

# Caracterización de la integridad de las superficies maquinadas a altas velocidades en el acero 40XHMA

## Characterization of surface integrity of machined surfaces at high cutting-speed in 40XHMA steel

Mario Jacas-Cabrera<sup>I</sup>, Tania Rodríguez-Moliner<sup>I</sup>, José Luis Lopes-Da Silveira<sup>II</sup>,  
Gustavo Eugenio Carro-Hernández<sup>III</sup>, Teresa Sánchez-Bataille<sup>I</sup>, David San-Román<sup>IV</sup>

I. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Mecánica. La Habana. Cuba.

Correo electrónico: [jacas@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:jacas@mecanica.cujae.edu.cu)

II. Universidade Federal de Rio de Janeiro, PEM/COPPE/, Rio de Janeiro. Brasil.

III. Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear. CEADEN. La Habana. Cuba.

IV. Central Termoeléctrica del Este. Santa Cruz del Norte, Mayabeque, Cuba.

Recibido: 22 de septiembre de 2012

Aceptado: 2 de abril de 2013

---

### Resumen

Este trabajo tiene como objetivo el estudio de la integridad superficial de la superficie maquinada a altas velocidades de corte en el acero 40XHMA. Los experimentos fueron realizados en un proceso de torneado utilizando regímenes de corte correspondientes a un proceso de acabado. Una vez maquinadas las probetas, se le realizaron ensayos de rugosidad superficial, tensiones residuales, microdureza Vickers y análisis de la deformación superficial. Como resultado se demostró que la variación de valores de la velocidad de corte no tuvo un efecto significativo en los valores de rugosidad superficial, observándose una ligera tendencia a la disminución de la misma, a medida que la velocidad de corte aumenta. En las muestras analizadas no se observaron zonas de deformación plástica superficial, pero sin embargo, se observó un incremento de la microdureza Vickers en la superficie maquinada, así como una disminución de las tensiones residuales al aumentar las velocidades de corte.

**Palabras claves:** integridad superficial, maquinado a altas velocidades de corte, acero 40XHMA, acero 4340.

### Abstract

This work aims at the study of surface integrity on machined surfaces at high cutting speeds of the 40XHMA steel. The experiments were performed in a turning process with cutting schemes corresponding to polishing: Once machined, the specimens were subjected to different types of analysis: surface roughness, residual stresses, micro Vickers hardness and analysis of surface deformation. As a result it was shown that the variation of cutting speed had no significant effect on surface roughness values, showing a slight tendency to decrease it. In the tested samples zones of surface plastic-deformation were not observed. Nonetheless the micro Vickers hardness showed an increment in the machined surface and a decrease in residual stress with increasing cutting speeds was observed as well as.

**Key words:** surface integrity, high-speed cutting. 40XHMA steel, 4340 steel.

## Introducción

La construcción de maquinarias es la base del desarrollo técnico de la economía social. El corte de metales a altas velocidades juega un papel preponderante en el desarrollo de esta rama, ya que una gran parte de las piezas que se fabrican se obtienen por la vía de arranque de virutas, siendo el proceso de torneado la tecnología más adecuada para la producción de pequeños lotes de piezas que requieran rectificado.

El aumento de las velocidades de corte es una de las maneras de mejorar la eficacia de los procesos productivos, reducir el tiempo de producción, así como los períodos de entrega y los costos.

Una de las definiciones más difundidas de la teoría de Salomón, establece que el mecanizado con altas velocidades, consiste en trabajar con velocidades de corte entre 5 y 10 veces la recomendada.

A pesar de que las altas velocidades de corte están siendo utilizadas en la industria en diferentes aplicaciones, muchos aspectos de este proceso de alto desempeño, aun están siendo investigados pues no todo es conocido.

Entre estos aspectos se encuentra el estudio de la integridad superficial de la superficie maquinada. Field y Kahles [1], definieron sabiamente; la integridad superficial como la relación entre las propiedades físicas y el comportamiento funcional de la superficie. La integridad de la superficie se forma por sus valores geométricos, tales como la rugosidad superficial y las propiedades físicas: tensiones residuales, dureza y estructura de las capas superficiales.

Varios autores han dedicado sus esfuerzos al estudio, en diferentes materiales, de los efectos del régimen de corte en la integridad superficial. Con respecto a la rugosidad superficial existe una gran coincidencia en el análisis de la influencia de la velocidad de corte y la velocidad de avance en este parámetro. Aouici [2], basado en experimentos con acero AISI H11 endurecido, plantea que los mejores resultados en la rugosidad se obtienen con altas velocidades de corte y bajos valores de avance en el maquinado.

