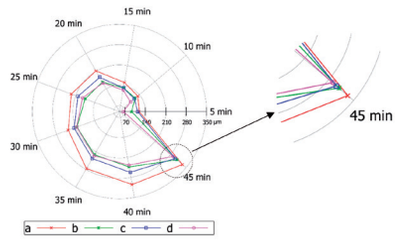
Lubricación por pulverización en procesos de torneado, efectos sobre productividad y calidad



Spray lubrication in turning processes, effects on productivity and quality

Diego Núñez[1], Cesar Arroba[1], Henry Vaca[1], Cristian Pérez[1] y Carlos Morales[2]
[1] UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Av. Los Chasquis y Rio Payamino - Ambato (Ecuador).
[2] FRIO STAR PLUS. Av. Julio Jaramillo y Manuel Cornejo - Ambato (Ecuador).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8843 | Recibido: 14/05/2018 • Inicio Evaluación: 16/05/2018 • Aceptado: 07/03/2019

ABSTRACT

- Productivity and quality are parameters of constant research and development in the machining industry. However, the concern for the environment and sustainability have forced a decrease in the limit of the use of cutting fluids. Given this, it is important to take into account solutions focused on satisfying these requirements. In this work, using MQL spray lubrication with the inclusion of TiO_2 titanium nanoparticles in the turning process of AISI 304 steel, it has been possible to show improvements in the surface quality and decrease in the wear of the cutting tools. It was determined that the inclusion of 0.5% TiO_2 in vegetable oil achieved an improvement in the surface roughness of 50%. In addition, under the conditions of the tests, the flank wear of the cutting tools was reduced by 25%.
- **Key Words:** AISI 304, TiO_2, surface roughness, Taylor equation, service life.

RESUMEN

La productividad y calidad son indicadores de constante investigación y desarrollo en la industria del mecanizado. Sin embargo, la preocupación por el medio ambiente y la sostenibilidad han obligado a una disminución al límite del uso de fluidos de corte. Por tanto, resulta importante tomar en cuenta soluciones enfocadas a satisfacer estas exigencias. En este trabajo, utilizando lubricación por pulverización MQL con nanopartículas de titanio TiO_2 en el proceso de torneado del acero AISI 304 se ha podido evidenciar mejoras en la calidad superficial y disminución en el desgaste de las herramientas de corte. Se determinó que utilizando un sistema de lubricación de MQL + 0.5%TiO_2 en aceite vegetal se mejoró la rugosidad superficial en un 50%. Además, bajo las condiciones de los ensayos, el desgaste de flanco de las herramientas de corte se redujo en un 25%.

Palabras clave: AISI 304, TiO_2, rugosidad, ecuación de Taylor, vida útil.

INTRODUCCIÓN

La primera necesidad de la industria manufacturera desde sus inicios fue reducir costos, luego mejorar la calidad de los productos y en las últimas décadas alcanzar la satisfacción del cliente con productos de alto valor añadido[1]. En especial, en la industria del mecanizado, la productividad y calidad han sido indicadores de constante investigación y desarrollo para alcanzar estos objetivos. Sin embargo, la preocupación por el medio ambiente y la sostenibilidad han obligado a una búsqueda de estrategias y técnicas para hacer de los procesos de fabricación sostenibles y amigables con el medio ambiente. En los últimos años, problemas ambientales como la reducción de la contaminación ambiental, los intentos de mejorar la calidad de vida y reducir los factores contaminantes son de mucha preocupación sobre todo en países desarrollados. Es bien conocido que el uso de lubricantes en los procesos de trabajo con metales prolonga la vida útil de las herramientas, mejora el acabado superficial y disminuye las velocidades de desgaste de las herramientas; no obstante, esto contribuye en gran medida a la contaminación y a varios problemas de salud. [2] [3]

Un estudio de Klocke y Eisenblaetter en 1997 planteó la posibilidad de eliminar los fluidos de corte (mecanizar en seco) pero se concluyó que no es posible para todos los materiales [4]. Este hecho no ha sido posible principalmente debido a que es esencial enfriar la interfaz de corte para incrementar la vida útil de la herramienta y por consiguiente mejorar el acabado superficial. El calor producido debe evacuarse constantemente alrededor de la zona de corte para que la pieza de trabajo y la herramienta puedan mantenerse a una temperatura controlada. El sobrecalentamiento de la herramienta de corte puede reducir su grado de afilado, lo que da como resultado un consumo excesivo de energía y un acabado superficial deficiente [5]. En las últimas décadas se han desarrollado diferentes técnicas de lubricación y enfriamiento de la zona de corte para minimizar el uso de fluidos de corte perjudiciales para el medio ambiente. Dentro de estas técnicas se pueden citar: la técnica de mínima cantidad de lubricante (MQL), el enfriamiento criogénico (CO_2 o Nitrógeno líquido), el aire/vapor/gas comprimido, el refrigerante a alta presión, los lubricantes/refrigerantes sólidos (grafito o disulfuro de molibdeno – MoS_2) [6]. Sin embargo, recientemente se han introducido nuevas técnicas como es el caso del CryoMQL que no solamente combina las ventajas del MQL y el enfriamiento criogénico, sino que también reduce el consumo de CO_2. [7]

