales existentes, son generalmente demasiado grandes como para torneear interiores de agujeros de pequeño diámetro. (Ver dibujo)



Como herramientas de partida (Ver dibujo) son necesarias porta herramientas y cuchillas de corte para hacer los alojamientos de las juntas tóricas y anillos elásticos (seger). También es necesario un contrapunto con portabrocas, así como brocas para taladrar. Estas son necesarias para taladrar la garganta y eliminar previamente el material de los conos convergentes y divergentes. Una broca corta y gruesa llamada broca de centrar es necesaria para asegurar un taladrado absolutamente concéntrico (Las brocas normales son demasiado flexibles). Una sierra de arco, es necesaria para cortar la barra de acero a la longitud adecuada. Otro instrumento esencial y de buena calidad es un calibre de diál analógico o digital, para medidas de precisión. Otros instrumentos que son útiles, pero no esenciales son medidores de calibre y un indicador de profundidad.

Tres maneras de auto construirse herramientas para torneear toberas con gargantas de pequeño diámetro se describen en el Apéndice A.



Procesos de torneado.

El mecanizado de una tobera implica seis operaciones de corte inherentes al torneado: **refrentado**, **corte cónico**, **cilindrado**, **cilindrado interior**, **taladrado** y **corte**.

Abajo en la **Figura 3** se muestran los primeros cuatro pasos descritos, así como otras operaciones de torneado.

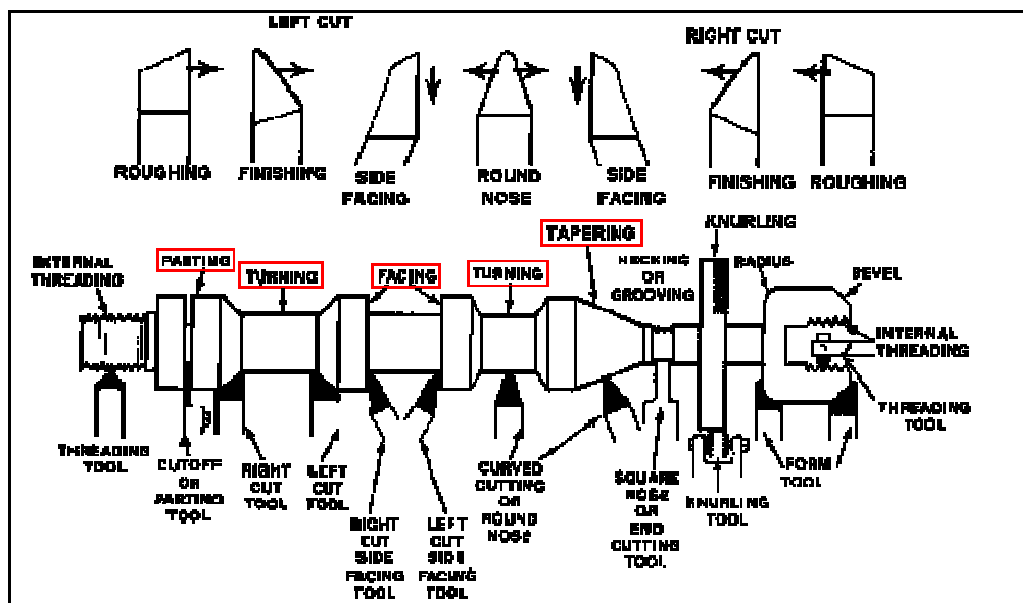


Figura 3. Varias operaciones de torneado

El refrentado se usa para nivelar los extremos de la pieza a tornear y ajustar la misma a la longitud requerida. **El torneado cónico** es la operación que forma el perfil externo de la tobera o cono divergente, se realiza girando el carro transversal (charriot) en el ángulo requerido para producir los conos divergentes. **El cilindrado** es la operación de corte paralelo al eje de la pieza y sirve para reducir el diámetro de la misma. **El cilindrado interior** es una operación que forma el perfil interior de la tobera, y es la operación que mayor tiempo ocupa de todo el proceso. Sin embargo, se puede alijerar el mismo taladrando secuencialmente con brocas de distinto diámetro hasta alcanzar el diámetro interior aproximado y terminar realizando el torneado interior y acabado final del cono. La operación de **corte** es usada únicamente para hacer el cajeado de las juntas tóricas y anillos elasticos (seger), y como tal, no es un proceso de corte verdadero. Sin embargo, el concepto básico es el mismo.

Otro proceso de mecanizado que recientemente he experimentado en la fabricación de una tobera es el uso de un **escariador**. Un escariador es una herramienta de corte puntiaguda que se puede usar para mecanizar el perfil de los conos convergentes o divergentes. El empleo de un escariador se detalla en el **Apéndice B**.

