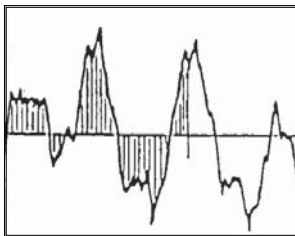


# Cambio del tamaño de grano de una aleación de Inconel 617 al ser maquinada

Patricia del Carmen Zambrano Robledo, Gerardo Ramón Juárez Martínez, Juan José Chávez Valtierra, Abraham Gerardo Limones Martínez, Rosa Nelly Montalvo Páez

FIME-UANL

pzambran@fime.uanl.mx



## RESUMEN

*Una aleación base níquel, Inconel 617 se maquinó a diferentes condiciones para evaluar su comportamiento superficial y analizar los cambios en el tamaño de grano. Para esta descripción se tomaron en cuenta diferentes parámetros, manteniendo constantes el herramental y las velocidades de corte, variando los avances. Los resultados muestran que el tamaño de grano es sensible al avance.*

## PALABRAS CLAVE

Maquinabilidad, Inconel, tamaño de grano, rugosidad.

## ABSTRACT

*A nickel base Inconel 617 alloy was machined at different conditions in order to evaluate its surface performance and also to analyze its changes in grain size. Different parameters were taken into account, tooling, cutting speeds, tooling rates were maintained constant and advance was varied during tests. The machining results show that grain size is sensible to the advance.*

## KEYWORDS

Machining, grain size, Inconel, roughness.

## INTRODUCCIÓN

El maquinado es una operación importante en la manufactura de componentes, hoy en día se ha vuelto crítico en la fabricación de piezas para industrias como la aeroespacial,<sup>1</sup> biotecnología.<sup>2</sup> y la biomédica.<sup>3</sup> Debido a las características de las aleaciones utilizadas en las piezas ha surgido una gran necesidad en enfocar la investigación fundamental en el desarrollo de mejores prácticas de maquinado para este tipo de materiales, que por naturaleza son difíciles de trabajar. Desarrollos recientes se han centrado en varios aspectos de maquinabilidad<sup>4</sup> enfocando claramente las operaciones en términos del método de procesamiento de la aleación y las variantes de la misma en términos de la microestructura.

Distintos estudios han mostrado el papel crítico de los parámetros de corte en la microestructura, la rugosidad y la vida de la herramienta cuando

se trabajan aleaciones de inconel.<sup>5-7</sup> El tamaño de grano interactúa con los parámetros de corte (velocidad, avance, herramienta y material) afectando principalmente los parámetros en la superficie de contacto. El propósito de este trabajo es analizar el cambio de microestructura al maquinar una aleación base níquel para establecer las mejores condiciones de maquinado.

## MAQUINABILIDAD DE ALEACIONES DE NÍQUEL

Las aleaciones base níquel están clasificadas como de corte difícil con una pobre maquinabilidad atribuida principalmente al rápido endurecimiento producido por el trabajado durante el maquinado, la presencia de carburos abrasivos duros, la gran reacción química a elevadas temperaturas, una difusividad térmica muy pobre así como la adhesión frecuente de las aleaciones de níquel en la herramienta de corte durante la operación.<sup>8</sup> Una vida corta de la herramienta y un severo deterioro de la superficie de corte, son los factores más críticos en la maquinabilidad de las aleaciones.

Las aleaciones base níquel tienen una matriz austenítica, como los aceros inoxidable, de aquí el rápido endurecimiento por deformación durante el maquinado y, consecuentemente, el acelerado desgaste de la herramienta de corte. Otros factores importantes que afectan adversamente la maquinabilidad, son la tendencia de soldarse y pegarse en la cara de corte de la herramienta, el material acumulado en el borde a bajas velocidades,<sup>9</sup> y la relativa baja conductividad térmica la cual provoca altas temperaturas en el filo de corte de la herramienta.

