

Incertidumbre en la medición de temperatura en el corte ortogonal de aleaciones de Titanio

D. Soler Mallo, A. Garay Araico, L M^a. Iriarte Gurutzeta, P.J. Arrazola Arriola

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial. Escuela Politécnica superior, Mondragon
Unibertsitatea
dsoler@mondragon.edu

Cuando se usa un termómetro de radiación infrarroja para medir la temperatura de la herramienta durante un corte ortogonal en seco de distintas aleaciones de Titanio, la incertidumbre en la medición de esta temperatura depende de varios parámetros. Algunos de estos parámetros están relacionados con el montaje experimental y las condiciones de corte, otros están relacionados con el sistema de adquisición de datos, y finalmente los hay relacionados con las características físicas de la herramienta. Estos parámetros son analizados, se estima su incertidumbre y se discute en qué medida estas incertidumbres condicionan la medida de la temperatura final.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los puntos clave a la hora de analizar el mecanizado de aleaciones de Titanio es conocer la temperatura que alcanza la herramienta durante el corte, siendo habitual el uso de tecnología infrarroja [1], [2]. Las principales ventajas de la tecnología infrarroja frente a otras tecnologías, como el uso de termopares, es que se trata de una tecnología no intrusiva, y que permite realizar medidas no puntuales.

La temperatura de la herramienta durante el corte se mide para comprender mejor la naturaleza de este proceso, con el fin de analizar cuáles son las condiciones óptimas de corte, para alargar la vida de trabajo de la plaquita y para comparar la respuesta a la maquinabilidad de distintas aleaciones de Titanio que se pueden encontrar en el mercado. Por lo tanto, el objetivo es doble, analizar distintas condiciones de corte y comparar distintos materiales.

Sin embargo, medir la temperatura con un sistema de adquisición de radiación infrarroja no consiste sólo en colocar una cámara termográfica delante de la superficie emisora. En la Figura 1 se describe esquemáticamente los pasos a realizar antes de obtener el valor de la temperatura de la herramienta durante el corte ortogonal en seco. En primera instancia hay que colocar la cámara ortogonalmente a la superficie de la herramienta donde se desea determinar la temperatura, para captar la radiación emitida durante el mecanizado de la pieza.

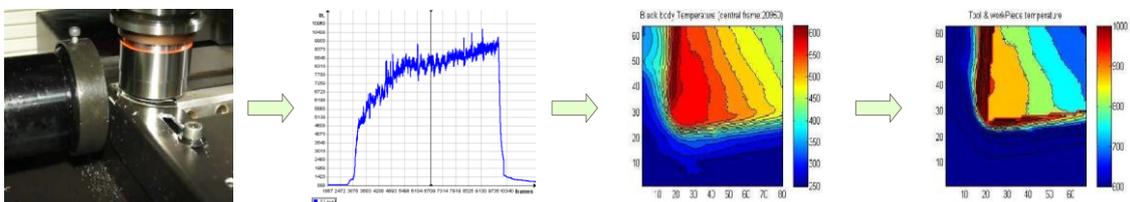


Figura 1. La cámara transforma la radiación infrarroja en una señal digital, ésta se trata para obtener la temperatura de cuerpo negro, finalmente se usa la emisividad para calcular la temperatura real.

La cámara termográfica está equipada con una matriz de 320x256 detectores, y cada uno de estos detectores convierte la radiación recibida en una señal eléctrica expresada, por defecto, en Niveles Digitales (DLL). Los DLL no son una magnitud física relevante, por lo que es necesario usar una calibración de la cámara para relacionar los DLL con una temperatura real.

Realizar una calibración consiste, esencialmente, en colocar un cuerpo negro de referencia a una temperatura conocida frente la cámara, de este modo es posible relacionar la respuesta de la misma en DLL con la temperatura del cuerpo (T_{BB}). Esta calibración debe hacerse en las mismas condiciones en la que se hacen las pruebas experimentales, debido a que la calibración depende de la configuración física de la cámara: tamaño de la ventana usada (número de píxeles/detectores), tiempo de integración, óptica y filtros usados.