Asilturk [3]; Bouacha [4]; Lalwani [5], coinciden al referir que el incremento de la velocidad de avance conlleva a un incremento de la rugosidad, para los aceros AISI 4140 con 51 HRC, AISI 52100 con 64 HRC y acero 18Ni (250) martensítico, respectivamente, así como que la velocidad de corte y la profundidad de corte prácticamente no influyen en la magnitud de la rugosidad en el maquinado de los mismos.

Muños [6], incorpora al estudio el radio de la herramienta; manteniendo avance y velocidad como variables para los aceros AISI 1020, 1145 y 4140. En sus conclusiones plantea que con una disminución del avance, un incremento de la velocidad de corte y un aumento del radio de punta de la herramienta se logran mejores acabados superficiales, lo cual es equivalente a una disminución en la rugosidad superficial y concuerda con los autores anteriores.

Jacobson [7], quien estudia un rango mayor de velocidades de corte, refiere con respecto a este parámetro, que la rugosidad superficial primero disminuye hasta una velocidad de corte de 170 m/min y después aumenta hasta una velocidad de 999m/min. Los experimentos fueron realizados maquinando acero bainítico B8 (según ISO 683-17), endurecido a 58 HRC. Estos resultados concuerdan y difieren al mismo tiempo de los planteados anteriormente y merecen un estudio futuro más detallado.

Las tensiones residuales, otro de los parámetros a analizar, han sido estudiadas por varios autores. Ezugwu [8] plantea que son un efecto tanto del calor generado y el trabajo mecánico en la superficie y subsuperficie. Más precisamente, los esfuerzos residuales en el mecanizado se producen como consecuencia de la deformación plástica no homogénea inducida por cargas mecánicas y térmicas asociadas con el proceso de formación de viruta y la interacción entre la herramienta y la superficie mecanizada en las proximidades de la punta de la herramienta.

En la literatura analizada, los resultados presentados, con respecto a la influencia de los parámetros de corte en las tensiones residuales, difieren; siendo Pawade [9], uno de los que hace un análisis más acertado. Este autor plantea que a velocidades de corte de 125 a 300 m/min, se incrementan las tensiones de tracción y que de 300 a 400 las tensiones se cambian a compresión. El análisis está basado en el maquinado de Inconel 718. Con respecto al avance, plantea que con un incremento del mismo; se produce un ligero cambio de tensiones en la dirección de tracción, lo cual es aun menor con el uso de altas velocidades de corte. En lo referente a la profundidad de corte refiere que con un incremento de esta, las tensiones cambian de tracción a compresión y aun más, a altas velocidades de corte. Esto lo explica planteando que a mayores velocidades de corte se produce una gran remoción del material y una gran cantidad de calor se evacua por la viruta pasando menos calor a la pieza provocando que el efecto mecánico en la pieza sea mayor que el térmico y en consecuencia predominan las tensiones de compresión.

Los autores de [10-14] obtuvieron resultados semejantes, mientras que otros [7, 15, 16], plantean resultados contrarios. Rech [17], plantea que un aumento de la velocidad de corte aumenta las tensiones

residuales pasando de compresión a tracción y que un aumento de la velocidad de avance no presenta influencias en las tensiones residuales. Jan [18], presenta coincidencia con Pawade [9], en lo que respecta a la velocidad de avance y profundidad de corte, no siendo así en la influencia de la velocidad de corte en las tensiones residuales.

Los autores de este trabajo han encontrado una sola referencia a estudios de integridad superficial, realizados con aceros similares al 40XHMA. Garcíá [13], se limita al análisis de las tensiones residuales superficiales, sin abundar en el resto de los aspectos necesarios. Este acero, por sus propiedades, se encuentra entre los más usados para elementos de máquina, de ahí la importancia de su estudio para altas velocidades de corte.

El objetivo de esta investigación es determinar la influencia de las altas velocidades de corte en la integridad superficial de un acero GOST 40XHMA similar al AISI 4340 en un proceso de acabado, analizando la rugosidad superficial, espesor de la capa deformada, magnitud de la microdureza Vickers así como en los valores de las tensiones residuales en las superficies maquinadas. El poder estudiar estos parámetros y la influencia de la velocidad de corte en los mismos, será un paso más en el estudio y conocimiento de las altas velocidades.

