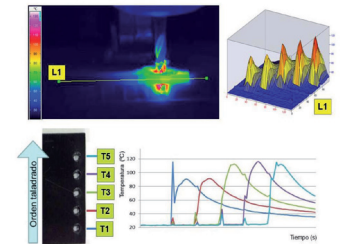


Monitorización del proceso de fresado mediante termografía IR de alta velocidad

MILLING PROCESS MONITORING BY HIGH-SPEED IR THERMOGRAPHY



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7294> | Recibido: 15/09/2014 • Aceptado: 03/12/2014

Manuel San-Juan, Francisco Javier Santos, María del Pilar De-Tiedra, Roberto López y Óscar Martín

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Escuela de Ingenierías Industriales.
Paseo del Cauce, 59 - Valladolid 47011.
Tel.: +34 983 423385. mansan@eii.uva.es

ABSTRACT

• The technological development of the most recent years has considerably expanded the possibilities for experimental analysis of cutting processes: dynamometers and faster acquisition systems, video and high-speed thermography ... In this work the possibilities of the use of high-speed IR thermography in rotating tool processes such as milling are shown. Although the IR thermography may present problems, such as the complexity of the characterization of the measurement chain and the uncertainty estimation, its implementation is very useful. Applications under conditions close to industrial ones are shown for studying the temperature in the workpiece or in the tool itself, both in absolute terms (by knowing the temperature at each time) and relative terms (by knowing the temperature variation when the machining strategy or the specific cutting conditions change).

• **Keywords:** Cutting process, IR Thermography, Milling, Drilling.

RESUMEN

El desarrollo tecnológico de los últimos años ha ampliado notablemente las posibilidades de análisis experimental de los procesos de corte: dinamómetros y sistemas de adquisición más rápidos, video y termografía de alta velocidad.

En este trabajo se muestran las posibilidades del empleo de la termografía IR de alta velocidad en procesos de herramienta rotatoria como el fresado.

A pesar de que la termografía IR puede presentar problemas, tales como la complejidad de la caracterización de la cadena de medida y la estimación de la incertidumbre, su aplicación es de gran utilidad.

Se muestran aplicaciones en condiciones próximas a las industriales para el estudio de la temperatura en la pieza mecanizada o en la propia herramienta, tanto en modo absoluto (conociendo la temperatura en cada instante) como en modo relativo (conociendo la variación de temperatura al cambiar la estrategia de mecanizado o las propias condiciones de corte).

Palabras clave: Proceso de corte, Termografía IR, Fresado, Taladrado.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del corte de material se ha visto limitado tradicionalmente debido a la complejidad de la aplicación de técnicas experimentales que pudieran acercarse a un entorno de gran dinámica. En un reducido espacio se producen grandes deformaciones, fricciones, calentamiento o la fractura del material, con pérdida de materia e incluso cambios microestructurales inducidos por el propio proceso de corte. Debido a esta dificultad y a las limitaciones tecnológicas, la investigación ha encontrado en el estudio indirecto de parámetros su principal objetivo, tanto *in-process* como en *post-process*: fuerzas de corte, geometría de la viruta, desgaste, longitud de contacto, microestructura o el análisis de inclusiones han sido algunos de los factores considerados [1].

Con el desarrollo de las técnicas numéricas, la generación de modelos de elementos finitos para conocer qué sucedía en el proceso de corte parecía más sencillo que su estudio directo, aún con el riesgo del empleo de unos parámetros de entrada no caracterizados completamente o la imposibilidad de validar experimentalmente los resultados.

Los sistemas de video y termográficos de muy altas velocidades permiten ahora la observación directa de aspectos

que no eran imaginables en otros momentos. En los sistemas de termografía IR se llegan a alcanzar resoluciones menores a 25 mK@30°C y velocidades de muestreo superiores a 3000 fps, lo cual supone un nuevo impulso para tratar de aplicar estos equipos en el estudio de procesos tan dinámicos como el arranque de viruta, abordando incluso el análisis de la temperatura en la herramienta o el del calentamiento de la pieza mecanizada (efectos inducidos por el calentamiento sobre la calidad de la misma).

En este trabajo se aborda el estudio de la viabilidad de la aplicación de la termografía IR en la monitorización de los procesos de fresado o con herramientas rotativas.

