

DIFERENCIACION DE ACEITES DE CORTE PUROS EN OPERACIONES DE AGUJEREADO

J. Szombach⁽¹⁾, G. Papzuck⁽¹⁾, D. Martinez Krahmer⁽¹⁾, S. Solari⁽²⁾ y A. Bruno⁽²⁾.

(1) Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, Instituto Nacional de Tecnología Industrial
Miguelete, Pcia. de Buenos Aires, Argentina

(2) Dirección de Tecnología YPF, YPF SA, Ensenada, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.

E-mail: mkrahmer@inti.gov.ar – acbrunoc@ypf.com – ssolarig@ypf.com

RESUMEN

Las empresas fabricantes de lubricantes, con el objeto de asegurar la calidad del producto a los usuarios, caracterizan la performance de sus aceites destinados al corte de metales, sobre la base de efectuar algunos ensayos tribológicos normalizados como el ensayo de “Four Ball Test”, el “Timken”, entre otros típicos.

Sin embargo, no es posible extrapolar, a partir de los resultados obtenidos en estos ensayos, cual será el desempeño del aceite en sus condiciones reales de uso.

De los tres procesos de mecanizado tradicionales (torneado, agujereado y fresado), el agujereado califica como un método interesante para valorar estos aceites, por varios motivos: se emplea una herramienta “universal” de muy bajo costo (broca helicoidal), dado que puede ser empleada en agujereadoras, así como también en tornos y fresadoras, ya sean estas máquinas convencionales o de control numérico, y que particularmente, tanto el acero rápido, con el que se construyen las brocas, como el proceso de agujereado, requieren del empleo de lubricantes de corte para lograr su mejor funcionamiento.

Usualmente, para la evaluación de estos aceites en condiciones de mecanizado, los investigadores orientan sus mediciones a los esfuerzos de corte, el desgaste de la herramienta y en menor medida, a la rugosidad superficial. A su vez, dada la existencia de trabajos previos que indicarían una relación directa entre un mejor rendimiento de la broca (esto es, mayor cantidad de orificios producidos), a medida que se ve disminuida la fuerza de avance, y en virtud del elevado costo de los ensayos de rendimiento, con el objeto de diferenciar distintas formulaciones de aceites de corte puros, en condiciones de mecanizado, y generar así información técnica orientada al destino de estos lubricantes, se analizaron cuatro aceites de corte puros, a partir de efectuar pruebas de agujereado en una taladradora de columna, sobre barras trefiladas de sección cuadrada, de acero SAE 1060, empleando dos grupos de condiciones de corte, estableciendo en cada caso, la fuerza de avance y el momento torsor medidos por un sistema que combina un osciloscopio digital con un dinamómetro piezoeléctrico de dos componentes.

Efectuados los análisis estadísticos correspondientes, en referencia a las variables de respuesta medidas, sólo el momento torsor, ha evidenciado la capacidad de poder diferenciar los aceites, no sucediendo lo mismo con la fuerza de avance.

La mayor diferencia porcentual entre aquel aceite que midió el valor más alto en referencia a aquel que midió el valor más bajo, resultó ser de 4,1% en el caso de la fuerza de avance, y del 7,8% para el momento torsor.

Se puede asegurar que el aceite Y, analizada la variable momento torsor, en la condición de corte A, presenta el mejor comportamiento, por cuanto produjo los menores valores, para la citada variable.

Tópico 6: Innovación.

Palabras clave: aceites puros, agujereado, fuerza de avance, momento torsor.

1. INTRODUCCION

Es un hecho conocido que, las empresas fabricantes de lubricantes, con el objeto de asegurar la calidad del producto que llega a los usuarios, caracterizan habitualmente la performance de sus aceites destinados al corte de metales, sobre la base de efectuar algunos ensayos tribológicos normalizados básicos como ser el ensayo de “Four Ball Test” [1], el “Timken”[2] u otros.

Sin embargo, no es posible extrapolar, a partir de los resultados obtenidos en estos ensayos, cual será el desempeño del aceite en sus condiciones reales de uso (operaciones de mecanizado de metales).

El desgaste de las herramientas de corte, y en consecuencia, su duración o vida útil, depende fundamentalmente de la temperatura alcanzada en la zona de corte, durante el mecanizado.