## RUGOSIDAD

Una superficie perfecta es una abstracción matemática, ya que por perfecta que parezca, presentará irregularidades que se originan durante el proceso de fabricación.<sup>10</sup> Las desviaciones de forma y posición son errores asociados con la variación en tamaño de una pieza, paralelismo entre superficies y planeza de una superficie o conicidad, redondez y concentricidad pueden medirse con instrumentos convencionales, tales como rugosímetros, medidores de planicidad y de redondez.

Las irregularidades menores son la ondulación y la rugosidad. La primera pueden ocasionarla la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etcétera; la rugosidad la provoca el elemento utilizado para realizar el maquinado, por ejemplo, la herramienta de corte o la piedra de rectificado. Los errores superficiales mencionados se presentan simultáneamente sobre una superficie, lo que dificulta la medición individual de cada uno de ellos.

El costo de una superficie maquinada crece cuando se desea un mejor acabado superficial, ya que no siempre un buen acabado superficial redundará en un mejor funcionamiento de la pieza, como sucede cuando se desea lubricación eficiente y, por tanto, una capa de aceite debe mantenerse sobre la superficie.

Aunque se pudiese medir la rugosidad de toda la superficie, basta con revisar una pequeña longitud,<sup>10</sup> ya que afortunadamente no hay una variación excesiva en una superficie del mismo material maquinada en totalidad por la misma herramienta de modo que cualquier otra medición paralela realizada a alguna distancia de la primera dará un valor cercano al inicial. En la práctica se utiliza la

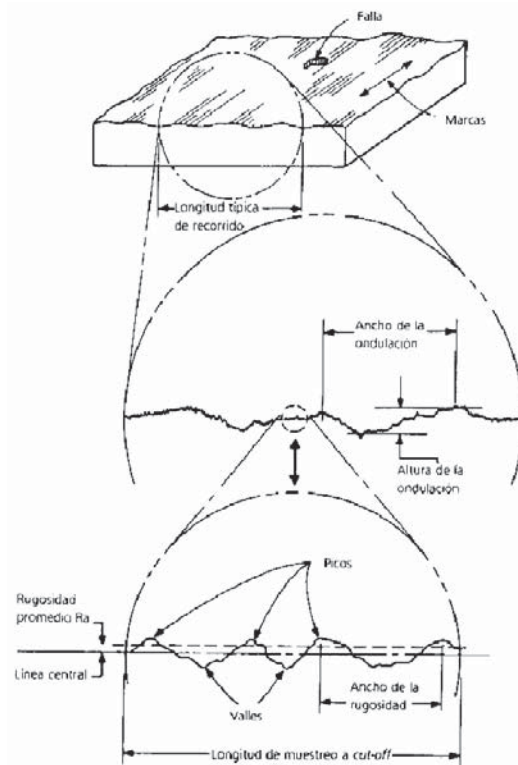


Fig. 1. Tomada de la norma ANSI/ASME B46.1-1985.

longitud de evaluación, la cual puede ser una, tres o cinco veces la longitud de muestreo; este último valor es el común. La longitud de recorrido será un poco mayor que la de evaluación ya que si el palpador de diamante (dispositivo por medio del cual el rugosímetro realiza la medición) está en reposo se requiere recorrer una pequeña longitud antes de alcanzar la velocidad normal de recorrido y después realizar un recorrido adicional para que el palpador alcance nuevamente el reposo. Una vez realizada la evaluación, el palpador regresa con una velocidad mayor al punto de origen, preparándose así para una nueva medición. La figura 1, tomada de la norma ANSI/ASME B 461-1985<sup>11</sup> ilustra la superficie de una pieza en la que se observan marcas unidireccionales originadas por el proceso de maquinado utilizado y cierta ondulación de la superficie; si se amplifica esta superficie, se observa con mayor claridad la ondulación, pero se verán otras irregularidades más pequeñas superimpuestas. Con otra amplificación se obtiene la rugosidad; a las partes altas se les denomina picos, a las bajas, valles. Esta forma de examinar el acabado superficial se denomina método de perfil.

### MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD

Existen dos tipos de curvas importantes cuando se evalúa la rugosidad por el método del perfil: la P y la R.<sup>11</sup> La curva P es un perfil resultante de la intersección de una superficie con un plano perpendicular a la superficie. A menos que se especifique otra circunstancia, la intersección debe ser en la dirección en la cual el perfil representa el máximo valor de la rugosidad; por lo general es en la dirección perpendicular a las marcas de maquinado sobre la superficie (figura 2).

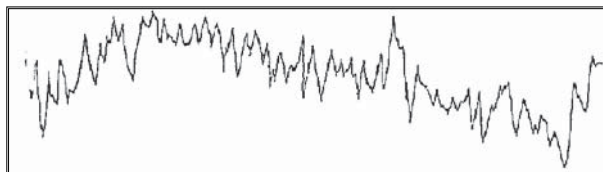


Fig. 2. Curva P, perfil resultante de la intersección de una superficie con un plano perpendicular a la superficie.

La curva R es un perfil que se obtiene de la curva P removiendo los componentes de ondulación de baja frecuencia, cuyas longitudes de onda son mayores que la longitud de onda límite seleccionada ( $l_c$ ) (figura 3).

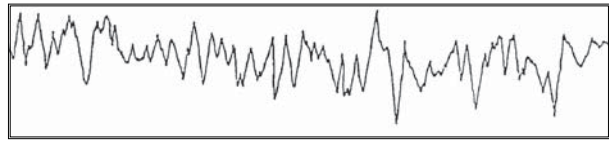


Fig. 3. Curva R, perfil que se obtiene de la curva P removiendo los componentes de ondulación de baja frecuencia.

En los rugosímetros la longitud de muestreo se varía por medio de filtros que modifican la frecuencia de respuesta del amplificador y, por lo tanto, la forma de onda del perfil. La longitud de muestreo es una longitud física de la superficie. La longitud de onda límite es el medio a través del cual el perfil resultante de la forma de onda simula la restricción de la evaluación a la longitud de muestreo. Por conveniencia se cita como la longitud de muestreo equivalente. Las medidas de la rugosidad por el método de perfil están basadas en una línea central que es paralela a la línea medida del perfil a través de longitud de evaluación, de modo que dentro de esta longitud la suma de las áreas limitadas por la línea central y el perfil es igual en ambos lados (figura 4).

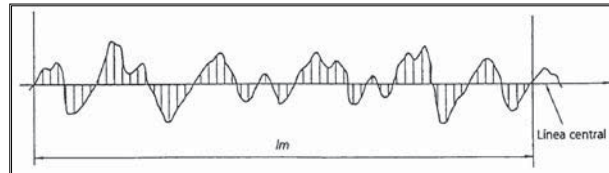


Fig. 4. Línea central, paralela a la línea medida del perfil a través de longitud de evaluación.

### DEFINICIÓN DE $R_a$

Dentro de la longitud de evaluación ( $l_m$ ) (ver fig. 4), la media aritmética de los valores absolutos de los alejamientos del perfil desde la línea central se representa por medio de la fórmula:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |f(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(x_i)| \quad (1)$$

donde el perfil es definido como  $Z=f(x)$  con el eje X como la longitud de evaluación ( $l_m$ ) y el eje Z en la dirección de la amplificación vertical (figura 5).

La definición de  $R_a$  equivale, en términos prácticos, a la altura de un rectángulo de longitud  $l_m$  cuya área es igual, dentro de la longitud de evaluación, a la suma de las áreas delimitadas por

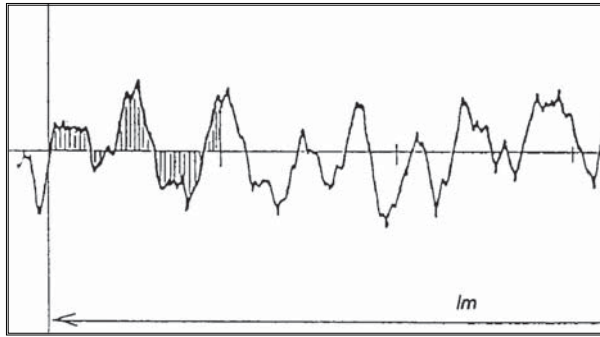


Fig. 5. Perfil  $Z= f(x)$ .