2. EL PROBLEMA DE LA ESTIMACIÓN DE LA EMISIVIDAD

En la aplicación de las técnicas de medida mediante la termografía IR, la caracterización de la emisividad juega un papel clave en la calidad de la medida [2]. Esta se trata de un número adimensional que se define como el cociente entre la radiación emitida por una determinada superficie (real) y la que emitiría si se tratase de un cuerpo negro, a la misma temperatura. Por consiguiente, un cuerpo negro será aquél que posea una emisividad igual a 1, verificándose en este caso la conocida ley de *Stefan-Boltzmann*:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

donde E designa la potencia total emitida por unidad de área, T la temperatura termodinámica y σ la constante de *Stefan-Boltzmann*.

La emisividad no es constante y característica de un material, sino que depende de factores tales como la temperatura, el estado superficial (rugosidad, capa de óxido) o longitud de onda con la que estemos trabajando. En ocasiones se realiza la consideración de que la emisividad (ε) no varía con la longitud de onda, tratándose en dicho caso de un cuerpo gris, verificando:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

La ecuación (2) nos proporciona la definición más simple de emisividad, y su valor se encuentra tabulado para diversos materiales en un amplio intervalo de condiciones [2] [3], pero es necesario considerar que la emisividad varía tanto con la longitud de onda como con la dirección [4]. Davies en [5] puso de manifiesto el error que supondría tratar a la emisividad como una “propiedad” de una superficie.

La precisión y la incertidumbre de la medida va a depender además de la emisividad de otros factores: condiciones de transmisión, como la absorción, los efectos de dispersión en la emisión, tamaño de fuente o los relacionados con las ópticas como el “*vignetting*” y, por supuesto, el procesamiento de la señal [3]. Así, Davies en el corte ortogonal de un acero AISI 1045, estimaba que la incertidumbre típica en la medida de la temperatura era del orden de $\pm 52^\circ\text{C}$ @ 800°C [6]. M’Saoubi en [6] señalaba que el error sólo asociado a estimación de la emisividad puede ir del 11% ($\varepsilon=0.2$) al 5 % ($\varepsilon \geq 0.5$). Por su parte en [7] se llega a estimar una incertidumbre de medida de

la temperatura en la herramienta y la viruta de $\pm 40^\circ\text{C}$ y $\pm 20^\circ\text{C}$, respectivamente, lo cual permite incluso distinguir el efecto de la diferencia de maquinabilidad en aceros [8].

Recientes trabajos de Wen nos ofrecen algunos aspectos fundamentales sobre el comportamiento tanto de aceros como aleaciones de aluminio. En su trabajo sobre aceros concluye que la emisividad decrece a medida que aumenta la longitud de onda. Para aceros con alto contenido en cromo la emisividad baja debido al óxido de cromo formado en la superficie [9]. En aleaciones de aluminio la emisividad decrece según se incrementa la longitud de onda, aumentando con la temperatura [10].

Deben destacarse los trabajos de Del Campo por su directa aplicación al mecanizado de materiales, considerando el factor de la oxidación de la superficie sobre la emisividad. En [11] se estudia experimentalmente los efectos del óxido en los aceros, demostrándose un comportamiento oscilatorio debido al efecto del espesor de la capa de óxido. En [12] se estudia la oxidación de los carburos para herramientas de corte, determinando la emisividad normal en función de la frecuencia y el tiempo de oxidación al aire. Este tipo de resultados se emplean en [8] para el procesamiento de la señal considerando la emisividad espectral de los diferentes materiales (herramienta, material de ensayo), nivel de oxidación, acabado superficial, temperatura y longitud de onda.

El acabado superficial también puede tener su importancia, Duvaut en [13] estudia los efectos combinados de la rugosidad y longitud de onda, mostrando que en bajas longitudes de onda la sensibilidad al acabado es mayor que para longitudes menores, como se pone de manifiesto en [14].

Debido a la dificultad de conocer unos valores suficientemente fiables de la emisividad superficial, algunos autores han recurrido al uso de pintura de emisividad conocida ($0.9 \div 0.95$) como en [15]. Staggs [16] estudió el efecto de este tipo de recubrimientos sobre diferentes aceros.

Se puede recurrir a la estimación de la emisividad de manera inversa, es decir conocida la temperatura del cuerpo se estima su emisividad. La trazabilidad se garantiza a partir de la temperatura superficial (por ejemplo, empleando un termopar) o la del ambiente de trabajo (atemperando, como en los laboratorios de calibración). Así, de forma indirecta se corrigen igualmente otros factores de incertidumbre como la transmisión o la distancia.