En los procesos de arranque de viruta existen tres fuentes de calor. La primera, es aquella que se produce en la región de cizallamiento donde ocurre la deformación plástica del material que se transforma en viruta (en la Figura 1 zona C). La segunda fuente se origina por la fricción entre la viruta y la superficie de ataque (también denominada superficie de salida) de la herramienta por sobre la cual desliza la viruta (en la Figura 1 zona A). Finalmente, la tercera fuente, se produce también por fricción, ahora entre la superficie de incidencia de la herramienta y la superficie de la pieza que se está mecanizando (en la Figura 1, zona B).



Figura 1. Fuentes de calor en la formación de viruta (según Dino Ferraresi [3]).

Es esperable que, todo aceite de corte, provea a los filos de la herramienta, una acción combinada de lubricación-refrigeración eficiente, cuya principal función será prolongar la vida útil del filo por disminución de su temperatura mediante dos acciones simultáneas: enfriamiento y reducción de la fricción. Eventualmente, podrá suministrar además, una mejora de la rugosidad de la superficie mecanizada (la mejor capacidad de los aceites puros es la lubricación).

En consecuencia, la eficiencia de un aceite en condiciones de mecanizado, podrá ser evaluada efectuando una o más mediciones de distintos tipos, a saber: esfuerzos de mecanizado; temperatura en la zona de corte; consumo de potencia; evolución del desgaste de la herramienta; rugosidad de la superficie mecanizada; etc.

Un aceite más eficiente, promoverá una reducción de los esfuerzos de corte, como así también de la temperatura, del consumo de potencia, del desgaste de la herramienta utilizada y de la rugosidad de la superficie mecanizada.

De todos los métodos citados, los investigadores orientan sus mediciones a los esfuerzos de corte, el desgaste de la herramienta y en menor medida, a la rugosidad superficial. En contrapartida, la medición de temperatura es habitualmente descartada, dada la dificultad para obtener valores ciertos que indiquen la temperatura sobre el filo de corte, mientras que la medición de potencia no deja de ser una medición indirecta de los esfuerzos de mecanizado.

En todo proceso de arranque de viruta, intervienen varias partes. La máquina-herramienta, la herramienta y las condiciones de corte, las cuales se asocian entre sí, con la finalidad de efectuar un determinado proceso de mecanizado.

Para los investigadores, el proceso de agujereado utilizando brocas helicoidales de acero rápido, califica como el método de mecanizado tradicional más eficaz para evaluar aceites de corte dado que: se emplea una herramienta de muy bajo costo como es la broca helicoidal, muy fácil de conseguir y a la que no hay que darle forma por afilado como si sucede con las herramientas para torneado de acero rápido. Esta broca constituye además una herramienta “universal”, en razón que puede ser empleada en máquinas tan sencillas como las agujereadoras, así

como también en tornos, fresadoras, ya sean estas máquinas convencionales o de control numérico, y que particularmente, tanto el acero rápido, material con el que se construyen las brocas, como el proceso de agujereado, requieren normalmente del empleo de lubricantes de corte para su mejor funcionamiento.

Otro motivo importante, para la adopción de una técnica de ensayo de evaluación de aceites de corte basada en el proceso de agujereado, radica en los trabajos de W. Belluco [4]. Este autor encontró que es posible valorar un lubricante de corte midiendo en una simple prueba de agujereado, la fuerza de avance, dado que, agujereando acero inoxidable, observó la existencia de una relación directa entre la posibilidad de efectuar una mayor cantidad de orificios (incremento de la vida útil), a medida que se reduce la fuerza de avance.

Por otra parte, también W. Belluco, ahora en su tesis de doctorado [5], sugiere la utilización de la relación entre la desviación estándar experimental (σ) y el rango de variabilidad (ρ), es decir la razón σ/ρ , como una medida de la sensibilidad que posee una variable de respuesta analizada, que permita su segura consideración, como una variable para obtener la diferenciación buscada.

Por todos los motivos expuestos, con el objeto de diferenciar y comparar distintas formulaciones de aceites de corte puros en condiciones de mecanizado, se analizaron cuatro aceites puros, a partir de efectuar ensayos de agujereado, sobre barras trefiladas de sección cuadrada, de acero SAE 1060, empleando dos grupos de condiciones de corte, a los efectos de establecer en cada caso, la fuerza de avance F_a y el momento torsor M_t .