Finalmente, para obtener la temperatura real de la plaquita es necesario tener en cuenta que ésta no es un cuerpo negro de referencia, y por tanto, que la temperatura conseguida con la calibración debe ser corregida teniendo en cuenta la emisividad de la superficie de la misma.

Es evidente que la temperatura alcanzada por la herramienta durante el corte, depende en gran medida de las condiciones de corte (avance y velocidad de rotación), y del material de la pieza. Sin embargo, la precisión en la medida de esta temperatura depende de otros factores relacionados con: el montaje experimental, la calibración de la cámara y, por supuesto, la precisión en la medición de la emisividad de la herramienta. Todos estos factores son analizados para determinar en qué medida afectan a la temperatura final, y así estimar la incertidumbre en la medida de la temperatura de la herramienta durante el corte ortogonal en seco de distintas aleaciones de Titanio.

El documento está organizado de la siguiente forma, en la próxima sección se explica el montaje experimental usado durante el proceso de medición. En la sección 3, se exponen algunas ideas básicas sobre la teoría de errores y se dan una serie de fórmulas que serán usadas en las siguientes secciones, donde se analizarán las fuentes de error con origen en el montaje experimental (sección 4), con origen en la calibración (sección 5) y con origen en la emisividad (sección 6). Finalmente, en la sección 7 se comentarán las conclusiones más relevantes obtenidas.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para medir la temperatura durante el corte ortogonal en seco de varias aleaciones de Titanio se colocan muestras cilíndricas de diámetro exterior de 48 mm y un grosor de 2 mm sobre centro de mecanizado vertical Lagun con CNC, de modo que el diámetro exterior esté a una distancia de $d = 0,3$ mm de la cara de la plaquita donde será medida la temperatura.

Las condiciones del corte, avance y revoluciones por minuto se controlan desde el centro CNC. Cada ensayo experimental se ha realizado tres veces con el fin de validar la repetitividad de los resultados.

Una cámara termográfica FLIR Titanium 550M se coloca en el plano perpendicular a la dirección de corte, enfocando la plaquita previamente rectificada. La cámara lleva un filtro de modo que sólo es sensible a la radiación emitida por esta superficie en un rango de 3,97-4,01 μm . Además, la cámara está equipada con una lente microscópica que da una resolución menor de 10 μm .

3. TEORÍA DE ERRORES

Como se ha comentado en la introducción, el principal objetivo de este trabajo es el análisis de la incertidumbre en la medida de la temperatura durante el corte ortogonal en seco de aleaciones de Titanio. La barra de error final de dicha medida depende de varios factores con orígenes dispares. En general se pueden clasificar los errores en tres categorías: errores de precisión, errores estadísticos y errores sistemáticos.

Los errores de precisión tienen su origen en el aparato de medida y su escala, tomándose en general como error de precisión, la mitad de la mínima unidad de la escala.

Los errores estadísticos se relacionan con la desviación estándar de una medida repetida. Si una determinada magnitud física X sigue una distribución normal, entonces la probabilidad de que al tomar una muestra de esta población su media esté dentro del intervalo $[m_x - 2\sigma_x, m_x + 2\sigma_x]$, donde m_x es la media de la muestra y σ_x la desviación estándar de la población, es del 95,4%. Esta es la razón por la que en este trabajo se toma como error estadístico de X

$$\Delta X = 2S_x. \tag{1}$$

donde S_x es la desviación estándar de la muestra.

Finalmente, en cuanto a los errores sistemáticos se pueden diferenciar dos casos: cuando existe una relación funcional conocida entre una magnitud física y cuyo valor se determina a partir de otras magnitudes x_j ; y cuando esta relación no se conoce, en cuyo caso se usan una serie de datos experimentales para ajustar una relación funcional entre ellas.