Los sistemas termográficos actuales hacen posible la aplicación de algoritmos de corrección relacionados con la física de la radiación (emisión, reflexión, transmisión) de toda la imagen térmica o por secciones para lo cual se podrían emplear, si fueran conocidos, los valores de la emisividad de herramienta y material ensayado. Se puede recurrir al uso de un horno con control de temperatura y termografiar los objetos de ensayo en distintas temperaturas [17]. En [14] y [9] con esta disposición se observó que las cámaras termográficas pueden presentar respuesta espacial no uniforme o no linealidad en los sensores. Si la termografía se aplica en un mismo instante sobre materiales con una distribución poco homogénea de la emisividad, se puede recurrir al empleo de otros esquemas de corrección como la “corrección directa de píxeles”. Este esquema se podría emplear en aplicaciones de corte ortogonal pero no así en fresado debido a la aparición de elementos en movimiento que entran y salen de la escena estudiada.

En resumen, en la literatura científica vemos que podemos encontrar numerosos valores de emisividad tanto para las herramientas de corte como del material de ensayo. Sin embargo, hay que destacar que la emisividad de los metales varía entre la superficie limpia y aquella que presenta zonas de óxidos y esta a su vez dependerá de la longitud de onda estudiada o la temperatura del cuerpo [18]. Sin olvidarnos de otro efecto posible, como es el de los efectos locales de tratamiento térmico superficial inducidos por el corte [19] [20]. Todo ello viene a poner de manifiesto la dificultad en estimar la incertidumbre en las medidas de la emisividad y aún más acotar la misma en las medidas de la temperatura en los ensayos de corte de materiales.

3. LA MEDIDA DE LA TEMPERATURA EN EL FRESADO

La investigación en la generación de calor y la temperatura alcanzada en el corte de los procesos de mecanizado no es nueva. Un importante número de técnicas de medida han sido desarrolladas a lo largo de los años con el fin de conocer la temperatura en la zona de interacción viruta-herramienta. Desde los primeros artículos sobre la medida de la temperatura empleando una placa fotográfica sensible en el rango infrarrojo publicados por Boothroyd [21], los termómetros IR han sido frecuentemente empleados para la estimación de la temperatura tanto en zonas fijas de la herramienta (en corte ortogonal y torneado fundamentalmente) o en el propio material de ensayo. Sin embargo la limitación fundamental de la aplicación de estos sistemas al estudio del fresado y el taladrado se encontraban en la resolución y velocidad de adquisición de los mismo.

Es en el torneado ortogonal donde se ha realizado un mayor esfuerzo para obtener imágenes termográficas e incluso mapas de temperatura en la cara lateral (sobre un plano perpendicular al corte) [22]. Los dispositivos empleados varían según los autores, diseñándose en algunos casos sistemas completos, como en [23], o sistemas comerciales para los que se diseñan procedimientos específicos de calibración [24].

Para el análisis de la temperatura en las superficies de contacto de la herramienta la presencia de la viruta y el fluido de

corte dificultan la visión directa. Por ello, se ha recurrido a sistemas de medida de la radiación infrarroja mediante fibra óptica y detectores de dos colores, con detectores de InAs y InSb, como los empleados en [25][26]. También se ha recurrido a pirómetros de fibra óptica y múltiples longitudes de onda como en [27]. Aunque algunos años más tarde se pusieron de manifiesto sus limitaciones [6] ó [28].

Los estudios de temperatura en corte interrumpido suponen un paso intermedio entre el torneado y fresado, aunque las probetas empleadas [29][30] y el entorno de análisis se alejan sustancialmente del fresado en condiciones industriales y los costes de los ensayos se incrementan. La disposición del sistema termográfico es similar al del torneado.

El estudio del fresado empleando cámaras termográficas ha sido más reducido. Se imponen condiciones de corte en seco. Como se aprecia en la Fig.1. en una imagen termográfica general, nos vamos a encontrar diferentes elementos:

- **Plaquita.-** En movimiento ve variar su temperatura desde la ambiente hasta la alcanzada con el corte, sufriendo la mayor parte de la carga dinámica y la adición o desprendimiento de diversos elementos, incluso la oxidación superficial. La medida no se puede mantener en una dirección normal a la que se encuentra en movimiento. En caso de emplear herramientas con recubrimiento, el desgaste pondría a la vista un material con diferente emisividad.
- **Porta herramientas y sistema de fijación.-** Elementos en movimiento con variaciones de temperatura menos importantes. Pueden tener adición de material en la superficie.
- **Viruta.-** Elemento que se va arrastrando por la superficie de la herramienta, alcanzado las temperaturas más altas. Presenta una superficie irregular, oxidación superficial y no se puede garantizar la posición normal a la cámara. Al desprenderse se puede quedar en la proximidad de la zona de estudio, constituyendo una fuente emisora de radiación reflejada (*reflected background radiation*).
- **Material de ensayo.-** Se puede buscar una configuración de la máquina-herramienta que permita que se mantenga fijo. Puede sufrir fuertes gradientes locales de temperatura.