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

2.1.1 Aceites puros

En la Tabla I se muestran los 4 aceites de corte puros usados en los ensayos de evaluación por agujereado, con su denominación y tipo.

Tabla 1. Denominación y tipo de los aceites de corte puros.

Denominación	Tipo
Aceite W	Muestra PA1
Aceite X	Muestra PA2
Aceite Y	Muestra PA3
Aceite Z	Muestra PA4

2.1.2 Material a mecanizar

Para las pruebas de agujereado, se utilizaron barras trefiladas de sección cuadrada de 19mm de lado de acero SAE 1060.

La composición nominal de este acero fue la siguiente (% peso): 0.6% C; 0.6 a 0.9% Mn; 0.03% P (máx.); 0.035% S (máx.); 0.35% Si (máx.); Fe balance.

Se prepararon probetas para su análisis metalográfico. La microestructura fue revelada usando nital 2% por examen visual con un microscopio óptico Zeiss Axiotech. La microdureza fue determinada con un microdurómetro Vickers (Shimadzu HMV 2000) usando una carga de 10N.

2.1.3 Brocas helicoidales

Para realizar las pruebas de agujereado, se emplearon brocas helicoidales comerciales DIN 338 de 7mm de diámetro, construidas en acero AISI M2, cuya composición química nominal fue la siguiente (% peso): 0,9% C; 6% W; 5% Mo; 4% Cr; 2% V; Fe balance.

Las cinco brocas empleadas para realizar los ensayos, se seleccionaron al azar, a partir de un lote constituido por 20 brocas de 7mm de diámetro.

2.2 Condiciones de corte

Previamente a definir las condiciones de corte a emplear en los ensayos, es decir, la velocidad de corte (V_c), el número de revoluciones del husillo (n), y el avance por vuelta (a), a partir de la dureza y el tipo de acero de las barras, se procedió a efectuar la búsqueda de condiciones de corte de referencia, utilizando documentación de fabricantes de brocas y de un instituto de investigación dedicado al mecanizado (ver Tabla II), para operaciones de agujereado con brocas helicoidales de acero rápido aplicadas sobre aceros similares al acero SAE 1060.

Tabla 2. Condiciones de corte de referencia.

Referencia	Material	V_c (m/min)	a (mm/v)
Metcut [6]	Acero SAE 1055 HB 275 a 325	15	0,102
Ezeta	Acero SAE 1045 HB 275 a 325	14	0,08
Castillo	Acero no aleado para herramientas	10-12	0,08

A partir de estos datos, y con el objeto de: adaptarlos a las posibilidades de la agujereadora de columna, así como también, determinar la condición de corte más sensible (capacidad para distinguir los aceites según las mayores diferencias que resultan entre medias de las variables medidas), se adoptaron dos condiciones de prueba, a saber:

Condición A):

$$V_c = 10 \text{ m/min}; n = 455 \text{ rpm y } a = 0,07 \text{ mm/v.}$$

Condición B):

$$V_c = 10 \text{ m/min}; n = 455 \text{ rpm y } a = 0,15 \text{ mm/v.}$$

2.3 Equipamiento

Los orificios se efectuaron en una agujereadora de columna marca WEBO Patent, provista de velocidad de rotación de husillo variable electrónicamente y con caja de avance mecánica, dotada de cuatro avances automáticos: 0.07; 0.15; 0.25 y 0.33 mm/v.

El número de revoluciones de las brocas se verificó usando un Tacómetro digital ONNO SOKKI.

Los esfuerzos de mecanizado se midieron empleando un dinamómetro piezoeléctrico Kistler modelo 9271A de dos canales, con sus amplificadores de carga, y en combinación con un osciloscopio digital Fluke 196C.

En la Figura 2 puede observarse la agujereadora de columna Webo, con el montaje correspondiente del dinamómetro Kistler, amplificadores de carga y el osciloscopio digital Fluke.



Figura 2. Configuración del equipamiento para ensayo.