Es muy aconsejable ver los enlaces indicados en el **Apéndice B** para familiarizarse con la construcción y terminología de un torno mecánico, así como de las distintas operaciones de mecanizado.

Consejos generales de torneado.

La utilización de la velocidad de corte correcta es importante para evitar "la vibración" y el recalentamiento de la herramienta de corte (con resultado de desgaste prematuro). Una velocidad de corte más alta puede usarse con cuchillas de carburo. Para operaciones de corte básicas como cilindrado o refrentado, una buena velocidad de corte superficial para acero AISI 1018 es 130 fpm (pies. por minuto) para cuchillas HSS, de 1.5 a 2 veces esta velocidad para cuchillas de carburo. El acero Ledloy 12L14 según se informa puede ser cortado a 325 fpm con cuchillas HSS. La **Tabla 1** correlaciona la superficie de corte y la velocidad al diámetro de la pieza y las revoluciones por minuto.

Table 1

SURFACE FEET PER MINUTE

PART DIA- METER IN INCHES	15'	20'	25'	30'	40'	50'	60'	70'	80'	90'	100'	110'	120'	130'	140'
	REVOLUTIONS PER MINUTE														
.018	3887	4890	6112	7334	9778	12224	14669	17114	19558	22003	24448	26893	29338	31782	34227
.031	1834	2445	3056	3667	4880	6112	7334	8557	9779	11002	12224	13446	14668	15891	17114
.047	1222	1630	2037	2445	3260	4075	4890	5705	6519	7334	8149	8964	9779	10594	11409
.062	917	1222	1528	1833	2445	3056	3667	4278	4889	5500	6112	6723	7333	7945	8556
.094	611	815	1019	1222	1630	2037	2445	2852	3260	3667	4075	4482	4890	5297	5706
.125	456	611	764	917	1222	1528	1833	2139	2445	2750	3056	3361	3667	3973	4278
.156	367	489	611	733	978	1222	1467	1711	1956	2200	2445	2689	2934	3178	3423
.187	308	407	509	611	816	1019	1222	1426	1630	1833	2037	2241	2445	2648	2852
.25	229	306	382	458	611	764	917	1070	1222	1375	1528	1681	1833	1986	2139
.312	183	244	306	367	489	611	733	856	978	1100	1222	1345	1467	1589	1711
.375	153	204	256	306	407	509	611	713	815	917	1019	1120	1222	1324	1426
.437	131	175	218	262	349	437	524	611	698	786	873	960	1048	1135	1222
.5	115	153	191	229	308	382	458	535	611	688	764	840	917	993	1070
.625	92	122	153	183	244	306	367	428	489	550	611	672	733	794	856
.75	78	102	127	153	204	255	306	367	407	458	509	560	611	662	713
.875	66	87	109	131	175	219	262	306	349	393	437	480	524	568	611
1	57	76	98	118	153	191	229	267	306	344	382	420	458	497	535
1.125	51	68	85	102	138	170	204	238	272	306	340	373	407	441	475
1.25	46	61	76	92	122	153	183	214	244	275	306	338	367	397	428
1.375	42	56	70	83	111	139	167	194	222	250	278	306	333	361	389
1.5	38	51	64	76	102	127	153	178	204	229	255	280	306	331	357
1.625	35	47	59	71	94	118	141	165	188	212	236	259	282	306	329
1.75	33	44	55	66	87	109	131	153	175	196	218	240	262	284	306
1.875	31	41	51	61	82	102	122	143	163	183	204	224	244	265	285
2	29	38	48	57	76	96	115	134	153	172	191	210	229	248	267
2.25	26	34	42	51	68	85	102	119	136	153	170	187	204	221	238
2.5	23	31	38	46	61	76	92	107	122	138	153	168	183	199	214
2.75	21	28	35	42	56	70	83	97	111	125	139	153	167	181	194
3	19	26	32	38	51	64	76	89	102	115	127	140	153	166	178
3.25	18	24	29	35	47	55	71	82	94	106	118	129	141	153	165
3.5	16	22	27	33	44	53	66	76	87	98	109	120	131	142	153
3.75	15	20	26	31	41	51	61	71	81	92	102	112	122	132	143
4	14	19	24	29	38	48	57	67	76	86	96	105	115	124	134
4.5	13	17	21	26	34	42	51	59	68	76	85	93	102	110	119
5	12	16	19	23	31	38	46	54	61	69	76	84	92	99	107
5.5	10	14	17	21	28	35	41	49	56	63	70	76	83	90	97
6	10	13	16	19	26	32	38	45	51	57	64	70	76	83	89
6.5	9	12	15	18	24	29	35	42	47	53	59	65	71	76	82
7	8	11	14	16	22	27	33	38	44	49	55	60	66	71	76
7.5	8	10	13	15	20	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71
8	7	10	12	14	19	24	29	34	38	43	48	53	57	62	67
8.5	7	9	11	13	18	23	27	32	36	40	45	49	54	58	63
9	6	9	11	13	17	21	25	30	34	38	42	47	51	55	59
9.5	6	8	10	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
10	6	8	10	12	16	19	23	27	31	34	38	42	46	50	54

Ejemplo: Una tobera está siendo mecanizada en acero 1018 de 1 pulgada de diámetro laminado en frío, usando una herramienta de corte HSS. Según la Tabla 1, la velocidad de corte deberá ser de 130 fpm. y las RPM de 479 (aproximadamente).