En los ensayos comentados de realización de mapas de temperatura en la cara lateral (en un plano perpendicular) aun-

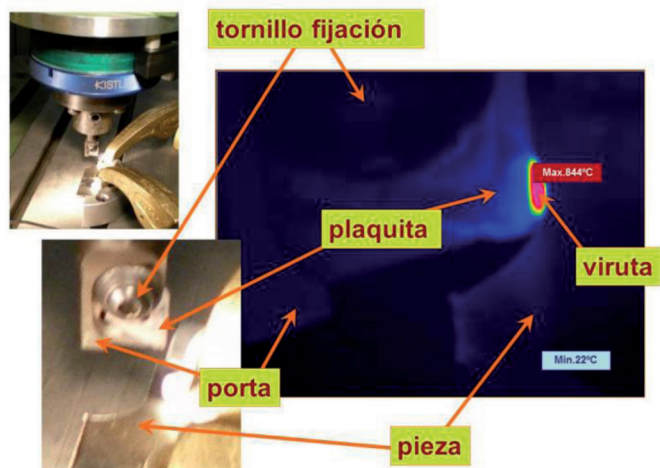


Fig.1: Escena típica en el proceso de fresado

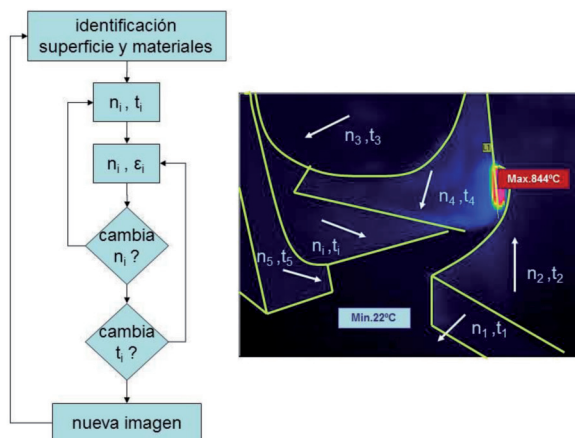


Fig.2: Proceso iterativo para la corrección de la emisividad imagen por imagen

que la viruta fluya, los elementos mantienen la posición en cada termograma. Esto facilitaba la corrección de la emisividad para cada uno de los elementos/materiales incluso en el tiempo. Sin embargo con una disposición como la recogida en la Fig.1., la caracterización de la emisividad y la corrección de la misma debería abordarse píxel a píxel pero también imagen a imagen (*frame by frame*), Fig.2. En un proceso iterativo se debería estimar la dirección normal (n_i) y temperatura (t_i) de la superficie, asignando los valores de emisividad píxel a píxel lo que supondría un elevado tiempo de cálculo y una tasa de éxito no garantizada.

Los trabajos sobre fresado son mucho más limitados en número. Toh presenta una investigación sobre la temperatura sobre la superficie de la viruta en un acero templado AISI H13 [31]. El sistema de adquisición empleado a 25fps para una distancia de 2mm. En [32] se aborda el estudio de la temperatura de la pieza mecanizada sobre una operación de planeado de Ti-6Al-4V empleando una cámara IR. La emisividad de la pieza se estimó empleando una medida sobre el material a una temperatura conocida.

El micro-fresado se estudió por Wismiller. La temperatura de la herramienta se midió empleando una cámara termográfica IR en el mecanizado tanto de aluminio (6061-T6) como de acero (1018) sobre una fresa de 300µm de diámetro de dos labios de carburo de tungsteno [33]. Con la configuración empleada alcanzaron una resolución de 52.9µm/píxel. La herramienta se pintó con pintura negra para reducir los reflejos e incrementar la emisividad hasta aproximadamente un valor de 1.

En el trabajo de Sugita [34], aplicado a la ingeniería biomecánica, se trata de prevenir la necrosis en el hueso tras el fresado. Por la dificultad de la medida en hueso, se centra la

atención en la emisividad de la herramienta y se mide la temperatura en el filo de la herramienta inmediatamente después de terminar el proceso de corte. Otros autores han buscado medir directamente la temperatura en el hueso [35]. El estudio de la temperatura se plantea en modo relativo, verificando el cambio en la temperatura asociado al cambio de protocolo o del tipo de herramienta [36].