En el primer caso, el error sistemático viene dado por

$$(\Delta y)^2 = \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)^2 (\Delta x_j)^2 \tag{2}$$

donde Δx_j es el error en la medida de la magnitud x_j .

En el segundo caso, si se pretende medir una magnitud física y , indirectamente, usando otra magnitud x , el error sistemático tiene otro aspecto. La propagación del error en una curva no lineal ajustada experimentalmente fue tratada con anterioridad en [3], y sus principales resultados se usan en este trabajo.

En particular, si se usa un conjunto de M datos experimentales (x_i, y_i) para ajustar una curva no lineal con $N < M$ parámetros (a_j) por el método de los mínimos cuadrados, el error en y viene dado por

$$(\Delta y)^2 = \sum_{i=1}^M \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2 + \sum_{i=1}^M \left(\frac{\partial y}{\partial y_i} \right)^2 (\Delta y_i)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 (\Delta x)^2 \tag{3}$$

donde Δx_i es el error del dato x_i y, Δy_i el correspondiente al dato y_i medido experimentalmente de forma directa.

El último término de la ecuación (3) hace referencia a la propagación del error de la medida x cada vez que se usa la curva de ajuste, mientras que los dos primeros términos hacen referencia al error de y debido al error en los parámetros del ajuste. Estos términos se pueden calcular usando

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^N [BH^{-1}]_{ij} \frac{\partial y}{\partial a_j} \tag{4}$$

$$\frac{\partial y}{\partial y_i} = \sum_{j=1}^N [CH^{-1}]_{ij} \frac{\partial y}{\partial a_j} \tag{5}$$

donde $[BH^{-1}]_{ij}$ y $[CH^{-1}]_{ij}$ son respectivamente los elementos de la fila i , columna j del producto de las matrices B y H^{-1} , y de las matrices C y H^{-1} . Estas matrices vienen dadas por las expresiones

$$B_{ij} = - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial a_j} \right) + (y_i - y(x)) \frac{\partial y}{\partial x \partial a_j} \Bigg|_{x=x_i} \tag{6}$$

$$C_{ij} = \frac{\partial y}{\partial a_j} \Bigg|_{x=x_i} \tag{7}$$

$$H_{kj} = \sum_{i=1}^M \left(\frac{\partial y}{\partial a_k} \frac{\partial y}{\partial a_j} \right) \Big|_{x=x_i} \quad (8)$$

donde $k=1, \dots, M$.

4. PARÁMETROS DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

Para poder comparar distintas aleaciones es necesario controlar los parámetros que pueden condicionar la temperatura alcanzada durante el proceso de corte, algunos de ellos como el avance y velocidad de corte son evidentes, pero hay otros parámetros que también pueden condicionar la temperatura final dada y que pueden o no generar cierta incertidumbre en la misma. A continuación se analizarán los más relevantes:

Tamaño y colocación de probeta

Como se ha comentado en la sección 2, todas las probetas tienen las mismas dimensiones, lo que implica que no se puede atribuir ninguna incertidumbre en la temperatura final debido a este factor.

A pesar de que la posición de la probeta sobre la plaquita también es un parámetro controlado antes del experimento ($d = 0,3$ mm), la agresividad de algunos experimentos puede suponer pequeñas variaciones del mismo. Como se puede apreciar en la figura 2 el valor de d es un parámetro crítico a la hora de determinar la temperatura final, de modo que después de cada experimento se inspecciona la herramienta con un macroscopio electrónico a fin de determinar el valor de d , (ver figura 3).