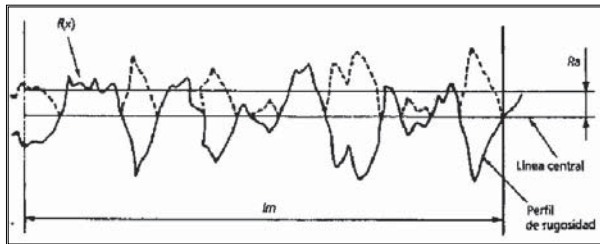


Fig. 6. Definición de  $R_a$ .

el perfil de rugosidad y la línea central. Esto se representa mediante el procedimiento mostrado en la figura 6; así,  $R_a$  es rugosidad promedio (también denominada CLA por promedio de la línea central, aunque en el pasado también se utilizó AA por promedio aritmético).

$R_a$  es el único parámetro de este tipo definido en las normas de Estados Unidos, Canadá, Países Bajos y Suiza. También está bien definido en las normas de todos los países industrializados, y en las normas internacionales ISO, por lo tanto es el más ampliamente utilizado y al cual se referirá este trabajo.

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las pruebas se llevaron a cabo en un centro de maquinado de control numérico EMCO PC-mill, utilizando 10 probetas de 35 mm. de ancho x 135 mm. de longitud y 13 mm. de espesor, se removió 1 mm de material por pase. La composición química de las piezas se da en la tabla I, obtenida por medio de distribución elemental por rayos-X. Se utilizaron insertos de Nitrato de boro cúbico (CBN) de 3/8" con un recubrimiento de titanio. Las pruebas fueron conducidas bajo condiciones de corte en seco sin refrigerante. Se utilizó un Inconel 617 el cual fue

Tabla I. Composición química de la aleación.

Aleación Inconel 617	% Wt
Ni	56.0
C	0.1
Fe	3.0
Si	0.5
Mn	0.5
Co	10.0
Cr	20.0
Ti	0.6
P	0.015
S	0.015
Mo	8.0
Al	0.8
B	0.006
Cu	0.05

Tabla II. Condiciones de corte.

Profundidad de corte (mm)	Velocidad de corte m/min	Avance mm/min
1.0	24	70
1.0	24	80
1.0	24	90
1.0	24	100

sometido a un tratamiento de solubilización y envejecido para elevar su dureza a 35 Rc.

Las condiciones de corte empleadas se muestran en la tabla II.

Una vez maquinadas las piezas, se midió la rugosidad de las mismas (representada por  $R_a$ , con una capacidad de lectura de 0.01-100  $\mu\text{m}$ ) con un rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-301.

Para la medición del tamaño de grano, las muestras fueron preparadas primeramente a acabado espejo realizando un corte transversal en la muestra y para poder evaluar lateralmente la pieza y de esta forma analizar la microestructura en la superficie maquinada, para posteriormente pulirlas electrolíticamente con una solución de ácido oxálico al 20%. La medición se obtuvo por medio del analizador de imágenes Image-pro®.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de la rugosidad se muestran en la figura 7.

En la misma se muestran los valores de rugosidad Vs. Avance. En ésta se puede apreciar que para los avances de 70 y 80 mm/min, la rugosidad se mantiene constante en 0.4, disminuyendo a 0.27 con el avance de 90 mm/min, y mostrando un aumento en la rugosidad a 0.7 con el avance de 100 mm/min.

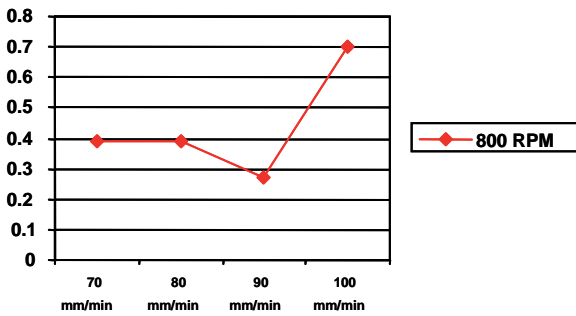


Fig. 7. Gráfica de la rugosidad de las muestras.