## MATERIALES y MÉTODOS

### Preparación de probetas experimentales

Para la realización de los experimentos, se elaboraron anillos de acero 40XHMA (GOST4543-71) equivalente al AISI-4340 en estado normalizado dureza de 116HB con las siguientes dimensiones: Ø115mm, ancho 10 mm y espesor de 10 mm (ver Fig. 1).



**Fig. 1.** Probetas experimentales

El resultado del análisis de composición química realizado al material de los anillos fue el siguiente: C 0,34%, Mn 0,7 %, Si 0,20 %, Cr 0,7 %, Mo 0,1 % y Ni 1,2 %. Estos se corresponden con la composición del acero GOST- 40XHMA equivalente al AISI-4340.

Los anillos se montaron en un mandril con ayuda de anillos separadores, figura 2, siendo posteriormente rectificadas para lograr una correcta coaxialidad entre ellos y el mandril, garantizando así que todas las superficies estuvieran sometidas a las mismas condiciones de corte.



**Fig. 2.** Montaje de anillos en el mandril

### Maquinado de las probetas

Teniendo en cuenta las variables a estudiar, se elaboraron y montaron en el mandril 11 anillos, de los cuales solo diez fueron maquinados con los parámetros de corte experimentales, dejando el número 11 como patrón de las condiciones iniciales.

Las probetas fueron maquinadas en seco con velocidades de avance y profundidades de corte constantes, propio de un proceso de acabado, usando para cada probeta una placa cerámica nueva en la herramienta.

El régimen de corte empleado fue el siguiente:

- Velocidad de avance:  $S = 0.1$  mm/rev,
- Profundidad de corte:  $t = 0,2$  mm.

Se usaron 5 velocidades de corte diferentes, contando con una réplica de cada probeta experimental (tabla 1). Se mantuvo una relación entre los valores máximos y mínimos de velocidad de corte de 6,3.

**Tabla 1.** Valores de velocidad de corte y frecuencia de rotación

Nº de las probetas	Velocidad de corte $V_c$ [m/min]	Frecuencia de rotación $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]
1-2	113	315
3-4	289	800
5-6	451	1250
7-8	578	160
9-10	722	200

El maquinado de las probetas se realizó en un torno convencional, como herramientas se usaron placas recubiertas (calzos), de la firma SANDVIK código CG 4225 - P25 (P10-P40), con ángulo de punta:  $\epsilon = 55^\circ$ ; ángulo de incidencia:  $\alpha = 7^\circ$ ; radio de punta:  $r = 0.4$  mm; ángulo de posición principal  $\phi = 93^\circ$ .

## RESULTADOS y DISCUSION

### Medición de la Rugosidad Superficial

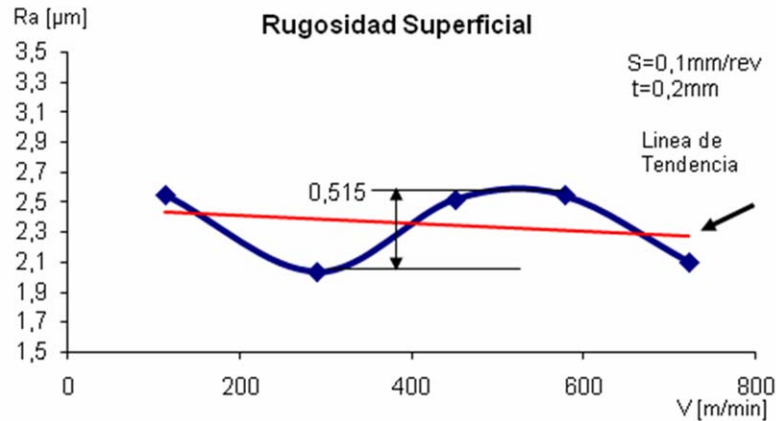
La rugosidad superficial fue medida en unidades de  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ], bajo condiciones de temperatura y humedad de  $20^\circ\text{C}$  y 75 % respectivamente.