4. PROCESO DE MEDIDA: APROXIMACIÓN EXPERIMENTAL

La cadena de medida empleada ha tenido como base un sistema termográfico de alta resolución y alta velocidad de muestreo, aplicada sobre procesos de mecanizado de diversos tipos de materiales (metales, composites o biomateriales), con condiciones de corte adecuadas a cada aplicación. El sistema se basa en una cámara termográfica Image IR de Infra-tec, empleando para el procesamiento de datos y su posterior análisis el software IRBIS 3 Profesional. La cámara posee un detector de 320x256 de radiación en el rango espectral MWIR (2.0÷5.0µm). Para reducir el ruido en la señal, el detector matricial está refrigerado mediante un motor Stirling. Gracias al montaje de una lente telephoto de 100mm se logra la observación de elementos con una alta resolución espacial. Para alcanzar la máxima resolución espacial, en torno a los 30µm, se puede añadir otra lente de 500mm.

Para captar procesos térmicos muy rápidos la frecuencia de imagen puede ir desde 250Hz (pantalla completa) hasta 10 kHz (en modo lineal), con tiempos de integración de 1µs hasta 10ms. Los detectores FPA del tipo InSb permiten alcanzar una

Configuración	1.	2.	3.
Aplicación	temperatura_pieza	temperatura_herramienta	aplicación_biomédica
Material_ensayado:	epoxi_CFR	metal_duro_recubierto	acero_inoxidable_quirúrgico
Emisividad (ref. 20°C)	≈1	≈1	≈1
Tmáx:	<120°C	≈850°C	<60°C
Calibración_cámara:	fabricante	fabricante	fabricante
NUC:	Sí	Sí	Sí
Aplicación_medida:	absoluto	diferencial/relativo	absoluto

Tabla I: Parámetros característicos según el tipo de ensayo

Configuración	1.	2.	3.
Aplicación	Temperatura_pieza	Temperatura_herramienta	Aplicación_biomédica
Integración_time	300µs	300µs	300µs
Telephoto_lentes	100+500mm	100+500mm	100+500mm
Tamaño_imagen	320x256	256x160	320x256
Velocidad	250fps	900fps	150fps
Resolución	900µm	50µm	30µm
Rango_temperatura	20÷125°C	<1000°C	10÷90°C

Tabla II: Parámetros fundamentales empleados para la medida de temperature

resolución en temperatura de hasta $0.025\text{ K @}30^{\circ}\text{C}$ incluso con las altas velocidades de muestreo.

Se han empleado las configuraciones y calibraciones en función de los tiempos de integración realizados por el fabricante del equipo (Tabla I). Igualmente se ha empleado una corrección tipo NUC (*two-point non-uniformity correction*) con el objeto de asegurar que todos los detectores poseen cuantitativamente una respuesta uniforme. Para los ajustes de la emisividad se han verificado sobre condiciones ambientales medidas en las condiciones iniciales del ensayo: empleando un tiempo de estabilización térmica elevado (superior a ocho horas), la temperatura del objeto de estudio se puede asimilar a la temperatura ambiente medida mediante un termohigrómetro trazable. Esta técnica se emplea habitualmente en los laboratorios de calibración para controlar los posibles efectos de la dilatación. La emisividad en estas condiciones están en torno a 1 y la incertidumbre dependería de la temperatura alcanzada y del tipo de material analizado. Por ello, para muy altas temperaturas sería más fiable la medida diferencial que la absoluta.

En la siguiente tabla se muestran diferentes configuraciones típicas que se han empleado para las aplicaciones que vamos a analizar a continuación (Tabla II).

4.1. ESTUDIO DE LA TEMPERATURA EN LA PIEZA DE ENSAYO

En este primer caso, el estudio tenía como objetivo fundamental conocer los efectos del proceso de corte sobre el material mecanizado. En particular se muestra el comportamiento en el taladrado sobre un material compuesto reforzado con fibra de carbono empleado en el sector aeronáutico. La configuración mostrada ha sido idéntica para el estudio del fresado del material, en operaciones de recantado, sin embargo se ha optado por mostrar el resultado del taladrado por ser más significativo para apreciar las capacidades del método.