2.4 Procedimiento de ensayo

En primer lugar, se cortaron trozos de barra de 300mm de longitud aproximada, los cuales fueron identificados numéricamente por acuñado, en una de sus caras y en proximidades a uno de los extremos.

Los diez orificios a realizar por barra, resultantes de emplear cinco brocas (esta cantidad fue calculada en forma estadística en función del número de niveles -cuatro aceites-, de la diferencia de medias y la desviación estándar esperadas, como así también de la potencia del test adoptada como $\beta=0,9$) y dos condiciones de corte, se iniciaron próximos al extremo de barra acuñado con su número correspondiente, siguiendo la secuencia: Condición A; condición B; y comenzando en cada condición por la broca II; VI; X; XI hasta XIX respectivamente, y previamente seleccionadas.

Los orificios fueron efectuados pasantes en una sola profundización de herramienta, utilizando un caudal de aceite aproximado de $Q = 8,5$ l/min.

Mediante el osciloscopio digital se registraron las curvas de Momento torsor (en azul en la Figura 3) y de Fuerza de avance (en rojo en la Figura 3), para cada broca en cada condición de ensayo. A partir de ellas, se determinaron los valores F_{aRMS} y M_{iRMS} por curva, y con el conjunto de estos valores, se calcularon aquellos valores promedios de F_{aRMS} y M_{iRMS} que se emplearon como valores de comparación.

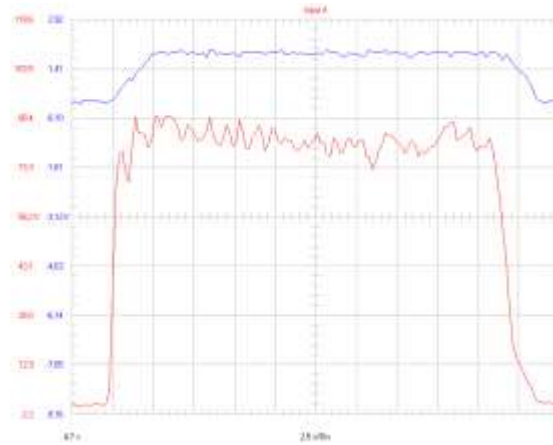


Figura 3. Gráficos tipo de M_i (arriba) y F_a registrados por el osciloscopio.

3. RESULTADOS y DISCUSION

3.1 Material a mecanizar

El acero SAE 1060 presentó una microestructura laminada en caliente, constituida por granos de perlita levemente orientados y ferrita proeutectoide en red. El tamaño de grano perlítico, determinado en la sección transversal fue de tipo dual, variando entre el número 8 al 9.

Las inclusiones correspondieron a los tipos A (sulfuros), serie fina N° 1½ y D (óxidos), serie fina N° 1.

La dureza promedio de las barras resultó ser $HV_{10} 282 \pm 5$.

Una imagen metalográfica de la sección transversal de las barras se observa en el Figura 4.

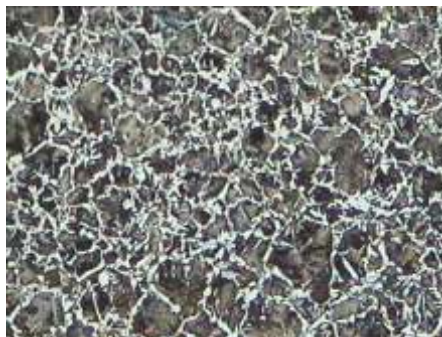


Figura 4. Microestructura del material a agujerear.

3.2 Pruebas de agujereado

Con la finalidad de facilitar la comprensión de los resultados obtenidos, se reunirán por tipo de condición de corte, emitiéndose conclusiones específicas, y al finalizar, se presentarán las conclusiones generales.

3.2.1 Ensayos para la Condición A:

Tabla IV. Valores promedios de F_a y M_t para los distintos aceites.

Aceite	$F_{a\text{ RMS}}$ (kg)	$M_{t\text{ RMS}}$ (Nm)
Aceite W	66,68	1,794
Aceite X	68,66	1,808
Aceite Y	66,60	1,676
Aceite Z	66,26	1,730

La mayor diferencia porcentual entre aquel aceite que midió el valor más alto en referencia a aquel que midió el valor más bajo, arrojan una diferencia del 3,6% en la fuerza de avance y del 7,8% en el momento torsor.