El avance del carro, y la profundidad de corte, son también importantes. El avance es la velocidad lineal con la cual la herramienta de corte se desplaza a lo largo de la pieza; la profundidad de corte es el espesor del material que arranca con cada pase de la herramienta de corte. En operaciones básicas como el cilindrado, pueden ser admisibles avances y profundidades de corte mas severas que en operaciones mas delicadas, como el torneado de interiores. Para el cilindrado, la velocidad de corte ideal deberá producir, por efecto de la temperatura, una viruta de corte color amarillento. Una viruta de coloración azulada indica una excesiva profundidad de corte. Profundidades de corte ligeras proporcionan un acabado mas fino pero alargan el proceso de mecanización. Con herramientas de acero rápido tipo HSS deberá usarse aceite refrigerante. En las operaciones de taladrado y roscado utilice bastante aceite refrigerante. Las cuchillas de carburo de tungsteno deben usarse sin refrigerante. Normalmente uso refrigerante soluble en agua, principalmente porque este se limpia más fácilmente, es inodoro y sin humo. Sin embargo, aceites más espesos pueden dar un mejor acabado superficial. El jurado todavía no se ha pronunciado sobre esta materia. Tanto las herramientas HSS

como de carburo de tungsteno deben ser afiladas con regularidad. Esto facilitará la operación de recorte así como asegurará un mejor acabado superficial. Para cuchillas HSS, use una piedra de afilar de óxido de aluminio. Para el carburo de tungsteno, una de carburo de silicio verde que afila bien (no usarla para cuchillas HSS).

Mecanizado de la tobera

Estos son los pasos básicos que sigo para el mecanizado de una tobera.

- 1 **Medida y corte** de la barra de acero redonda, a la longitud requerida, incrementada con un pequeño margen (1.5 mm) por si el corte no estuviera totalmente a escuadra.
- 2 La pieza se fija centrada en el torno, **y ambos extremos son refrentados**, dejándolos completamente a escuadra. Deberá eliminarse todo el material sobrante de tal forma que, la pieza se quede de una longitud igual a la longitud final de la tobera .
- 3 Luego se efectúa el cilindrado de la superficie externa de la pieza. Sujete la pieza dejándola sobresalir algo mas de la mitad de la longitud total. elimine el material necesario de la superficie hasta que la pieza gire completamente centrada (quite, digamos, 10 o 20 milésimas de pulgada (0.25 ó 0,5 mm). Retire la pieza y fijela del otro lado, y repita la operación. Las operaciones de cilindrado y refrentado se muestran en la Figura 4.

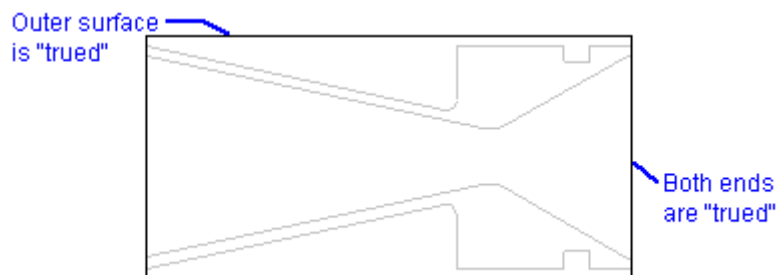


Figura 4. Cilindrado y refrentado de las superficies exteriores.

Las líneas en negro representan el contorno exterior de la pieza y las líneas en gris el contorno de la tobera acabada.

- 4 Después, la parte de la tobera que penetra en la cubierta del motor debe ser **cilindrada** al diámetro indicado en el plano, tal como se muestra en la Figura 5. Antes de realizar cualquier corte, mida el diámetro (D) de la pieza.

El grosor del material a eliminar (t) siempre viene dado por:

$t = (D - D_f)/2$ donde D_f es el diámetro final que se indica en el plano.