Una de las técnicas más extendida es conocida como mínima cantidad de lubricante (MQL) o lubricación por pulverización, término usado cuando pequeñas cantidades de fluido se utilizan en el proceso de corte, según una revisión de *Sharma et. al.* [5] los caudales de lubricante varían de 10 ml/h a 300 ml/h. Sin embargo, se han encontrado trabajos previos en materiales de difícil mecanización donde se han utilizado caudales de hasta 900ml/h. [6]

Elemento	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	N
Composición máx. (%)	0.07	2.0	0.030	0.045	0.75	19.5	10.5	0.10

Tabla A: Composición química del acero inoxidable AISI 304 [20]

Propiedad	Límite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación min. (%)	Dureza Rockwell max. (HRB)
Valor	206.8	517	40	92

Tabla B: Principales propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304. [20]

Hoy en día la lubricación por pulverización MQL es aceptada como una técnica económica y amigable con el medioambiente, reduce sustancialmente el consumo de fluido de corte, incrementa la vida de las herramientas y mejora el acabado superficial de las partes, además los fluidos utilizados son biodegradables y no causan daño al ser humano [8]. Por lo tanto, la lubricación por pulverización ha sido ampliamente estudiada y sugerida por investigadores de todo el mundo para las industrias de corte de metales [2]. Sin embargo, para lograr una buena capacidad de enfriamiento con MQL, el fluido debe tener una alta conductividad térmica para evacuar el calor generado. El enfriamiento es uno de los desafíos más importantes en el proceso de mecanizado. [9]

Teniendo en cuenta los desafíos antes mencionados referentes a los fluidos de corte, es necesario desarrollar nuevos e innovadores fluidos de corte para lograr un enfriamiento adecuado el mecanizado. En este sentido, la adición de nanopartículas suspendidas en los fluidos de corte ha demostrado ser una excelente alternativa para mejorar su rendimiento, dando lugar a los denominados "nanofluidos de corte"[9][10]. Los nanofluidos son fluidos que contienen partículas nanométricas dispersas menores a 100nm y una mejor conductividad térmica respecto a un fluido convencional [5][11]. En la literatura a los nanofluidos se los ha clasificado en función de su capacidad de conductividad térmica: el primer lugar los nanofluidos avanzados con la más alta conductividad térmica como el grafeno, CNTs, diamante, etc, en segundo lugar metales simples con alta conductividad térmica como Au, Ag, Cu, Al, Fe, y por último metales y no metales compuestos como CuO, Al_2O_3, TiO_2, SiC, $SiCO_2$, etc. [12]

Utilizar el aceite vegetal como lubricante ha sido de mucho interés por su excelente rendimiento en el mecanizado y respeto al medio ambiente. Sin embargo, la desventaja de usar aceite vegetal en MQL son las altas temperaturas que se producen debido a su baja capacidad de enfriamiento [13]. La mezcla de partículas nanométricas en el aceite vegetal mejora su conductividad térmica y viscosidad, además se logra reducir las fuerzas que se producen por el corte y avance de la herramienta, mejorando también la rugosidad superficial, esto depende de las concentraciones que tenga en el lubricante. [3][14]

El acero inoxidable es considerado un material de difícil mecanización por las propiedades de endurecimiento por deformación que posee; sin embargo, es un material muy utilizado en la industria por sus excelentes condiciones de resistencia a la corrosión. Si bien es cierto las condiciones de torneado del acero inoxidable AISI 304 han sido ampliamente investigadas (Vc=62-300m/min, ap=0.5-3mm, f=0.1-0.4mm/rev) [15]–[19], la combinación con condiciones de lubricación con la adición de nanopartículas de TiO_2 es escasa en la literatura y hace falta obtener conclusiones definitivas del rendimiento de este nanofluido con acero inoxidable.

En este trabajo, se utilizó aceite vegetal pulverizado con inclusiones de óxido de titanio TiO_2 como nanofluido de corte en el torneado del acero inoxidable AISI 304 y se comparó la calidad superficial y el desgaste de las herramientas de corte respecto al mecanizado en seco. El TiO_2 fue adicionado en diferentes concentraciones ya que de esto depende el rendimiento térmico del nanofluido.

2. MÉTODOS

2.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Los experimentos se llevaron a cabo mediante el torneado cilíndrico de un eje de acero AISI/SAE 304 [20] de 2 pulgadas de diámetro y 125 mm de longitud sobre una máquina de torno CNC (HAAS ST10) en diferentes velocidades de corte y avance bajo condiciones secas y MQL.

La composición química y propiedades mecánicas del acero inoxidable mecanizado se muestra en tabla A y tabla B respectivamente.

Para la aplicación de la técnica MQL se empleó un aceite vegetal (Coolube 2210 EP) como fluido de corte. Este aceite posee una densidad de 890 Kg/cm^3 y una viscosidad a 40°C de 10 Cst. Se pulverizó el aceite vegetal con nanopartículas de Óxido de Titanio (TiO_2, fase anatasa) de color blanco, con un grado de pureza del 99.9%. Las propiedades de las nanopartículas de titanio se detallan en la Tabla 1.