A cada probeta, excepto a la patrón, se le realizaron seis mediciones, girando la pieza  $30^\circ$  en cada medición. Los resultados se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Mediciones de rugosidad superficial  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] para las probetas de la 1 a la 5, además de la probeta patrón. (Rugosímetro-Mitutoyo, modelo SJ 210)

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta Patrón 11
	Vc m/min					
Nº	113	289	451	578	722	Rectificada
1	2,433	1,966	2,507	2,715	1,975	0,639
2	2,451	1,944	2,517	2,728	1,983	0,624
3	2,469	1,964	2,515	2,723	1,982	0,671
4	2,634	2,089	2,514	2,368	1,856	-
5	2,643	2,089	2,507	2,356	2,388	-
6	2,639	2,094	2,505	2,354	2,378	-
<b>Promedio</b>	2.545	2.030	2.511	2.541	2.094	0.645

En la figura 3 se muestra la curva de comportamiento de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de corte.



**Fig. 3.** Gráfico del comportamiento de la rugosidad superficial vs velocidad de corte

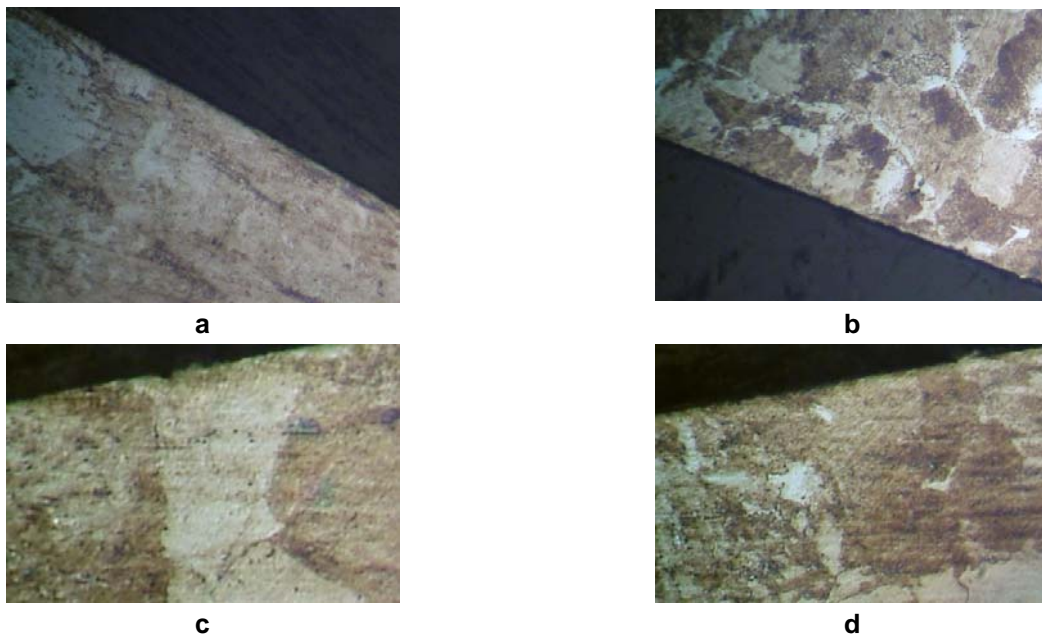
En la misma se observa un comportamiento sinusoidal enmarcado en un valor de amplitud de 0,515  $\mu\text{m}$ . Según la línea de tendencia, su comportamiento es a la disminución de una forma muy somera con el incremento de la velocidad de corte, lo que se puede explicar, por la disminución del coeficiente de fricción  $\mu$  al incrementarse las velocidades de corte, lo que repercutiría en una menor deformación y por resultado un mejor acabado superficial. Estos resultados muestran una coincidencia con [2-5].

#### Análisis metalográfico superficial

Se realizó la preparación metalográfica de las muestras, comenzando con el corte de las probetas en muestras de aproximadamente 20 mm de espesor, montaje de las mismas en moldes con resina polimerizante y la realización los pulidos correspondientes para finalmente ser atacadas con Nital al 2 % durante 5 seg.

Para la observación de las muestras se utilizó un microscopio óptico con aumentos de hasta 800X.

En la figura 4 se muestran los bordes de las superficies maquinadas a diferentes velocidades de corte. Como se observa no aparece ninguna señal de zona deformada en ninguno de los casos, lo que coincide con resultados anteriores obtenidos por Jacobson [7], al maquinar acero bainítico B8 y ser observado con aumento de 1850X.



**Fig. 4.** Zonas de las superficies maquinadas: a) rectificada. b) 113m/min. c) 289 m/min. d) 451 m/min. 800X

En el trabajo presentado por Puerta [19] al maquinar una aleación de titanio, se observan dos zonas de deformación: una denominada de deformación de 5 a 10  $\mu\text{m}$  de espesor y una zona denominada de gran perturbación de 1 a 5  $\mu\text{m}$  localizada en la zona más cercana a la superficie maquinada, todas ellas observadas con microscopía electrónica.