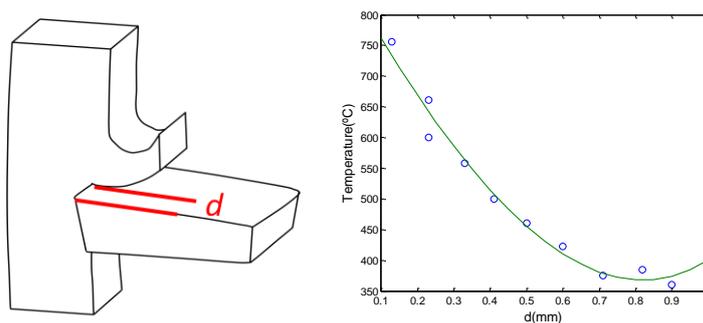


Figura 2. La distancia d condiciona en gran medida el valor de Temperatura medida

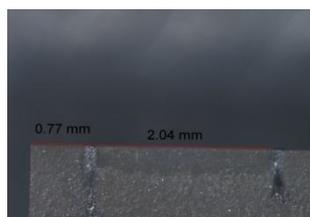


Figura 3. Desgaste en la herramienta se usa para determinar el valor del parámetro d .

Para analizar la influencia del parámetro d en la temperatura final se realizaron una serie de experimentos con una aleación de titanio, mostrándose los resultados en la figura 3. Estos puntos experimentales se pueden ajustar a la función con tres parámetros ajustables

$$T(d) = a_1 e^{a_2 d} + a_3 d \quad (9)$$

Después de realizar el ajuste por el método de los mínimos cuadrados se obtuvieron los siguientes valores para los tres parámetros ajustables: $a_1=865$, $a_2=0,990$ y $a_3=-1,93 \cdot 10^3$. Esta curva ajustada puede usarse para corregir el valor de la temperatura final en función de d .

Las ecuaciones (3)-(8) permiten estimar la incertidumbre debida a esta corrección, para ello deben estimarse las incertidumbres en la medida de la temperatura y en la medida de d . En la figura 4 se muestra el error estimado tras la corrección cuando $\Delta d = 0,015$ mm y $\Delta T = 40$ °C. En ella se puede observar la incertidumbre tras la corrección de la temperatura usando la función (9), siendo del orden de 20 °C para valores de d cercanos a los 0,3 mm.

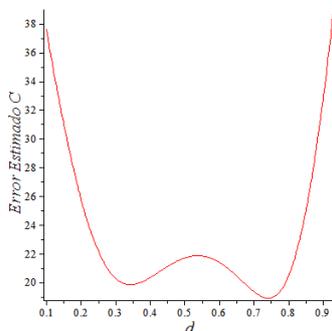


Figura 4. Incertidumbre en la temperatura corregida usando la función (9).

Duración del test experimental

Cuando empieza el experimento la plaquita se encuentra a la temperatura ambiente, mientras que durante el mecanizado, debido al trabajo de las fuerzas de fricción, la herramienta se calienta hasta que llega a una temperatura estacionaria. Alcanzar este estado depende de las condiciones de corte y del material. Sin embargo, en los trabajos previos,[1,4-7] se asume que este estado se alcanza en menos de 5 s, siendo esta la razón por la cual todos los experimentos duran un mínimo de 5 s, aunque solamente se analizan los últimos 28 ms, lo que corresponde a 100 imágenes.

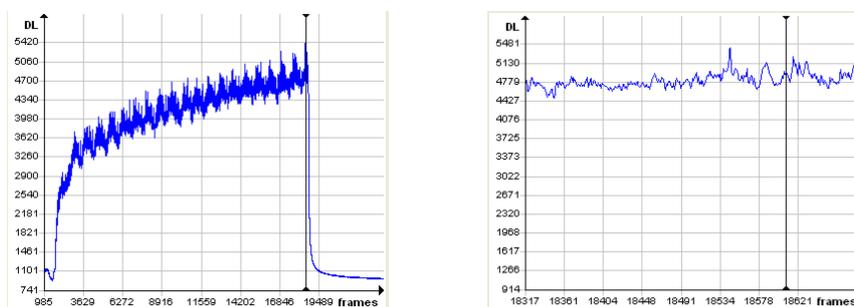


Figura 5. Niveles digitales vs. número de imagen. Ensayo completo y últimas imágenes.