La Fig.3 muestra el tipo de resultados obtenidos. Sobre la placa se llevaron a cabo cinco taladros consecutivos observando sobre el borde libre del material el flujo de calor y el calentamiento, para lo que se ha empleado una línea de referencia (L1) situada en el centro de la placa sobre la que observar la evolución en el espacio y en el tiempo, como en la figura superior derecha. Si además nos fijamos en la variación de la temperatura en la posición de los ejes de cada taladro, obten-

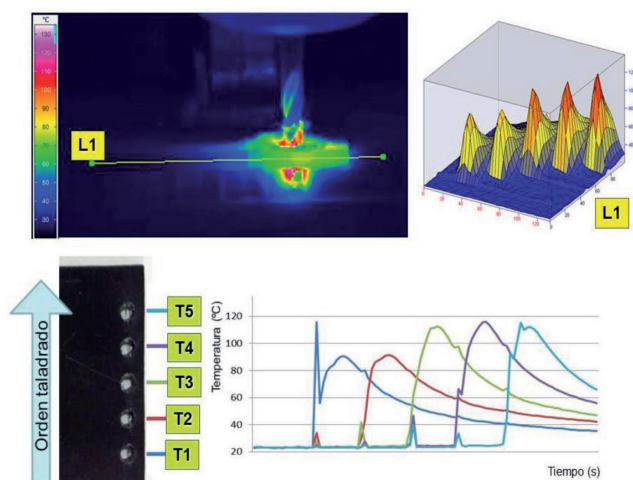


Fig.3: Estudio calentamiento fibra de carbono en taladrado

nemos las gráficas lineales inferiores donde se puede apreciar cómo la temperatura máxima alcanzada en cada uno de ellos se va incrementando a medida que realizamos los taladros. Se produce entonces un efecto acumulativo que incrementa sustancialmente la temperatura, hasta 20°C en la dirección y secuencia analizada, lo cual podría generar el indeseado daño térmico en este tipo de materiales, CFR. Esta información se puede emplear para definir el orden del taladrado, la distancia entre los mismos u optimizar las condiciones de mecanizado. Por último, puede ser empleado para controlar el error dimensional en la posición de los taladros inducido por la dilatación de la pieza.

4.2. ESTUDIO DE LA TEMPERATURA DE LA HERRAMIENTA EN FRESADO

La termografía tiene en el video de alta velocidad una técnica complementaria fundamental para la interpretación y análisis del proceso de corte. En este caso se trata de un proceso de fresado, buscando condiciones de corte ortogonal, de una pletina de 3 mm de espesor de acero 42CD4E con las condiciones de corte recomendadas por el fabricante de la herramienta [37]. En la Fig.4. se muestra una secuencia del mecanizado, con el detalle en tres instantes con sus termogramas correspondientes. En los fotogramas se pueden apreciar los diferentes elementos presentes, así como el movimiento lineal de la pieza (que se desplaza en función del avance de corte) y el giro de la herramienta (según la velocidad de corte programada), mientras la viruta se desprende a alta velocidad o queda soldada a la pieza. Como se ha comentado, la corrección de la emisividad en el tiempo resulta inviable, teniendo en cuenta la diversidad de materiales, que la cámara termográfica no se encuentra en la normal y que existen materiales con ciclos de calentamiento locales muy severos.

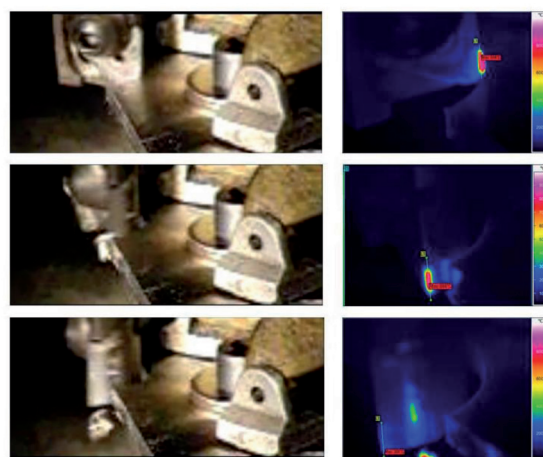


Fig.4: Detalle proceso de fresado video de alta velocidad y termografía de alta velocidad

Con las altas velocidades de muestreo podemos elegir diferentes instantes o centrar el análisis en la herramienta, en particular en la cara de incidencia y de desprendimiento. En el montaje y configuración de medida (Tabla I y Tabla II, Configuración_2.), en este caso se busca una mayor resolución espacial ($50\mu\text{m}$), por lo que se utiliza una lente complementaria de 500mm pudiendo situar la cámara termográfica a apenas 400mm de la zona de corte objeto de estudio.