Un homogeneizador electromagnético fue usado en la preparación del MQL. Diferentes concentraciones (0.25%, 0.5% y 1%) de nanopartículas de óxido de titanio se mezclaron en relación con el peso del aceite vegetal. Se usó una base de 200 gramos del producto para los ensayos de mecanizado. Finalmente se usó etilenglicol para la suspensión de las partículas de óxido de titanio. La configuración esquemática del torno con el sistema de suministro de refrigerante de neblina se muestra en la Figura 1.

Insertos de carburo de tungsteno recubierto con Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN depositado mediante CVD marca Sandvik se eligieron para el proceso de manufactura. El código de la herramienta de corte fue CNMG 433-MF [21]. Este tipo de herramienta es recomendada para procesos de semiacabado y desbaste de aceros inoxidables austeníticos y dúplex a velocidades de corte moderadas.

Propiedad	APS (nm)	SSA (m^2/g)	Densidad aparente (g/cm^3)	Densidad real (g/cm^3)	PH	color
Valor	100	2.0	0.030	0.045	6-6.5	Blanco

Tabla 1: Propiedades de las nanopartículas de Óxido de Titanio

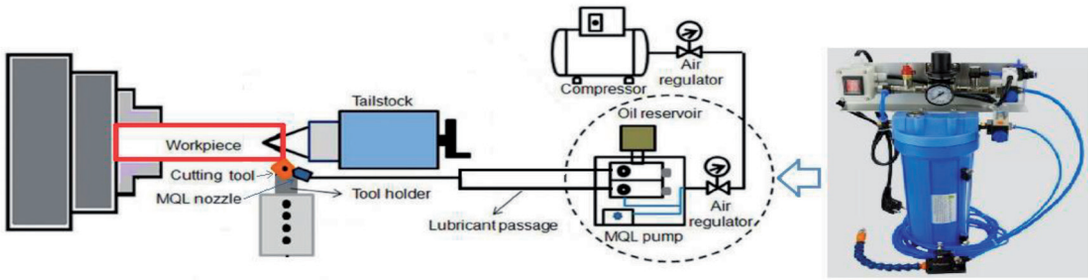


Figura 1: Configuración experimental de mecanizado

Parámetros de experimentación

La experimentación de torneado partió de un diseño experimental completo. Se trabajó con 2 velocidades de husillo (*n*), dos velocidades de avance (*Vf)* y dos radios de punta de herramienta (*Re*). Se mantuvo constante la profundidad de corte (*ap*) a 0.4 mm, la presión y el caudal del MQL a 2 bares y 480 ml/h respectivamente. Los valores se tomaron según las recomendaciones de los fabricantes de las herramientas de corte. La tabla 2 muestra el diseño experimental.

Parámetros	Designación	Nivel I	Nivel II
Velocidad de corte	(m/min)	190	215
Velocidad de husillo	n (rpm)	1190	1347
Velocidad de avance	Vf (mm/min)	209	235
Radio de punta de la herramienta	Re (mm)	0.4	0.8

Tabla 2: Parámetros de corte del torneado y sus niveles

Se realizaron en total 8 experimentos en condiciones de lubricación seca y con (MQL) respectivamente. Los ensayos lubricados se efectuaron a las tres concentraciones de nanopartículas de titanio descritas anteriormente, dando un total de 32 ensayos de mecanizado con dos réplicas.

Medición de la rugosidad

Un medidor de rugosidad superficial promedio (Ra) Mitutoyo SJ210 se empleó para evaluar la calidad superficial. La longitud de valoración se fijó a 5 mm como recomienda la norma ISO 1302:2002 [22]. La rugosidad de la superficie torneada se midió transversalmente a la dirección del mecanizado en tres diferentes localizaciones y se promediaron para mostrar el valor de cada combinación del test.

Medición del desgaste

Partiendo de los mejores resultados con respecto a la rugosidad y método de lubricación, se efectuó un análisis del desgaste en el flanco de la herramienta en base a la norma ANSI/ASME B94.5M [23]. Un análisis por microscopía de barrido SEM se utilizó para evaluar y evidenciar la forma de desgaste presentada en las herramientas de corte. El equipo SEM marca TESCAN fue seteado para capturar imágenes con las respectivas medidas de desgaste en las superficies de las herramientas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Analizados los cinco métodos de lubricación: seco, MQL, MQL+0.25% TiO_2, MQL+0.5% TiO_2, MQL+1% TiO_2, los valores de rugosidad superficial media en los sistemas ensayados, a excepción del método en seco, fueron menores que el valor de rugosidad teórica simplificada, como se indica en la tabla 3. Esta cercanía entre los valores de la rugosidad teórica y la rugosidad medida en los ensayos en el método en seco se presume debido a que se está trabajando dentro del rango de velocidades de corte relativamente altas y como se indica en Ashtakhov [24] esto es posible en un rango de temperaturas óptimo sin formación de built–up-edge (BUE) que afecte a la rugosidad quedando ésta determinada solamente por la geometría de la herramienta y el avance.