En otras palabras, *el diámetro de la pieza se reduce dos veces en la medida a cortar*. Realice la operación de cilindrado, corte una cantidad adecuada de material en cada pasada. Para mi torno, normalmente

corto 10-15 milésimas en las pasadas de desbaste. Si, por ejemplo, el cálculo indica que deben cortarse 55 milésimas ($t = 0.055$), se realizarían 5 cortes de 10 milésimas, seguidos de un corte de 5 milésimas. Sin embargo, el corte real puede diferenciarse *ligeramente* de 10 milésimas, pare el torno cuando el diámetro final casi se haya alcanzado, tome una nueva medida del diámetro, y calcule de nuevo la cantidad restante que deberá ser cortada. Entonces haga los cortes finales basándose en ella, no quitando más de 5 milésimas por corte.

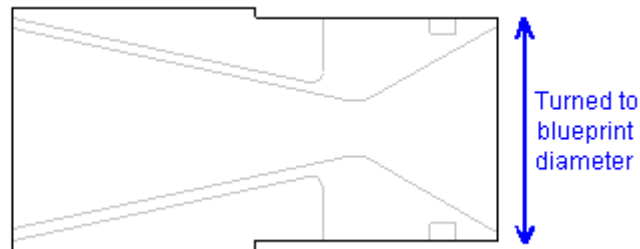


Figura 5. Cilindrado de la parte de la tobera que penetra en la cubierta del motor. Las líneas en negro representan el contorno exterior de la pieza y las líneas en gris el contorno de la tobera acabada.

Ejemplo: Después de cilindrar, el diámetro de la pieza es $D = 1.240$ ". El diámetro indicado en el plano es de 1.080". La cantidad para ser cortada es $(1.240 - 1.080) / 2 = 0.080$, o 80 milésimas. Si cada pasada corta un nominal de 10 milésimas, se requieren 8 pasadas para ser acabado. Después hacer 7 pasadas, tome una nueva medida del diámetro para hallar la medida exacta que deberá ser cortada. Si la medida del diámetro es de 1.102, la cantidad restante para ser cortada es $t = (1.102 - 1.080) / 2 = 0.011$ u 11 milésimas. Yo entonces haría un corte de 8 milésimas, nueva medida, y luego haría el corte final.

- 5 El alojamiento de la junta tórica se mecaniza a continuación. Asegúrese que la pieza esta montada con el mínimo de distancia entre el plato y el contrapunto pero con distancia suficiente para mover la herramienta de corte. Esto debe asegurar que la pieza quede rígidamente apoyada tanto como sea posible, ya que la operación de corte del alojamiento de las juntas es difícil y es probable que produzca vibración. Como una cuchilla comercial de corte es normalmente de 0.090" (2,3 mm), después de realizar el primer corte, deberá desplazar la herramienta y realizar un segundo corte para ensanchar el surco. El corte debera ser realizado a una velocidad de rotación considerablemente más baja que la usada para el cilindrado. La profundidad de corte deberá ser moderada. Si se intenta un corte demasiado profundo, la herramienta puede quedar enganchada en la pieza, y ésta posiblemente destruida (esto me ha pasado más de una vez). Asegúrese que la herramienta de tronzar es **muy aguda**, con los ángulos de corte y de salida apropiados. El filo deberá estar situado **ligeramente por debajo** de la línea media de la pieza. Si la herramienta está situada un poco alta tendrá tendencia a subir. La profundidad del surco es más fácil de determinar usando el

calibre para medir el diámetro de la sección acanalada. De otra manera, usando un medidor de profundidad para medirla directamente. La mayor parte de calibres disponen un indicador de profundidad. Después de cortar el surco a la profundidad indicada en el plano, es conveniente matar el filo de los dos bordes agudos del surco (una lima fina es adecuada para tal fin).

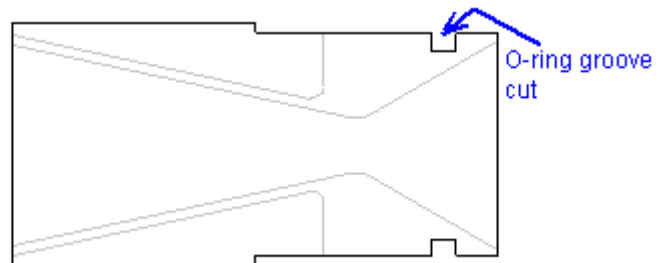


Figura 6. Corte del alojamiento de la junta toroidal.

Las líneas en negro representan el contorno exterior de la pieza y las líneas en gris el contorno de la tobera acabada.

- 6 Después, instale la broca de centrar en el portabrocas situado en el contrapunto y taladre un agujero en el centro de ambos finales de la pieza.
- 7 Taladre **la pieza** al diámetro de la garganta de la tobera. Lo mejor es taladrar aproximadamente la mitad de la longitud de la pieza, luego dar la vuelta a la misma y taladrar la profundidad restante. Use mucho líquido de refrigerar, y limpie a fondo las espirales de la broca con regularidad. Si el diámetro de garganta es muy grande, puede ser prudente taladrar antes, a un diámetro más pequeño.