A pesar de que es posible que dicho estado estacionario no se alcance, esta manera de proceder justifica la comparación entre distintos experimentos, por lo que no se considerará como fuente de incertidumbre en la medida de la temperatura.

5. PROCESO DE CALIBRACIÓN

La posición de la cámara, distancia a la superficie de la herramienta, el ritmo de adquisición de fotogramas, el tamaño en número de píxeles del mismo, así como el tiempo de integración, son parámetros que condicionan la lectura en DLL de la cámara.

En la figura 5, se puede apreciar una diferencia de más de 1000 DLL cuando la única diferencia entre las dos imágenes es el tamaño de la ventana. Esta es la razón por la cual la calibración de la cámara que transforma la lectura en DLL a T_{BB} , debe hacerse en las mismas condiciones que los ensayos experimentales.

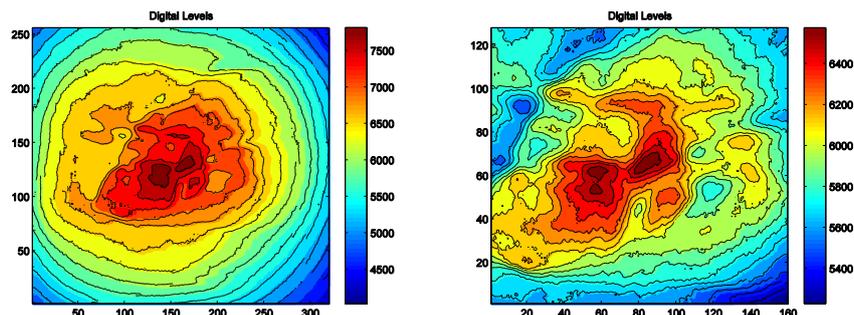


Figura 5. Respuesta de la cámara en DLL frente a un cuerpo negro a 600 °C, tiempo de integración de 200 μ s. En la derecha fotograma con la lectura del los píxeles centrales del fotograma de la izquierda.

Realizar una calibración es en definitiva encontrar una relación funcional entre los DLL y la T_{BB} . Esta función se ha encontrado para cada uno de los detectores/píxeles siguiendo el siguiente proceso:

1. Se coloca un cuerpo negro de referencia enfrente de la cámara y se graban pequeñas películas de 100 imágenes a intervalos de 50 °C entre 300 y 750 °C, lo que determina una secuencia de valores para la T_{BB} , medidas con un termopar incluido en el cuerpo negro.
2. Se calcula la media de la señal (S) detectada por cada pixel y su desviación típica.
3. Se usan los pares (S, T_{BB}) para ajustar los datos experimentales a una curva de calibración píxel a píxel.

En la bibliografía se pueden encontrar distintas relaciones funcionales entre (S, T_{BB}), [2], [3] y [8], pero en este caso se ha usado la función de transferencia [5]:

$$T_{BB} = \alpha_1 \log(S + \alpha_2) + \alpha_3. \quad (10)$$

que como se aprecia en la figura 6, permite un buen ajuste con los datos experimentales, para $\alpha_1 = 265,27$, $\alpha_2 = 1306,8$ y $\alpha_3 = -1825,8$.

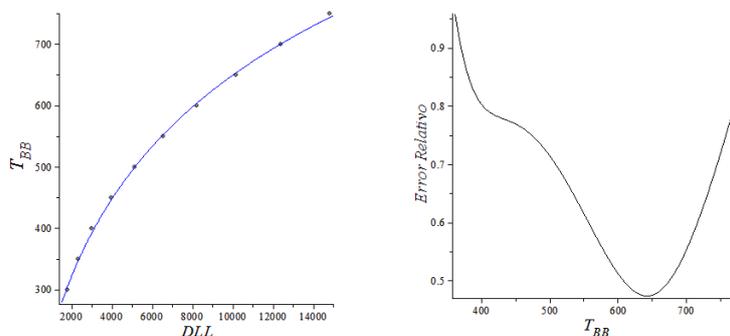


Figura 6. A la izquierda, puntos experimentales y curva de calibración para un píxel concreto. A la derecha error relativo en la medida de la temperatura debido a los dos primeros términos de (3).