Los valores promediados de la rugosidad media Ra se muestran en la figura 2.

$$Ra = \frac{f^2}{32Re} = \frac{0{,}175^2}{32(0{,}8)} = 1{,}19\ \mu m \qquad (1)$$

Donde:
Ra: Rugosidad media(µm)
f: Avance (mm/rev)
Re: Radio de la punta de la herramienta (mm)

Los mejores resultados de mecanizado se presentan a una velocidad de corte a 215 m/min y una velocidad de avance de 209 mm/min y un radio de punta de la herramienta de 0.8 mm con el sistema de lubricación de mínima cantidad de lubricante con una concentración en peso de 0.5% de Óxido de Titanio y la menor eficiencia se encuentra con el método de mecanizado en seco. Debido a estos resultados la comparación de los métodos se la realizará entre el método de MQL+0.5% TiO_2 y el método en seco.

El desgaste inicial en los dos sistemas es significativo, pero luego incrementa uniformemente, en función de los periodos o

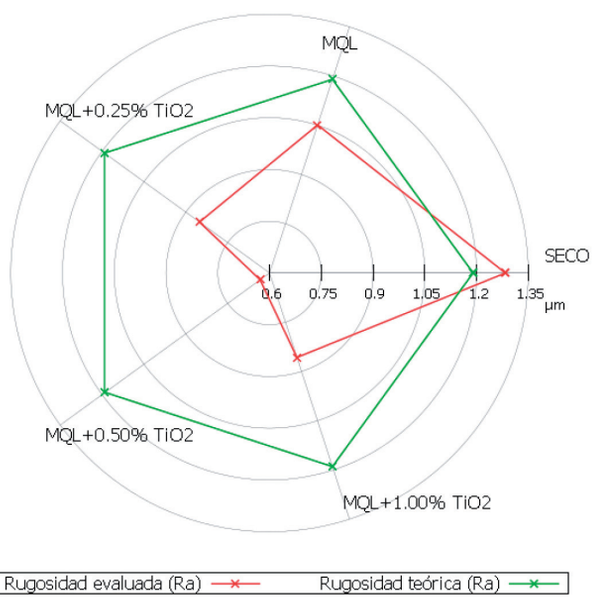


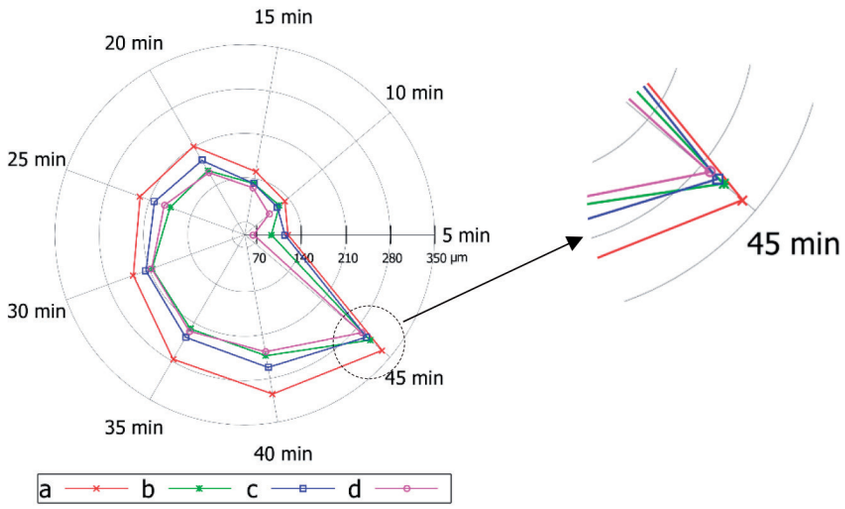
Figura 2: Resultados promediados de la Rugosidad Media Ra para los cinco casos de lubricación