Cuando se observa la microestructura de las muestras (figuras 8-12), se ve claramente el cambio en el tamaño de grano ASTM. Observando que la muestra sin deformación presenta el menor tamaño de grano y a medida que las muestras son maquinadas a mayores avances, incrementándose la temperatura en la interfase entre la herramienta y la pieza de trabajo, el tamaño de grano aumenta, este incremento en la temperatura provoca que la pieza tome un



Fig. 8. Microestructura de muestra sin maquinar con tamaño de grano ASTM 4.

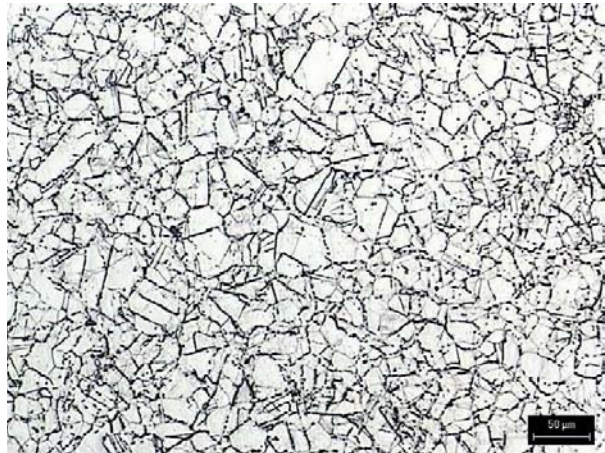


Fig. 9. Microestructura de muestra maquinada a 70 mm/min con tamaño de grano ASTM 6.3.

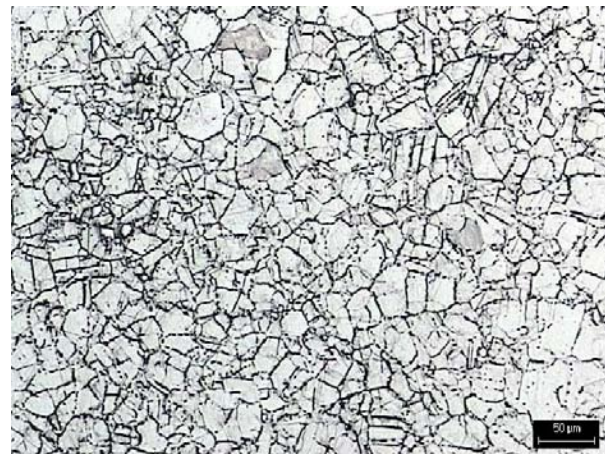


Fig. 10. Microestructura de muestra maquinada a 80 mm/min con tamaño de grano ASTM 7.9.

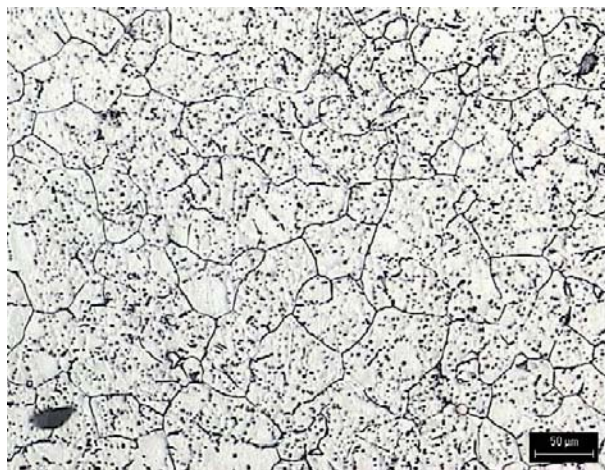


Fig. 11. Microestructura de muestra maquinada a 90 mm/min con tamaño de grano ASTM 9.07.