De nuevo se usan las ecuaciones (3)-(8) para estimar el error en la temperatura de cuerpo negro debido al ajuste. En la figura 6 se ven los datos experimentales y la curva de ajuste para un píxel concreto, así como la curva de error relativo estimado debido a los dos primeros términos de la ecuación (3).

Para poder obtener el valor del error relativo, se ha tenido en cuenta que durante el proceso de calibración el error estadístico en los DLL es del 0,4%, que es el valor medio de los errores estadísticos de todos los píxeles. El error de precisión en la temperatura del cuerpo negro se ha estimado en 7 °C.

Sin embargo, el error en la medición de los DLL en un ensayo, suele ser mucho mayor que 0,4%, pudiéndose alcanzar valores del orden del 10%, lo que implica un error en la

temperatura de cuerpo negro del orden del 4,5% cuando ésta es del orden de los 450 °C. Este hecho pone de manifiesto que en este caso, el último término de la ecuación (3) es el más relevante para el cálculo de la incertidumbre de la T_{BB} .

6. EMISIVIDAD

Cuando la aproximación de Wien se verifica, la temperatura (T) de un cuerpo con emisividad ϵ está relacionada con la T_{BB} por

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{BB}} + \frac{\lambda}{C_{\omega}} \ln(\epsilon) \tag{11}$$

donde λ es la longitud de onda y $C_{\omega}=14389 \text{ K}\mu\text{m}$.

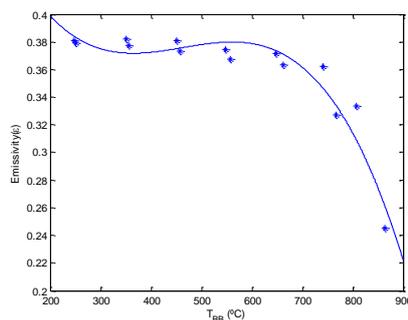


Figura 7. Puntos experimentales obtenidos con un FTIR y el polinomio de ajuste de 3^{er} grado.

El valor de la emisividad de la herramienta se determina con un espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), [9]. Como se aprecia en la figura 7, esta emisividad depende de la T_{BB} . El polinomio de ajuste se usa para determinar el valor de la emisividad por píxel y por imagen.

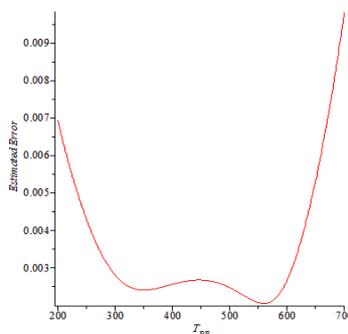


Figura 8. Error en la emisividad en función de la temperatura de cuerpo negro.

Como en los casos anteriores, se pueden usar las ecuaciones de la sección 3 para analizar la incertidumbre debida al uso de este ajuste (ver figura 8). Para obtener esta curva, se ha tenido en cuenta que el error en las medidas de la emisividad dadas por el FTIR es menor del 0,7%, que la incertidumbre en las medidas de temperaturas del cuerpo negro de los puntos experimentales de la figura 6 es del orden de 1 °C, mientras que el error en la medida de la temperatura de cuerpo negro, cuando se usa el polinomio de ajuste, se ha calculado en la sección anterior y se ha estimado que es del 4,5%.