	Re = 0.8mm; N= 1347rpm; f = 0.175 mm/rev; Vc = 215m/min						
	No.	SECO	MQL	MQL+0.25%	MQL+0.5%	MQL+1%	Ra Teórico
REPLICA 1	1	1.307	1.076	0.856	0.638	0.842	1.19
	2	1.251	1.059	0.856	0.625	0.870	1.19
	3	1.276	1.041	0.846	0.642	0.869	1.19
	4	1.338	1.028	0.837	0.645	0.841	1.19
REPLICA 2	5	1.287	1.066	0.845	0.641	0.852	1.19
	6	1.278	1.063	0.852	0.616	0.869	1.19
	7	1.255	1.044	0.865	0.633	0.853	1.19
	8	1.276	1.032	0.852	0.630	0.862	1.19
Promedio		1.2835	1.0511	0.8511	0.6337	0.8572	1.19
	Re = 0.4mm; N= 1347rpm; f = 0.175 mm/rev; Vc = 215m/min						
	No.	SECO	MQL	MQL+0.25%	MQL+0.5%	MQL+1%	Ra Teórico
REPLICA 1	1	2.182	1.880	1.846	1.296	1.706	2.38
	2	2.184	1.876	1.845	1.265	1.688	2.38
	3	2.190	1.851	1.826	1.278	1.705	2.38
	4	2.188	1.860	1.827	1.270	1.695	2.38
REPLICA 2	5	2.230	1.853	1.854	1.312	1.710	2.38
	6	2.194	1.857	1.856	1.285	1.695	2.38
	7	2.178	1.875	1.832	1.256	1.698	2.38
	8	2.180	1.893	1.832	1.266	1.699	2.38
Promedio		2.1910	1.8681	1.8398	1.2785	1.6995	2.38
	Re = 0.8mm; N= 1190rpm; f = 0.175 mm/rev; Vc = 190m/min						
	No.	SECO	MQL	MQL+0.25%	MQL+0.5%	MQL+1%	Ra Teórico
REPLICA 1	1	1.307	1.076	0.856	0.638	0.842	1.19
	2	1.251	1.059	0.856	0.625	0.870	1.19
	3	1.276	1.041	0.846	0.642	0.869	1.19
	4	1.338	1.028	0.837	0.645	0.841	1.19
REPLICA 2	5	1.287	1.066	0.845	0.641	0.852	1.19
	6	1.278	1.063	0.852	0.616	0.869	1.19
	7	1.255	1.044	0.865	0.633	0.853	1.19
	8	1.276	1.032	0.852	0.630	0.862	1.19
Promedio		1.2835	1.0511	0.8511	0.6337	0.8572	1.19
Calificación		**N7**	**N7**	**N6**	**N5**	**N6**	**N7**
	Re = 0.4mm; N= 1190rpm; f = 0.175 mm/rev; Vc = 190m/min						
	No.	SECO	MQL	MQL+0.25%	MQL+0.5%	MQL+1%	Ra Teórico
REPLICA 1	1	1.994	1.908	1.760	1.595	1.992	2.38
	2	1.974	1.911	1.751	1.606	1.984	2.38
	3	1.985	1.852	1.756	1.615	1.966	2.38
	4	1.997	1.868	1.764	1.614	1.983	2.38
REPLICA 2	5	1.865	1.883	1.754	1.601	1.991	2.38
	6	1.967	1.883	1.754	1.584	1.993	2.38
	7	1.856	1.876	1.734	1.608	1.985	2.38
	8	1.910	1.903	1.759	1.592	1.979	2.38
Promedio		1.9435	1.8916	1.7540	1.6018	1.9841	2.38

Tabla 3. Rugosidad media evaluada según el método de lubricación aplicado. Los valores mostrados corresponden a 4 puntos de medición en cada réplica, según la recomendación de la norma ISO 1302:2002. Se indica también el valor promedio de la rugosidad media de ambas réplicas

tiempos de mecanizado. Según el criterio de desgaste de la norma ASME B94.55M, que es un promedio de 0.25mm en la zona media del flanco para operaciones de acabado, el flanco de la herramienta que utiliza el primer sistema de mecanizado en SECO cumple el criterio de desgaste aproximadamente a los 31 minutos de ser expuesto a trabajo, durando menos que el sistema de mecanizado MQL+0.5%TiO_2, el flanco de este último lo supera por aproximadamente 10.5 minutos de exposición al trabajo de mecanizado.

En la figura 3 se visualiza un mayor desgaste de flanco del sistema SECO que en MQL+0.5%TiO_2, a una velocidad de husillo



(a) SISTEMA SECO n=1347rpm; Vc=215m/min (b) SISTEMA MQL+0.5%TiO_2 n=1347rpm; Vc=215m/min (c) SISTEMA SECO n=1190rpm; Vc=190m/min (d) SISTEMA MQL+0.5%TiO_2 n=1190rpm; Vc=190m/min.

Figura 3: Desgaste de la herramienta [µm] evaluado en el tiempo de uso de acuerdo al sistema de lubricación y diferentes velocidades

menor (1190 rpm), por lo que se puede deducir que independientemente de la velocidad que se aplique al husillo será mayor el desgaste del flanco de las herramientas de corte cuando no haya un sistema de lubricación que acompañe la acción del mecanizado. En este caso el flanco de la herramienta de corte que utiliza el sistema SECO cumple el criterio de desgaste de la norma ASME B94.55M, que es un promedio de 0.25mm en la zona media del flanco para operaciones de acabado, un tiempo de trabajo de 37.5 minutos y el sistema MQL+0.5%TiO_2 dura 42 minutos más antes de cumplir el criterio de desgaste.

Adicionalmente en la figura 3 se puede observar el desgaste progresivo que los dos sistemas presentan en proporción al tiempo de mecanizado, y se visualiza claramente que a mayor número de revoluciones, mayor es el desgaste que presenta la herramienta. El desgaste inicial en los dos sistemas es similar, pero a medida que son expuestos al incremento de tiempo de trabajo, mayor es la diferencia de valores de rugosidad que separa las líneas de mecanizado de estos sistemas, de esta forma llega a cumplir el criterio de desgaste de flanco el sistema SECO antes que el sistema MQL+0.5%TiO_2.