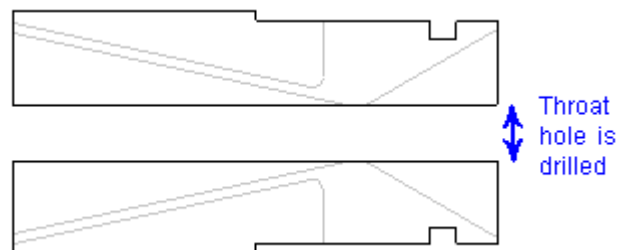


Figura 7. Taladrado de un agujero igual al diámetro de la garganta de la tobera .

Las líneas en negro representan el contorno exterior de la pieza y las líneas en gris el contorno de la tobera acabada.

- 8 **Los conos convergentes y divergentes interiores son mecanizados después, tal como se ilustra en la Figura 8.**

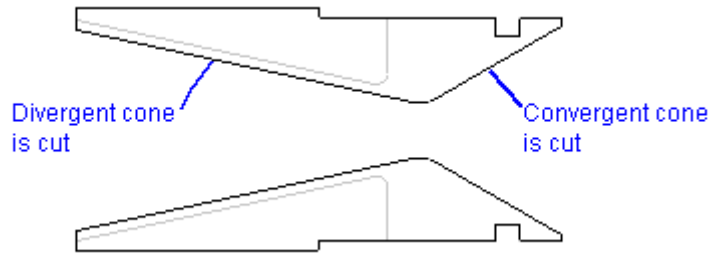


Figura 8. Los perfiles interiores están vaciados hacia fuera.

Las líneas en negro representan el contorno exterior de la pieza y las líneas en gris el contorno de la tobera acabada.

Hay dos posibilidades. Una, usar una herramienta de corte para interiores y cortar las partes cónicas en varias pasadas, o bien, usar una serie de brocas cada vez más grandes para crear un "cono escalonado" (ver dibujo) y luego con una herramienta de corte para interiores dar el perfil deseado.

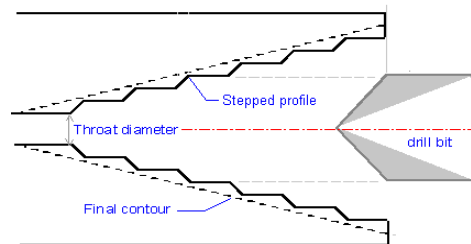


Figura 9. Operaciones de taladrado y torneado.

El segundo método es el que uso actualmente, he comprobado que este método reduce enormemente el esfuerzo requerido para realizar los perfiles interiores convergentes y divergentes. También, reduce

enormemente el trabajo de torneado interior y el tiempo requerido para fabricar una tobera. Para usar este método a pleno rendimiento, es necesario, desde luego, disponer de un juego de brocas suficientemente grandes. Por suerte, un juego de brocas para taladro que van desde $\frac{1}{2}$ " a 1 " (en incrementos de $\frac{1}{16}$ ") no es caro - compré un juego por 30 dólares. La inversión es rentable. Saber exactamente cual es la profundidad de taladrado para cada tamaño incremental es crítico. El taladrar demasiado profundamente puede acabar con una tobera potencial. Por ello, he creado una hoja de cálculos *de Excel* ([NOZLBORE.XLS](#)) en ella se explica detalladamente la profundidad exacta de taladro para cada tamaño de broca. Esto simplifica el proceso enormemente y reduce la posibilidad de cometer costosos errores. Los datos de la hoja de cálculo proporcionan la profundidad de taladro requerida e incorpora una tolerancia en profundidad para posibles inexactitudes en el mecanizado. Después del taladrar todos los agujeros requeridos, el resultado es un perfil "escalonado". He usado esta hoja de cálculos para varios inyectores, con resultados excelentes.



Figura 10. Perfil escalonado resultante de los taladros sucesivos.

Finalmente la superficie del perfil indicado en el plano, se lleva a cabo mediante la utilización de una herramienta de corte para interiores, ajustando previamente el carro pequeño o "charriot" al ángulo requerido. El diámetro de salida (o el de entrada) indicado en el plano es el que determina cuando se ha completado la operación de torneado de las conicidades interiores. Durante esta fase de mecanizado, la velocidad giro debería ser la misma que la utilizada para el cilindrado, o ligeramente más alta (Una velocidad demasiado alta provocará un sonido chirriante muy agudo de la herrameinta de corte). La profundidad de corte debe ser pequeña sólo unas décimas cada pasada. Si intentamos cortar demasiado material, sólo conseguiremos que la barra que sostiene la herramienta de corte se flexione y el corte no será perfecto.