Una vez se conoce el valor de la emisividad, se usa la ecuación (11) para determinar la temperatura final. Para estimar el valor de la incertidumbre en esta medida debe usarse la ecuación (2). Tomando como incertidumbre en la medición de la T_{BB} el valor de 4,5% y como incertidumbre de la emisividad un valor de 0,8%, se observa, (figura 8), que la incertidumbre en la temperatura de la herramienta es en cualquier caso inferior al 6%.

7. CONCLUSIONES

Se ha descrito el uso de termómetros de radiación infrarroja para la medición de la temperatura en la herramienta durante el corte ortogonal en seco de distintas aleaciones de Titanio. Se han analizado los parámetros que influyen en la incertidumbre de esta temperatura, siendo los más relevantes la incertidumbre introducida por la curva de calibración, y la corrección en la temperatura de la herramienta por las variaciones en la distancia (d) entre el radio externo de la probeta y la superficie donde se mide la temperatura.

El uso de la curva de calibración implica un error del orden del 4,5% en la T_{BB} , como la incertidumbre en la emisividad es del 0,8%, el error sistemático en la temperatura de la herramienta es del orden del 6%.

Se ha descrito un protocolo en el montaje experimental a efectos de poder comparar ensayos con condiciones de corte distintas y materiales diversos. En este protocolo se ha detectado como muy relevante el parámetro d . Se realizaron unos ensayos con una aleación de Titanio para ver la dependencia entre d y la temperatura medida (figura 2). La función de ajuste (9) puede usarse para corregir el valor de la temperatura medida teniendo en cuenta las variaciones de d sufridas durante el ensayo, pero esto introduce una incertidumbre del orden de 20 °C. La incertidumbre introducida por esta corrección podría reducirse realizando nuevos ensayos con más puntos experimentales con valores de d cercanos a 0,3 mm. Además, debería analizarse la dependencia de las curvas de ajuste con la aleación usada.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Gobierno Vasco por la financiación recibida gracias a los proyectos PROFUTURE (IE10-271 y IE11-308) y METINCOX (DPI2009-14286-C02-0 y PI-2010-11).

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. J. Arrazola, A. Garay, L. M. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, and F. Le Maître, "Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)," *Journal of Materials Processing Technology*, 209, no. 5 (2009), 2223-2230.
- [2] R. M'Saoubi y H. Chandrasekaran, "Investigation of the effects of tool micro-geometry and coating on tool temperature during orthogonal turning of quenched and tempered steel," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 2 (2004), 213-224.
- [3] P. Saunders, "Propagation of uncertainty for non-linear calibration equations with an application in radiation thermometry," *Metrologia*, vol. 40 (2003), 93-101.
- [4] M. Armendia, A. Garay, A. Villar, M. A. Davies, and P. J. Arrazola, "High bandwidth temperature measurement in interrupted cutting of difficult to machine materials," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1 (2010), 97-100.
- [5] P. J. Arrazola, I. Arriola, M. A. Davies, A. L. Cooke, and B. S. Dutterer, "The effect of machinability on thermal fields in orthogonal cutting of AISI 4140 steel," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 57, no. 1 (2008), 65-68.
- [6] P. J. J. Arrazola, I. Arriola, and M. A. Davies, "Analysis of the influence of tool type, coatings, and machinability on the thermal fields in orthogonal machining of AISI 4140 steels," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1 (2009), 85-88.
- [7] M. Armendia, A. Garay, L. M. Iriarte, and P. J. Arrazola, "Comparison of the machinabilities of Ti6Al4V and TIMETAL 54M using uncoated WC-Co tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 2 (2010), 197-203.
- [8] F. Sakuma y S. Hattori, "Establishing a practical temperature standard by using a narrow-band radiation thermometer with a silicon detector," *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, vol. 5 (1982), 421-427.
- [9] L. del Campo, R. B. Pérez-Sáez, X. Esquisabel, I. Fernández y M. J. Tello, "New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment," *Review of Scientific Instruments*, vol. 77, no. 4, (2006), 11311.