3.2.2 Ensayos para la Condición B:

Tabla V. Valores promedios de F_a y M_t para los distintos aceites.

Aceite	$F_{a\text{ RMS}}$ (kg)	$M_{t\text{ RMS}}$ (Nm)
Aceite W	110,8	3,058
Aceite X	114,2	3,114
Aceite Y	112,8	3,060
Aceite Z	115,4	3,090

La mayor diferencia porcentual entre aquel aceite que midió el valor más alto en referencia a aquel que midió el valor más bajo, arrojan una diferencia del 4,1% en la fuerza de avance, y del 1,8% en el momento torsor.

3.2.3 Análisis estadísticos básicos de los valores medidos

Siguiendo la metodología planteada por Belluco [5] en su tesis doctoral, con el objeto de evaluar la sensibilidad (razón σ/ρ) de la serie de ensayos efectuados, que persiguen como finalidad diferenciar los aceites entre sí, en las tablas VI y VII, se presentan los valores estadísticos básicos, agrupados por variable medida (fuerza de avance y momento torsor), como paso previo a aplicar el método ANOVA sólo a aquellas variables medidas que hayan demostrado sensibilidad para la diferenciación buscada (se entiende por variable sensible aquella cuya razón σ/ρ resulte comprendida entre 0,2 a 0,5).

Tabla VI. Variables estadísticas para la fuerza de avance, en las dos condiciones de corte

Variable estadística	Condición de corte A	Condición de corte B
Rango de variabilidad ρ (kg)	2,4	4,6
F_a promedio para el conjunto de aceites (kg)	67,05	113,3
Rango de variabilidad ρ %	3,6	4,1
Desviación estándar promedio σ (kg)	3,4	6,7
Desviación estándar promedio σ %	5,0	5,9
Razón σ % / ρ %	1,38	1,44

Tabla VII. Variables estadísticas para el momento torsor, en las dos condiciones de corte

Variable estadística	Condición de corte A	Condición de corte B
Rango de variabilidad ρ (Nm)	0,132	0,056
M_t promedio para el conjunto de aceites (Nm)	1,752	3,080
Rango de variabilidad ρ %	7,5	1,8
Desviación estándar promedio σ (Nm)	0,050	0,044
Desviación estándar promedio σ %	2,9	1,4
Razón σ % / ρ %	0,38	0,78

De los resultados obtenidos se concluye que, la única variable que posee la capacidad de diferenciar los aceites, es el momento torsor, en la condición de corte A (razón σ/ρ 0,38).

En consecuencia, aplicamos a ella el método ANOVA, para confirmar el supuesto, y diferenciar finalmente los aceites, mediante las comparaciones múltiples de Tukey.

3.2.4 Análisis de varianza (ANOVA)

Se presenta a continuación el análisis ANOVA aplicado a los valores medidos de momento torsor, para la condición de corte A.

Hipótesis nula H0: las medias de los momentos torsores de los cuatro aceites evaluados son iguales.

Hipótesis alternativa Ha: algunas de las medias de los momentos torsores de los cuatro aceites evaluados no son iguales.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	0,05580	0,01860	7,03	0,003
Error	16	0,04232	0,00265		
Total	19	0,09812			

S = 0,05143 R-cuad. = 56,87% R-cuad. (ajustado) = 48,78%

ICs de 95% individuales para la media
basados en Dev.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Dev.Est.
Aceite W	5	1,7940	0,0669
Aceite X	5	1,8080	0,0421
Aceite Y	5	1,6760	0,0483
Aceite Z	5	1,7300	0,0447

Dev.Est. agrupada = 0,0514
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas
Nivel de confianza individual = 98,87%

Se restó Aceite W a:

	Inferior	Centro	Superior
Aceite X	-0,07915	0,01400	0,10715
Aceite Y	-0,21115	-0,11800	-0,02485
Aceite Z	-0,15715	-0,06400	0,02915

Se restó Aceite X a:

	Inferior	Centro	Superior
Aceite Y	-0,22515	-0,13200	-0,03885
Aceite Z	-0,17115	-0,07800	0,01515

Se restó Aceite Y a:

	Inferior	Centro	Superior
Aceite Z	-0,03915	0,05400	0,14715

La observación de los resultados obtenidos con el empleo del método ANOVA, permite confirmar el supuesto que la variable momento torsor en la condición de corte A, puede ser usada para diferenciar los aceites entre sí, dado que el p-value obtenido fue de 0.003, es decir, podemos rechazar H_0 .