Por otro lado los resultados muestran que el desgaste rápido inicial se presenta a los 5 minutos de mecanizado en ambos casos, con una estrecha deferencia de rugosidad, pero a medida de que se incrementa el tiempo de mecanizado la diferencia de valor de desgaste del flanco se hace aún más pequeña. Esto indica que al utilizar MQL+0.5%TiO_2 como lubricante, el cambio de velocidades en pequeñas proporciones, no influye en el desgaste de la herramienta ya que según la gráfica en el intervalo de tiempo comprendido entre los 15 a los 40 minutos el desgaste de flanco de las herramientas de corte son prácticamente iguales, pero después de este tiempo las líneas de mecanizado se alejan ya que entran a la zona de fallo según los criterios de velocidad de corte vs. desgaste en relación al tiempo de mecanizado.

En este trabajo la vida útil de la herramienta de corte fue calculada con la ecuación simplificada de Taylor, la misma que se obtiene de los resultados obtenidos en la experimentación. Es posible aplicar la forma simplificada de la ecuación para hallar la vida útil de la herramienta y encontrar los valores de C y k requeridos por la ecuación:

$$VcT^n = C \quad (2)$$

Donde: *Vc =Velocidad de corte, T = Tiempo de vida de la herramienta, C y n= Constantes* que dependen de las condiciones de corte. El criterio de inutilidad de la herramienta de corte fue de 0.3mm para desgaste de flanco promedio. Se interpoló este valor para hallar el tiempo de mecanizado en el que se alcanzó el criterio de inutilidad obteniéndose para el caso de mecanizado en seco tiempos de 44.85 min y 39.11 min para las velocidades de 190 m/min y 215 m/min respectivamente. Para el caso de mecanizado con MQL+0.5%TiO_2, se obtuvieron tiempos de 47.72 min y 44.35 min para las velocidades de 190 m/min y 215 m/min respectivamente (Ver Tabla 4). Con estos tiempos y velocidades de corte de 190 m/min y 215 m/min y aplicando un sistema lineal de ecuaciones se obtuvo las constantes de las ecuaciones de Taylor que para el caso Seco (Ecuación 3) y MQL+0.5%TiO_2 (Ecuación 4) fueron:

$$VcT^{0.9} = 5825.59 \quad (3)$$

$$VcT^{0.9} = 6525.93 \quad (4)$$

En la figura 4 se muestran valores extrapolados de la vida de las herramientas de corte en función de las ecuaciones de Taylor

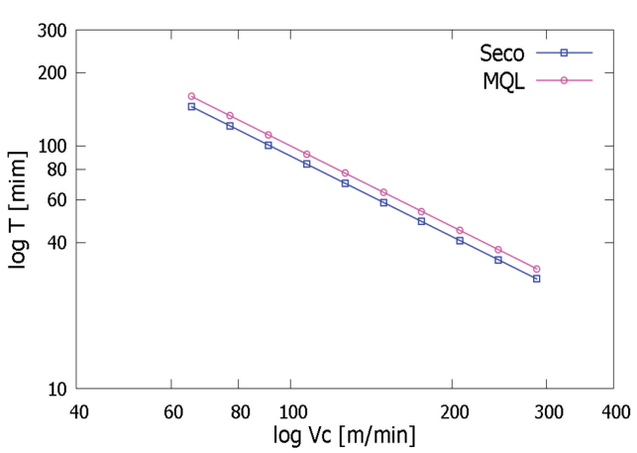


Figura 4: Vida útil de la herramienta de corte para los sistemas SECO y MQL+0.5%TiO_2 utilizando la predicción con la ecuación de Taylor simplificada desarrolladas con velocidades de corte de 190 m/min y 215 m/min respectivamente