- 9 Una vez que los perfiles interiores han sido mecanizados, lo peor ya ha pasado. ¡Es hora de celebrarlo, a partir de ahora el camino es mucho más fácil! El último paso de la operación de torneado es realizar el **perfil externo** del cono divergente, tal como se muestra en la Figura 11.

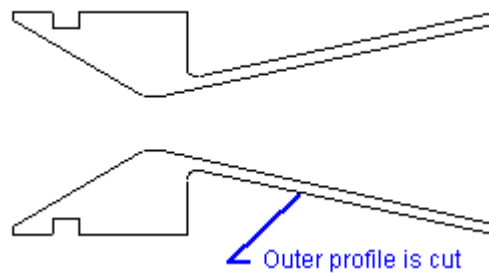


Figura 11 Torneado del perfil exterior del cono divergente

Para realizar este paso, deberemos situar, en primer lugar, el carro pequeño o “Charriot” en el ángulo divergente especificado y seguidamente llevar a cabo la operación de torneado requerida. Esta es una operación sencilla y se puede realizar relativamente rápido, haciendo cortes paralelos sucesivos al eje de la pieza, con ayuda del carro cruzado con avance automático.

Una vez que el material ha sido suficientemente adelgazado, la pieza puede comenzar a vibrar en una frecuencia alta como un chirrido o toque de campana. Esto puede provocar un acabado superficial deficiente. Para eliminar esta vibración, simplemente llene con masilla o plastilina en la parte divergente de la tobera.



Figura 12. Utilización del carro con avance automático para cortar el metal rápido y fácilmente.

- 10 El acabado final de la operación de torneado de la tobera, implica el uso de papel de lija para **pulir las superficies de flujo** dentro del inyector, y a la entrada de la garganta. Este último paso es importante, ya que la eficacia del inyector se ve fuertemente afectada por como el flujo de los productos de combustión discurren en esta zona. La entrada a la garganta es la zona de mas alta aceleración de los productos de combustión que en cualquier otra parte de la tobera. Es deseable reducir al mínimo la aceleración del flujo, para reducir el retraso de velocidad de

partícula asociado con el flujo de dos fases. (Ver *Teoría* sobre [Flujo de dos fases](#) en la página Web para mayor información sobre este tema tan importante). El método que uso para pulir la entrada de la garganta es, cubriendo con papel de esmeril un vástago redondo de madera (de diámetro ligeramente menor que la garganta) con el torno girando a máxima velocidad. Al mismo tiempo, las superficies exteriores de la tobera también pueden pulirse, para eliminar las posibles rugosidades superficiales, surgidas durante la operación de torneado.

- 11 Sólo una tarea falta para completar el acabado de la tobera, debe **taladrar y roscar los agujeros de los tornillos de sujeción** (a no ser que, se vayan a usar anillos elasticos (seger) para fijarla tobera). Como quiera que es importante que estos agujeros se alineen con precisión con los agujeros correspondientes en la cubierta de motor, lo mejor es montar el conjunto temporalmente antes de taladrar. La instalación de las juntas toroidales ayudan a sostener el inyector firmemente en su lugar, utilizar juntas usadas ya que problamente seran dañadas en el desmontaje. Lubrique con grasa para facilitar la instalación de las juntas. En el siguiente paso debe marcar con exactitud la posición de los agujeros sobre la cubierta (recuerde, los agujeros siempre deberían estar a una distancia del borde de al menos $1.5xD$, preferentemente $2xD$, siendo "D" es el diámetro del taladro). Esto se puede lograr cortando una tira de papel (de 1 cm.) y envolviendora con ella una sola vuelta alrededor de la cubierta. Con un lápiz, haga una señal que indique donde se cruzan ambos extremos de la tira. Esto le dará la longitud **de la circunferencia** de la cubierta. Retire la tira de papel y, usando a una regla, divida la longitud de la circunferencia en el mismo número de partes iguales al número de agujeros requeridos. Por ejemplo, si son necesarios 6 agujeros divida la longitud de la tira de papel por 6. Las señales de lápiz sobre la tira de papel indican la posición de los taladros, luego envuelva de nuevo el papel alrededor de la cubierta y transfiera estas señales a la misma.

Ejemplo: Se requiere un total de seis agujeros de 5 mm para la fijación de una tobera. Usando la técnica descrita anteriormente, la circunferencia de la cubierta era de 120 mm. La longitud de la circunferencia dividida entre 6 da 6 intervalos iguales de 20 mm. Se hacen marcas sobre la tira a 20, 40, 60, 80, y 100 mm. A una distancia del borde de $2xD$, los agujeros deben ser taladrados a $2 \times 5 = 10$ mm del filo de la cubierta.