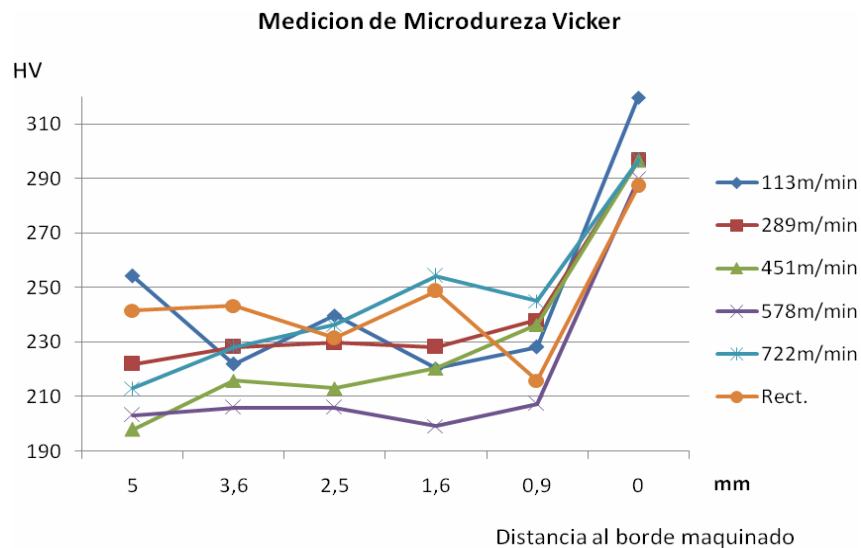
La no observación de dicha zona no implica su no existencia, el uso de técnicas de microscopía electrónica no empleadas en este trabajo pudieran guiar a resultados más concluyentes.

### Medición de micro dureza Vickers HV<sub>50g</sub>

Con la ayuda de un microdurómetro, se realizaron 6 mediciones a cada probeta comenzando desde el borde no maquinado hasta el borde maquinado, (ver Fig. 5). Cada punto en el gráfico se corresponde con el promedio de tres mediciones de microdureza Vickers en esa zona.

A pesar de no apreciarse en el estudio metalográfico (con los aumentos empleados) una zona de deformación plástica en la superficie maquinada, figura 4, se pudo constatar un incremento de la microdureza en la zona cercana a la superficie.

Según la figura 5, en el rango de medición de 0.9 a 5 mm de profundidad (a partir de la superficie maquinada), no aparece una influencia definida de la velocidad de corte en los valores de microdureza.



**Fig. 5.** Microdureza Vickers [HV<sub>50g</sub>] en la profundidad de la superficie maquinada. (Micro-durómetro Shimadzu, tipo M)

De manera general los valores medidos para cada probeta se mantienen estables o con ligeros incrementos. Sin embargo en todas las probetas se muestra un incremento apreciable en la microdureza medida en la superficie de las mismas.

El mayor incremento lo presentó la probeta maquinada con menores velocidades de corte (113 m/min). El resto mostró microdurezas muy similares en la superficie maquinada, indicando una influencia no significativa de la velocidad de corte en las magnitudes de microdureza en el rango de velocidades de corte utilizadas.

A pesar de no haberse observado, en los análisis metalográficos; la zona de deformación plástica asociada al maquinado, con este resultado se pudiera inferir la presencia de la misma, con la necesidad de utilización de aumentos mayores para su resolución.

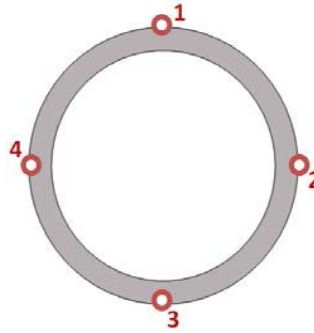
### Medición de tensiones residuales

Las tensiones residuales se midieron en el laboratorio de materiales del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) situado en La Habana. A diferencia de algunos autores que usan el método de difracción de rayos x [7, 13, 14], se empleó el método magnetoelástico, detallado claramente por Herrera [20], con un sensor de anisotropía magnética.