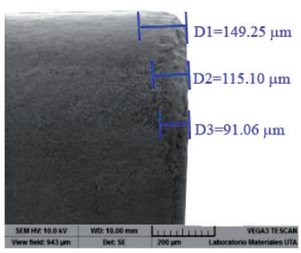
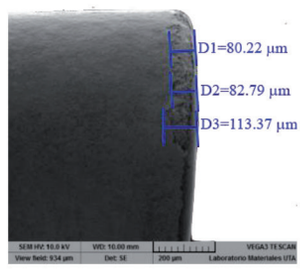
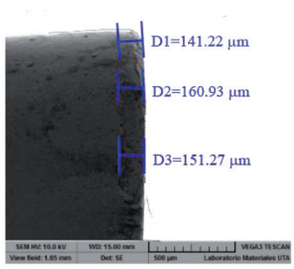
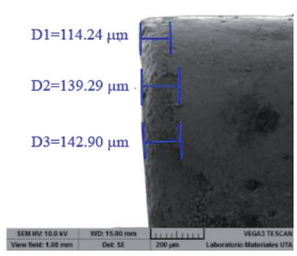
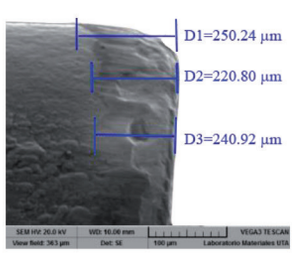
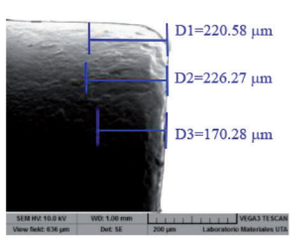
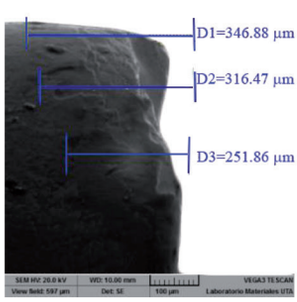
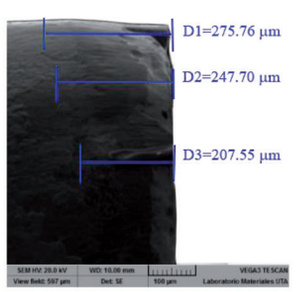
Tiempo (min)	Herramienta de corte CNMG 120408				
	Proceso: Torneado **Material:** Acero Inoxidable AISI 304				
	Vc (m/min)	**Vf (mm/rev)**	**ap (mm)**	**Q (ml/h)**	**R (mm)**
	215	209	0.4	0 - 480	0.8
	SECO			**MQL + 0.5%TiO_2**	
5					
	VBC	**VBmax**	**VBN**	**PROMEDIO**	
	149.25	115.10	91.06	**118.47 um**	
	VBC	**VBmax**	**VBN**	**PROMEDIO**	
	80.22	82.79	113.37	**92.12 um**	
15					
	VBC	**VBmax**	**VBN**	**PROMEDIO**	
	141.22	160.93	151.27	**151.14 um**	
	VBC	**VBmax**	**VBN**	**PROMEDIO**	
	114.24	139.29	142.90	**132.14 um**	
30					
	VBC	**VBmax**	**VBN**	**PROMEDIO**	
	250.24	220.60	240.92	**237.25 um**	
	VBC	**VBmax**	**VBN**	**PROMEDIO**	
	220.58	226.27	170.28	**205.71 um**	
40					
	VBC	**VBmax**	**VBN**	**PROMEDIO**	
	346.88	316.47	251.86	**305.06 um**	
	VBC	**VBmax**	**VBN**	**PROMEDIO**	
	275.76	247.7	207.55	**243.67 um**	

Tabla 4: Ilustraciones del desgaste de flanco VB a Vc= 215 (m/min) tomadas a distintos tiempos de mecanizado

simplificadas para el caso de mecanizado en seco y MQL+0.5%TiO_2 desarrolladas con velocidades de corte de 190 m/min y 215 m/min respectivamente.

Adicionalmente en la tabla 4 se muestra las imágenes SEM de la evolución del desgaste de flanco a diferentes velocidades de corte, se puede verificar el daño producido por la fricción y el calor profundamente acentuado en el caso del mecanizado en seco. Se evidencia una mejora del 25% al utilizar el sistema de lubricación de MQL con 0.5% de TiO_2. La preferencia por utilizar esta concentración 0.5% de TiO_2 también se la puede verificar en estudios como [25] donde también se obtuvieron los mejores resultados.

CONCLUSIONES

Este trabajo se ha enfocado en evaluar el degaste de la herramienta de corte y la rugosidad media del acero inoxidable AISI 304 mediante un estudio comparativo entre el torneado en seco y lubricado con aceite vegetal usando la técnica de mínima cantidad de lubricante (MQL) mezclado con tres concentraciones diferentes de nanopartículas de óxido de titanio (TiO_2): 0.25%; 0.5% y 1%, de lo cual se desprenden las siguientes conclusiones:

- La configuración de lubricación de MQL con una concentración de 0.5% de nanopartículas de TiO_2 fue la que mejor productividad y calidad superficial mostró bajo las condiciones ensayadas en las condiciones experimentación expuestas en este trabajo.
- El sistema de lubricación configurado como MQL+0.5%TiO_2 mejoró la calidad superficial de la pieza de trabajo respecto al mecanizado en seco y al sistema de pulverización (MQL) con aceite vegetal en un 50% y un 40% respectivamente.
- El sistema de lubricación configurado como MQL+0.5%TiO_2 incrementó en un 25% la vida de la herramienta de corte utilizada respecto a la mecanización en seco.
- Se obtuvieron las ecuaciones de Taylor simplificadas para el caso de mecanizado en seco y MQL+0.5%TiO_2 en el rango de velocidades de corte de 190 m/min a 215 m/min. Los valores de vida de las herramientas fuera de este rango se muestran en la figura 4 y se recomienda realizar futuras pruebas experimentales para verificar este comportamiento.