Después, con un punzón centre la posición de los taladros. Taladre un agujero en cada posición en la cubierta y en el inyector, comenzando el proceso de taladrar con una broca de centrar. Después de que este agujero piloto haya sido taladrado (ha de ser de poca profundidad), desmonte la tobera de la cubierta. Seguidamente los agujeros en la tobera son taladrados a la profundidad indicada en el plano y con el diámetro correcto para el tamaño del paso de rosca. Si los agujeros a

roscar son ciegos, utilice unos machos de roscar que profundicen totalmente en el taladro.



Figura 13. Roscado de los agujeros de fijación.

Utilice mucho lubricante y realice la operación de roscado despacio, invirtiendo la dirección de rotación del macho con frecuencia para romper las virutas. Gire $\frac{1}{4}$ de vuelta y después retroceda hacia fuera $\frac{3}{4}$ de vuelta repitiendo esta secuencia hasta que el agujero esté completamente roscado. Los machos pueden fracturarse fácilmente, por el doblamiento inadvertido o por aplicar demasiado momento de rotación. Un macho roto es imposible quitar, no puede ser extraído hacia fuera, no lo intente, puede destruir la tobera con el esfuerzo. Si el macho se ha roto, elimine la parte sobresaliente del del mismo con una esmeriladora. Taladre nuevos agujeros e intente otra vez. **Use sólo machos HSS de buena calidad, nunca el acero al carbón** que son particularmente propensos a la fractura.

Seguridad



Aunque yo nunca haya tenido un accidente usando un torno mecánico (aparte de algún rasguño o pequeña quemadura), ciertamente reconozco que un torno tiene muchos peligros potenciales, y como tal, merece todo el

respeto. El plato y la posibilidad de la pieza de salir despedida son dos peligros obvios potenciales. La viruta afilada que se desprende de la pieza a veces puede engancharse y liarse en el plato. ¡No lleve guantes de algodón o ropa suelta (sobre todo corbata!). Una camisa de manga corta es probablemente mejor que una camisa de manga larga (no obstante, tenga cuidado con las virutas calientes).

Lo siguiente es un listado de algunas directrices básicas en cuanto al empleo seguro de un torno mecánico. Desde luego, usar el sentido común, estar atento, y prestar la debida atención al trabajo que se está realizando es esencial.

- Nunca deje una llave de apriete en el plato en ningún momento. Si el torno se pone en marcha con la llave en el plato, esta saldrá despedida como un proyectil, a menudo hacia la cara del operador. Asegúrese que el torno está desconectado antes de montar o desmontar la pieza.
- Una masa metálica que gira a gran velocidad representa una cantidad significativa de energía almacenada. Un plato, solo es pesado, y sosteniendo una pieza, lo es más. Un atasco, desprendimiento de la pieza, o cualquier otra adversidad es un riesgo para el operador al liberarse esta energía, a menudo manifestada de un modo siniestro. ¡Tenga cuidado, esté atento!
- SIEMPRE LLEVE ROPA ADECUADA Y PROTECCIÓN PARA LOS OJOS USANDO UN TORNO O CUALQUIER OTRA MÁQUINA O HERRAMIENTA. De hecho, llevo protección de ojos siempre que realizo cualquier operación que implica un cambio de energía cinética, por ejemplo, cuando uso un punzón de centrar o hasta cuando uso una sierra de arco.
- Mantenga sus manos lejos del radio de giro de la pieza y herramientas de corte. Es una tentación separar las virutas de metal cuando estas se lian en la herramienta de corte, pero imagínese que pasaría si la viruta de repente se enganchara en el plato rotativo (una pista: la viruta corta como una navaja de afeitar).
- Coloque sus manos lejos del plato rotativo.
- En operaciones de limado, sostenga el extremo de la lima en su mano izquierda de modo que su mano y brazo no esten encima del plato rotativo
- Nunca use una lima sin mango - si es atrapada, esta se convierte en un arma que puede clavarse en la mano.

Apéndice A

I. Si el diámetro de garganta de la tobera es muy pequeño, de tal modo que una herramienta estandar no puede entrar por ella, es a menudo posible modificar la herramienta para que se pueda hacer el trabajo. Es simplemente cuestión **recortar** el material excedente alrededor de la cuchilla para dejar el clareo necesario. Esta labor se realiza mediante el uso de una amoladora. Es importante prevenir que la cuchilla no se caliente. Disponga de un recipiente con agua cerca, para enfriar regularmente la herramienta. Elimine el material excedente, introduzca la

herramienta en la tobera, y verifique que no se produce ninguna interferencia con la misma. Así como se elimina el material excedente de los laterales de la cuchilla, amole también la parte inferior delantera de la herramienta.