En la Fig.5 centramos la atención en el instante de salida de la herramienta del material lo cual nos permite observar la cara de desprendimiento de la misma, que ha expulsado la viruta arrancada. La emisividad en esta superficie móvil se vería afectada tanto por la variación de la temperatura como por el avance del desgaste o la deposición de material en la propia superficie. El calentamiento es muy local, teniendo en cuenta que el material mecanizado tiene un espesor de 3mm para lo cual se puede emplear una línea de referencia como L1, apreciándose un gradiente de temperatura en torno a 700°C y una temperatura con un perfil uniforme sobre 840°C en la zona de contacto entre viruta y herramienta. No se podría descartar que en esa zona arrastráramos parte del material soldado en la superficie de la herramienta y debemos destacar que en esta disposición observamos la temperatura superficial tanto en las caras de incidencia como desprendimiento, a diferencia de la mayor parte de los resultados mostrados en la bibliografía en los que se estudian la temperatura y el flujo de calor en la cara normal a éstas.

4.3. ESTUDIO DE LA TEMPERATURA EN EL FRESADO DE HUESO

Por último, podemos centrarnos en el calentamiento de la herramienta y la aplicación al estudio del fresado óseo. Con una configuración de medida como la mostrada en las Tabla.I y Tabla.II (Configuración_3.), ha sido posible estudiar la temperatura de forma continua en el fresado de hueso, simulando una operación típica en implantología, aunque empleando hueso de vacuno. El análisis continuo introduce una limitación por la imposibilidad de emplear irrigación, frente al análisis puntual (por ejemplo en el instante de salida de la herramienta) en el que sí se podría mantener. De forma paralela se estudiaron otras variables como la fuerza axial, velocidades de

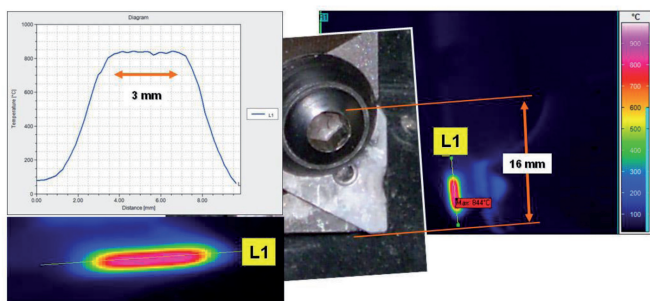


Fig.5: Detalle estudio termográfico en la cara de desprendimiento de la herramienta

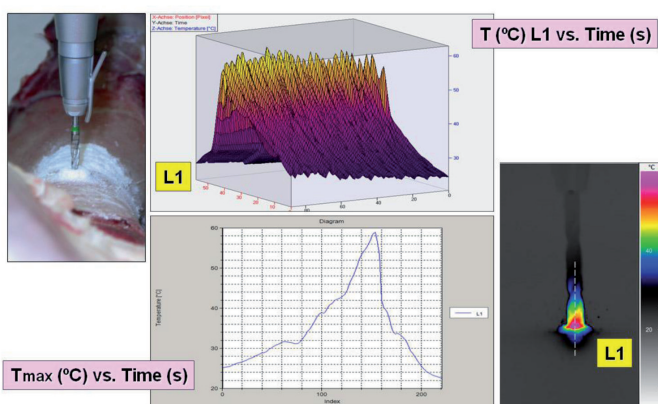


Fig.6: Detalle análisis termográfico aplicado al fresado de hueso

corte o la velocidad de avance relacionándose con la temperatura alcanzada. Se empleó un motor quirúrgico.

En la Fig.6. se puede apreciar una fotografía del ensayo junto al termograma obtenido en ese instante. En la gráfica podemos observar la temperatura máxima (T_{max}) alcanzada en el eje de la herramienta (L1) frente al tiempo, de manera que nos mantenemos en una línea normal a la cámara. Se observan temperaturas próximas a los 60°C; al ser el cuerpo de mayor temperatura es despreciable el efecto del reflejo de otros elementos. En el diagrama tipo *waterfall* se observa la temperatura en la misma línea L1 a lo largo de todo el ensayo, observándose que la mayor temperatura se localiza en la zona de contacto con el hueso y cómo se produce la conducción del calor a través de la fresa, cuya temperatura se va elevando con el tiempo.