REFERENCIAS

[1] M. Omair, B. Sarkar, and L. E. Cárdenas-Barrón, "Minimum quantity lubrication and carbon footprint: A step towards sustainability," Sustain., vol. 9, no. 5, pp. 1–18, 2017.
[2] A. N. M. Khalil, M. A. M. Ali, and A. I. Azmi, "Effect of Al2O3 Nanolubricant with SDBS on Tool Wear During Turning Process of AISI 1050 with Minimal Quantity Lubricant," Procedia Manuf., vol. 2, no. February, pp. 130–134, 2015.
[3] A. K. Sharma, A. K. Tiwari, R. K. Singh, and A. R. Dixit, "Tribological Investigation of TiO_2 Nanoparticle based Cutting Fluid in Machining under Minimum Quantity Lubrication (MQL)," Mater. Today Proc., vol. 3, no. 6, pp. 2155–2162, 2016.
[4] F. K. (2). G. Eisenblatter, "Dry Cutting," Ann. CIRP, vol. 46, no. 2, pp. 519–526, 1997.
[5] A. K. Sharma, A. K. Tiwari, and A. R. Dixit, "Effects of minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A review," J. Clean. Prod., vol. 127, pp. 1–18, 2015.
[6] S. B. Kedare, D. R. Borse, and P. T. Shahane, "Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Surface Roughness of Mild Steel of 15HRC on Universal Milling Machine," Procedia Mater. Sci., vol. 6, no. Icmpc, pp. 150–153, 2014.
[7] O. Pereira et al., "Internal cryolubrication approach for Inconel 718 milling," Procedia Manuf., vol. 13, pp. 89–93, 2017.
[8] M. Nouioua, M. A. Yallese, R. Khettabi, S. Belhadi, and T. Mabrouki, "Comparative assessment of cooling conditions, including MQL technology on machining factors in an environmentally friendly approach," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 91, no. 9–12, pp. 3079–3094, 2017.
[9] M. S. Najiha and M. M. Rahman, "Experimental investigation of flank wear in end milling of aluminum alloy with water-based TiO_2 nanofluid lubricant in minimum quantity lubrication technique," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 86, no. 9–12, pp. 2527–2537, 2016.
[10] K. A. Sharma, A. K. Tiwari, and A. R. Dixit, "Improved Machining Performance with Nanoparticle Enriched Cutting Fluids under Minimum Quantity Lubrication (MQL) Technique: A Review," Mater. Today Proc., vol. 2, no. 4–5, pp. 3545–3551, 2015.
[11] H. Salimi-Yasar, S. Zeinali Heris, and M. Shanbedi, "Influence of soluble oil-based TiO_2 nanofluid on heat transfer performance of cutting fluid," Tribol. Int., vol. 112, no. December 2016, pp. 147–154, 2017.
[12] L. Yang and K. Du, "A comprehensive review on heat transfer characteristics of TiO_2 nanofluids," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 108, pp. 11–31, 2017.
[13] I. Journal, M. E. Issn, and P. Publishing, "Experimental investigation on the performance of the TiO_2 and ZnO hybrid nanocoolant in ethylene glycol mixture towards AA6061-T6 machining," vol. 14, no. 1, pp. 3913–3926, 2017.
[14] A. K. Sharma, R. K. Singh, A. R. Dixit, and A. K. Tiwari, "Novel uses of alumina-MoS2hybrid nanoparticle enriched cutting fluid in hard turning of AISI 304 steel," J. Manuf. Process., vol. 30, pp. 467–482, 2017.
[15] G. M. Krolczyk, P. Nieslony, and S. Legutko, "Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turning," Arch. Civ. Mech. Eng., vol. 15, no. 2, pp. 347–354, 2015.
[16] A. Uysal, F. Demiren, and E. Altan, "Applying Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method on Milling of Martensitic Stainless Steel by Using Nano Mos2 Reinforced Vegetable Cutting Fluid," Procedia - Soc. Behav. Sci., vol. 195, pp. 2742–2747, 2015.
[17] M. H. Cetin, B. Ozcelik, E. Kuram, and E. Demirbas, "Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method," J. Clean. Prod., vol. 19, no. 17–18, pp. 2049–2056, 2011.
[18] V. T. G. Naves, M. B. Da Silva, and F. J. Da Silva, "Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel," Wear, vol. 302, no. 1–2, pp. 1201–1208, 2013.
[19] B. Ozcelik, E. Kuram, M. Huseyin Cetin, and E. Demirbas, "Experimental investigations of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L," Tribol. Int., vol. 44, no. 12, pp. 1864–1871, 2011.
[20] Matweb, "Material property data:304 Stainless Steel," 2018.
[21] S. COROMANT, "Catálogo Principal–Turning_Tools: Sandvik 2017," 2017.
[22] ISO and 1302, "Geometrical Product Specifications (GPS) — Indication of surface texture in technical product documentation." International Organization for Standardization, Switzerland, p. Fourth edition, 2002.
[23] ANSI/ASME, "Tool-life testing with single-point turning tools. ANSI/ASME B94.55M." The American Society of Mechanical Engineers, New York, USA, 1985.
[24] Viktor P. Astakhov, Geometry of Single-point Turning Tools and Drills. London: Springer, 2010.
[25] K. P. Sodavadia and A. H. Makwana, "Experimental Investigation on the Performance of Coconut oil Based Nano Fluid as Lubricants during Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel," Int. J. Adv. Mech. Eng., vol. 4, no. 1, pp. 55–60, 2014.