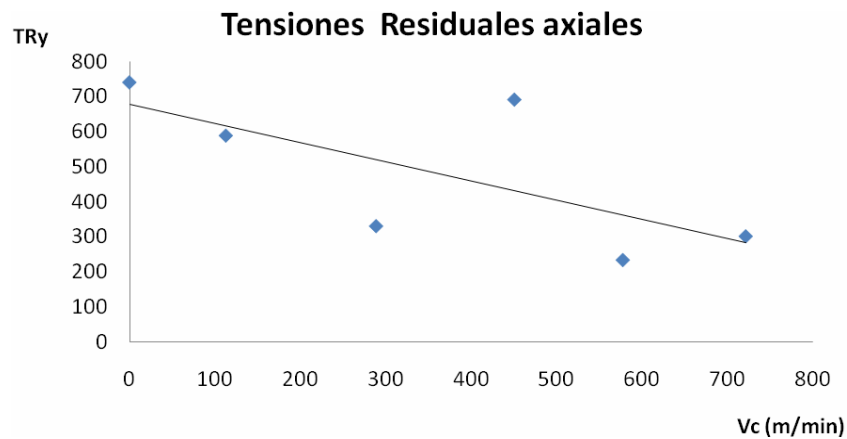
Este sensor tiene como característica principal que promedia el valor de las tensiones residuales a un radio de 2 mm. Con su circuito magnético de lectura se censan las variaciones de la fuerza electromotriz originadas

por la anisotropía magnética ( $\Delta\mu$ ), causadas a su vez por las tensiones mecánicas aplicadas a la muestra ( $\Delta\sigma$ ). Los valores de tensiones residuales son obtenidos en mV y para su convección a MPa es necesario un ensayo de calibración.

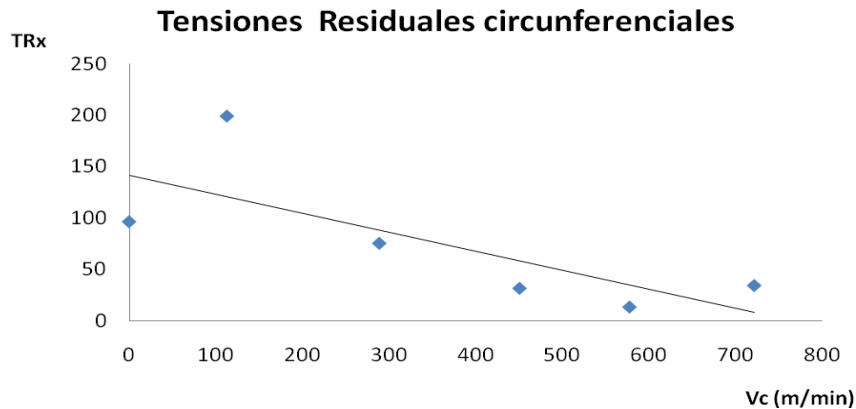
En la figura 6 se muestran los puntos exteriores de los anillos, sometidos a la medición de tensiones en cada una de las probetas. Las mediciones realizadas en estos cuatro puntos fueron promediadas y se pueden observar los resultados en las figuras 7 y 8.



**Fig. 6.** Ubicación de los puntos de medición en cada una de las probetas. Las mediciones fueron realizadas con equipo marca TENSO y sensor SAMO



**Fig. 7.** Comportamiento de las tensiones axiales con respecto a la velocidad de corte



**Fig. 8.** Comportamiento de las tensiones circunferenciales con respecto a la velocidad de corte

En las figuras 7 y 8 se observa como primer aspecto, que los valores de tensiones circunferenciales son menores que los axiales; lo que según Outeiro [15], resulta más conveniente, ya que las tensiones circunferenciales tienen mayor tendencia a la formación de grietas.

Comparando los diferentes valores de tensiones en el proceso de torneado a diferentes velocidades de corte, con respecto a la probeta rectificada (referida en los gráficos con el valor cero), se observa que al incrementar la velocidad de corte de 113 a 722 m/min, se produce una disminución de los valores de tensiones residuales a tracción lo cual coincide con resultados previos de investigadores [10-14], lo que se explica por una mayor evacuación del calor (fuente fundamental de este tipo de tensiones) en la viruta al aumentar las velocidades de corte, esto evita que el mismo pase a la superficie de la pieza.