Por otra parte, el método de comparaciones múltiples de Tukey permitió establecer cuales aceites difieren entre sí.

Con el objeto de aportar mayor claridad a lo descrito antes, se adjunta el gráfico boxplot para la variable momento torsor en la condición de corte A (Figura 5), considerando los cuatro aceites ensayados.

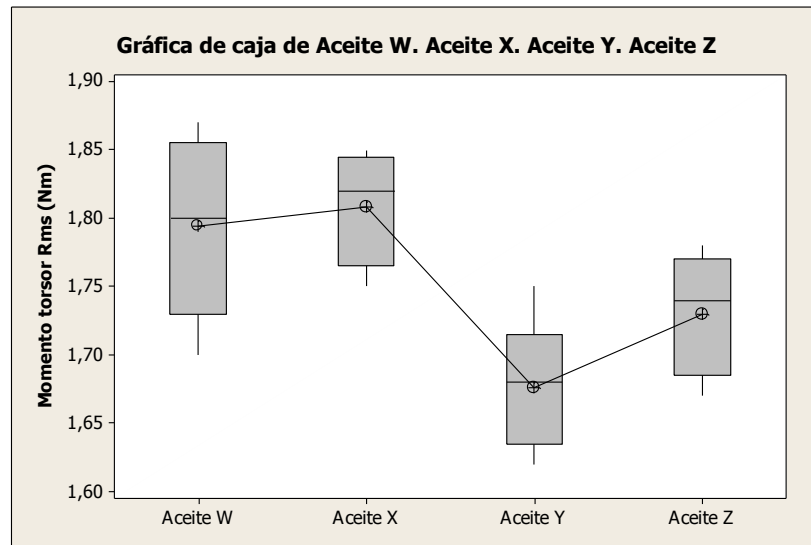


Figura 5. Gráfico boxplot para los momentos M_t en la condición A para los cuatro aceites evaluados.

4. CONCLUSIONES

- De las dos variables de respuesta analizadas, el momento torsor ha presentado mayor sensibilidad.
- La razón σ/ρ ha evidenciado ser un indicador potente de la capacidad de una variable de respuesta para diferenciar la performance de los aceites de corte puros.
- La variable momento torsor, en la condición de corte A, puede ser usada para diferenciar el comportamiento de los aceites evaluados. Esto fue confirmado tanto por la relación σ/ρ , cuanto por el análisis ANOVA.
- El análisis de comparaciones múltiples de Tukey indica que el aceite Y es distinto del aceite X, y que también el aceite Y es diferente del aceite W.
- Se puede asegurar que el aceite Y, analizada la variable momento torsor, en la condición de corte A, presenta el mejor comportamiento, por cuanto produjo los menores valores, para la citada variable.
- Aunque sin sustento estadístico, pareciera ser que el aceite Y, ha presentado el mejor comportamiento global, cuando se comparan simultáneamente las cuatro variables estudiadas.

REFERENCIAS

1. ASTM D2783-88, Measurement of EP properties of lubricating fluids: Four - ball method (*Norma*).
2. ASTM D2782-88, Measurement of EP properties of lubricating fluids: Timken method (*Norma*).
3. Ferraresi, D., Fundamentos do usinagem dos metais, 9ª reimpressão Editora Edgard Blücher Ltda., 1995, pág. 514 (*libro*).
4. Belluco W. y otros, Performance evaluation of vegetable based-oils in drilling austenitic stainless steels, Journal of Materials Processing Technology, 148 (2004), 171-176 (*paper*).
5. Belluco W., Ph.D. Thesis, Performance testing of cutting fluids, Technical University of Denmark, Publication no. IPT 198.00 (MM00.63), Dinamarca, Diciembre 2000 (*Tesis doctoral*).
6. Machinability Data Center, Machining Data Handbook, Third edition, Metcut Research Associates Inc., Cincinnati, 1980 (*libro*).