II. Hace varios años, después de darme cuenta de que la herramienta que yo usaba era demasiado grande para mecanizar la zona de la garganta (incluso después de eliminar el material sobrante de la misma, busqué en el taller algo para hacer una pequeña herramienta de corte de interiores. Encontré por casualidad una vieja y pequeña lima plana, aproximadamente de $\frac{1}{2}$ " de ancha y $\frac{1}{8}$ " de gruesa. Perfecta. Con cuidado fui amolando la punta para reducir la anchura e improvisé el filo. Comprobé que esta herramienta trabajó bien, y la uso satisfactoriamente para mecanizar las zonas de la tobera donde la herramienta estándar no podía alcanzar. La única desventaja importante de esta herramienta, es que al ser de acero al carbón y no HSS, necesita ser afilada más a menudo (acortándose así su tiempo de servicio).

III. Recientemente, he fabricando una tobera para el nuevo motor *A-100M*, decidí hacer una herramienta de corte con material HSS nuevo, que debería ser capaz de mantenerse afilada durante un tiempo más largo. Hacía poco tiempo que había comprado algunas barras cuadradas de $\frac{1}{8}$ ", más o menos el tamaño perfecto para mecanizar la garganta de $\frac{1}{4}$ " de diámetro. Para sostener la cuchilla, utilicé una barra de acero hexagonal de una longitud de $\frac{3}{8}$ ", en la cual realicé un taladro de un diámetro adecuado para insertar la cuchilla. Para evitar la rotación de la misma realicé dos taladros roscados para dos prisioneros allen de 6-32. Afilé la cuchilla y eliminé el exceso de material cerca de la punta, para maximizar el espacio disponible en la zona de la garganta de la tobera. Esta herramienta ha resultado ser muy eficaz.



Herramienta de corte para interiores modificada comparada con una similar nueva.



Herramienta de corte para interiores fabricada a partir de una lima.



Herramienta de corte para interiores realizada con mango de acero HSS

Apéndice B

Escariador

Como una alternativa a las herramientas de mecanizado interior, *un escariador* se puede usar para hacer el perfil interior del cono divergente de la tobera. Un escariador es una herramienta de corte con varios filos. Están fabricados en acero HSS y pueden ser bastante caros, sobre todo los más grandes, los adecuados para hacer las toberas. Encontré por casualidad dicho escariador recientemente durante una visita a [Princess Auto & Machinery](#), que se especializa en herramientas de segunda mano y repuestos para maquinaria, tenía un precio asequible, 20 USD. Este particular escariador tiene 7.5° de *medio ángulo*, que es bastante menos que el convencional 12° de *medio ángulo* que uso generalmente para mis conos divergentes. La desventaja principal de un ángulo tan pequeño, es el aumento de la longitud de la tobera, y por lo tanto el peso, resultante.

Fabriqué un adaptador para asegurar el escariador a un cono estándar MT3 (cono morse) con el fin de fijarlo en el contrapunto del torno. Todo ello se muestra en la foto inferior.



He experimentado con la utilización de este escariador sobre inyectores de acero y de grafito. Para los inyectores de grafito, es excepcionalmente bueno. Sólo es necesario hacer un taladro piloto a la longitud dela tobera, luego pasar el escariador para ampliar el agujero y formar el cono divergente. Este proceso se ilustra en en la foto inferior.



Para una tobera de acero, es necesario usar el método descrito anteriormente de taladrar agujeros cada vez más grandes y crear un perfil escalonado. Esto sirve para quitar la mayor parte del material. El escariador se usa para terminar de cortar el cono divergente. He observado que el escariador trabaja muy bien, sin vibraciones u otras dificultades. Se ha de utilizar mucho refrigerante para ayudar a mantener afilados los filos agudos de la herramienta.

¡Ahora, sólo falta encontrar un escariador de 12°. barato ...!

Apéndice C

[Links más usuales](#)

Virtual Machine Shop – Se debe ver este sitio, incluye clips de vídeo que explican las partes del torno y varias operaciones de mecanizado: [Engine Lathe - Topics](#)

Otros links:

[Introduction and glossary](#)

[Lathe construction](#)

[Turning operations](#)

[Facing operations](#)

[Parting operations](#)

[Drilling operations](#)

[Turning speeds & feeds](#)

[US Army Training circular TC 9-524 "FUNDAMENTALS OF MACHINE TOOLS"](#)

[Grinding lathe tools](#)

[Grinding your own lathe tools](#)

[Cutting & boring tools \(PDF file\)](#)

Apéndice D

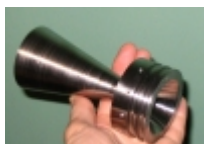
Algunas toberas de cohete que he mecanizado



Hendrik Lau's HL6000M Tobera de aluminio con insertos de grafito



Sugar Shot to Space project "1/4 scale" BEM nozzle



Última actualización 12 Julio 2006