## Conclusiones

Después de haber realizado los experimentos para determinar la influencia de la velocidad de corte en la integridad de la superficie maquinada se llegaron a las siguientes conclusiones:

- 1- Se observó que para las condiciones de trabajo establecidas, el incremento de la velocidad de corte provocó una disminución de la rugosidad superficial de manera no significativa, dentro del intervalo de 1.6 a 3.2  $\mu\text{m}$ . Este resultado corrobora lo planteado por otros investigadores [1, 6], y demuestra que el uso de las altas velocidades no es solo beneficioso desde el punto de vista de la disminución de tiempos de operación sino también proporciona superficies con mejor acabado.
- 2- A pesar de no observarse una zona de deformación por la acción del corte, se pudo constatar que en las diferentes muestras, hubo un incremento de la microdureza en la zona cercana a la superficie maquinada. Esto pudiera implicar la existencia de dicha zona con espesores no capaces de ser resueltos con los aumentos empleados. No obstante, no se apreció una influencia apreciable de la velocidad de corte en la microdureza superficial
- 3- Del análisis de tensiones residuales se observó que con el incremento de las velocidades de corte se produjo una disminución de las tensiones residuales a tracción. Estas son peligrosas y su disminución se puede traducir en una menor tendencia a la formación de grietas. Este aspecto demuestra otras de las ventajas del uso de altas velocidades de corte.

## Agradecimientos

Quisiéramos agradecer a la MSc. Victoria Herrera Palma del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear. CEADEN, por su valiosa cooperación en la realización de parte de los ensayos de esta investigación

## Referencias.

1. Field, M. y Kahles, J. "Review of surface integrity of machined components". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 1971, vol. 20, n° 2, p. 153–163. ISSN 0007-8506.
2. Aouici, H. "Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization". *Measurement*. 2012, vol. 45, p 344–353. ISSN 0263-2241.
3. Asilturk, I. "Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method". *Measurement*. 2011, vol. 44, p 1697–1704. ISSN 0263-2241.
4. Bouacha, K. "Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool". *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2010, vol. 28, p 349–361. ISSN 0263-4368.
5. Lalwani, D. I. "Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel". *Journal of materials processing technology*. 2008, vol. 206, p 167–179. ISSN 0924-0136
6. Muños Escalona, P. "Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel". *Wear*. 1998, vol. 218, p 103 – 109. ISSN 0043-1648.
7. Jacobson, M. "Cutting speed influence on surface integrity of hard turned bainite steel". *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol.128, p 318–323. ISSN 0924-0136.
8. Ezugwu, E. O. "The machinability of nickel-based alloys: a review". *Journal of Materials Processing Technology*. 1999, vol. 86, p 1–16. ISSN 0924-0136.



9. Pawade, R. S. "Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2008, vol. 48, p 15–28. ISSN 0890-6955.
10. Devillez, A. "Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity". *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, p 1590–1598. ISSN 0924-0136
11. Sharman, A. R. C. "An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718TM when turning", *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, vol.173, p 359–367. ISSN 0924-0136.
12. Hua, J. "Investigation of cutting conditions and cutting edge preparations for enhanced compressive subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel", *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, vol. 171, p. 180–187. ISSN 0924-0136.
13. Garcíá Navas, V. "Effect of cutting parameters in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 steel". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2012, vol.61, p 48–57. ISSN 0890-6955.
14. Caruso, S. "An experimental investigation of residual stresses in hard machining of AISI 52100 steel". *Procedia Engineering*. 2011, vol.19, p 67–72. ISSN 1877-7058.
15. Outeiro, J. C. "Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, vol. 46, p 1786–1794. ISSN 0890-6955.
16. Gunnberg, F. "The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburised steel". *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, vol.174, p. 82–90. ISSN 0924-0136
17. Rech, J. "Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2003, vol. 43, p. 543–550. ISSN 0890-6955.
18. Jan, D. Y. "Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel". *Wear*. 1996, vol. 194, p 168-173. ISSN 0043-1648.
19. Puerta, J. D. "Sub-surface and surface analysis of high speed machined Ti–6Al–4V alloy". *Materials Science and Engineering A*. 2010, vol.527, p 2572–2578. ISSN 0921-5093
20. Herrera, V. "Use of X Ray Diffraction and Magnetoelastic Effect for assessment of microstructural parameters and residual stresses in plastically deformed steel bars". En: *Proceedings of the XIII Workshop on Nuclear Physics and VII International Symposium on Nuclear and Related Techniques WONP-NURT'2011*, Cuba. 2011 ISBN 978-959-7136-79-8 164 PS.