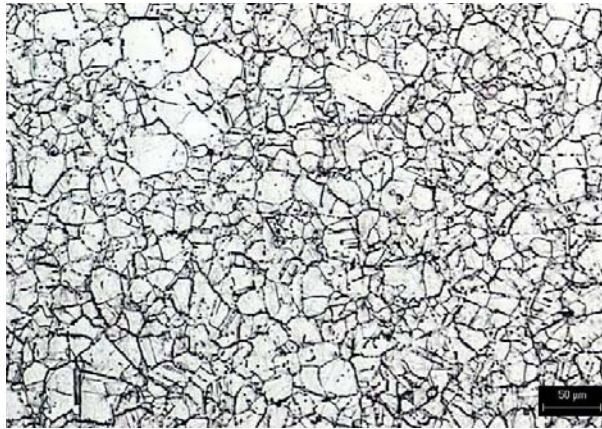


Fig. 12. Microestructura de muestra maquinada a 100 mm/min con tamaño de grano ASTM 8.66.

mayor tiempo para enfriarse, lo que da lugar a la recristalización del grano.

Se observa sin embargo que el comportamiento no es lineal, ya que la muestra maquinada a 90 mm/min presenta un mayor tamaño de grano que la maquinada a 100 mm/min. Esto se explica en función del tamaño de la rebaba,<sup>9</sup> ya que cuando la misma alcanza un espesor crítico, su masa es tal que puede absorber más calor y la temperatura del frente de maquinado tiende a disminuir, lo que hace que el grano tenga un menor crecimiento o grado de recristalización ya que se trata de un proceso térmicamente activado.

## CONCLUSIONES

Se observa un cambio en el tamaño de grano a medida que la pieza sufre calentamiento durante el maquinado, lo que se explica en función del calentamiento más prolongado que las piezas sufren, tiempo durante el cual el grano tiene tiempo de cristalizar.

Se observa una buena rugosidad en los valores bajos de avance, con un deterioro en la de las piezas maquinadas a altos avances, lo cual muestra la necesidad de maquinar en un intervalo controlado.

## REFERENCIAS

1. Industria Aeroespacial: Situación y perspectivas desde el punto de vista de las empresas auxiliares en Sevilla, Sociedad Andaluza de Componentes especiales, septiembre 2003.

2. Guerrero, J. J.; 1998, Biotecnología para el procesamiento de minerales. En: Segundo Congreso Nacional de Minería, Trujillo, Perú, Agosto, 1998.
3. Greater San Antonio Chamber of Commerce 5<sup>th</sup> Biomedical Economic Impact Study.
4. Narutaki, N., Yamane, Y., Hayashi, K. and Kitagawa, T., "High Speed Machining of Inconel 718 with ceramics Tools," Annals of the CIRP, 42, 1 pp 102-106 (1993).
5. L. Jiang, A. Roos and P. Liu: Metall Mater. Trans. A, 1997, 28A, 2415-2422.
6. L. Jiang, A. Roos and M.L. Johansson: 4<sup>th</sup> Int. Conf. "Behaviour of materials in machining", Stratford-upon-Avon, UK, November 1998, The Institute of Materials, 281-290.
7. R. M'Saoubi, J. C. Outeiro, B. Changeux, J. L. Lebrun and A. M. Dias: J. Mater. Process. Technol., 1999, 96, (1-3), 225-233.
8. Sims, C. T. and Hagel, W.C., eds., The Superalloys, A. WileyInterscience publication, John Wiley & Sons, London, New York, Sydney, Toronto, (1972).
9. D. Gillibrand, M. Sarwar and C. T. Pierce, "The economic benefit of finish turning with coated carbide", Surface and Coating Technology, Vol. 86-87, pp. 809-813, 1996.
10. Surface Roughness Tester User's Manual, pp. 4-19, Mitutoyo, 2004.
11. Metrología dimensional. Ramón Seleny Vázquez y Carlos González González. Cap.17, pp 43, McGraw-Hill.
12. E. Morales Luna, P. del C. Zambrano, "Estudio de la relación entre la maquinabilidad de los aceros 1018, 1040 y aluminio 6063 y la caracterización de la viruta generada", Foro de Investigación UDEM 2004, Octubre 2004.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento del Gobierno del Estado de Nuevo León y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por medio de los Fondos Mixtos del Estado de Nuevo León 2005.