5. CONCLUSIONES

La caracterización de la emisividad en la aplicación de la termografía IR en el análisis de procesos de fresado resulta de gran complejidad debido a la dinámica que presenta: materiales diferentes, elementos en movimiento y gradientes de temperatura. La emisividad de la superficie de la herramienta presenta ciclos térmicos en los que depende de la temperatura, cuyo incremento local puede dar origen a su vez a la oxidación o deposición de material. Debemos añadir el factor del desgaste que, fundamentalmente en calidades de herramienta con recubrimiento, supone la incorporación de un nuevo material. En estas condiciones, un esquema de corrección de la emisividad píxel a píxel sería el más adecuado buscando una incertidumbre de medida menor. Sin embargo su aplicación con garantías de éxito es muy baja para termogramas que incorporan elementos en movimiento.

En este caso la estandarización del procedimiento de medida va a ser la herramienta fundamental y el análisis relativo se hace posible sin necesidad de recurrir a postprocesados de la medida con un coste computacional elevado y unos resultados no garantizados. La repetibilidad y reproducibilidad del método serán un buen criterio de calidad. En las condiciones iniciales se puede ajustar/verificar la emisividad, empleando un tiempo de estabilización térmica suficiente en un ambiente de temperatura conocida y trazable. Esta técnica se emplea habitualmente en los laboratorios de calibración dimensional o de masa para controlar los posibles efectos de la dilatación.

La dificultad del control de los numerosos factores de influencia para una calibración absoluta de la medida y la estimación de la incertidumbre no invalida la aplicación de esta técnica. El análisis de la temperatura en las caras de incidencia o desprendimiento resulta viable y posibilita la comparación de procesos: optimización y mejora. El estudio de los efectos térmicos sobre la pieza de trabajo resulta inmediato y su aplicación al corte es fácilmente aplicable en nuevos materiales o aplicaciones biomédicas.

Hasta ahora se había considerado que los métodos de medida de temperatura por radiación, debido a la complejidad en su uso y el control de los parámetros que definen la medida, tenían restringida su aplicación fundamentalmente a ensayos en condiciones de laboratorio. Sin embargo, se ha podido comprobar cómo incluso en condiciones industriales es viable la incorporación de estos sistemas de alta velocidad, cuyo factor crítico puede ser el coste.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MILFELNER, M.; CUS, F.; BALIC, J. An Overview of Data Acquisition System for Cutting Force Measuring and Optimization in Milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 5/15,2005, vol. 164-165. pp. 1281-1288_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.146>.
- [2] CHILDS, Peter R.N. Practical Temperature Measurement. Oxford: Butterworth-Heinemann,2001. ISBN 978-0-75-065080-9.
- [3] NICHOLAS, J.V.; WHITE, D.R. Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration, 2nd Edn. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.2002. ISBN 0957-0233.
- [4] COATES, P.B. Multi-Wavelength Pyrometry.1981. ISBN 0026-1394.
- [5] DAVIES, M.A., et al. On the Measurement of Temperature in Material Removal Processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*,2007, vol. 56, no. 2. pp. 581-604_DOI: [10.1016/j.cirp.2007.10.009](http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.009).
- [6] Davies M.A, Yoon H, Schmitz T.L, Burns T J and Kennedy,M.D. Calibrated Thermal Microscopy of the Tool-Chip Interface in Machining, 2003. ISBN 1091-0344.
- [7] ARRAZOLA, P.J., et al. The Effect of Machinability on Thermal Fields in Orthogonal Cutting of AISI 4140 Steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*,2008, vol. 57, no. 1. pp. 65-68_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.139>.
- [8] ARRIOLA, I., et al. Relationship between Machinability Index and in-Process Parameters during Orthogonal Cutting of Steels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*,2011, vol. 60, no. 1. pp. 93-96_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.082>.
- [9] WEN, Chang-Da. Investigation of Steel Emissivity Behaviors: Examination of Multispectral Radiation Thermometry (MRT) Emissivity Models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 4,2010, vol. 53, no. 9-10. pp. 2035-2043_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.053>.
- [10] WEN, Chang-Da; CHAI, Tzung-Yuan. Experimental Investigation of Emissivity of Aluminum Alloys and Application of Multispectral Radiation Thermometry. *Applied Thermal Engineering*, 10,2011, vol. 31, no. 14-15. pp. 2414-2422_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.005>.
- [11] DEL-CAMPO, L.; PÉREZ-SÁEZ, R.B.; TELLO, M.J. Iron Oxidation Kinetics Study by using Infrared Spectral Emissivity Measurements Below 570 °C. *Corrosion Science*, 1,2008, vol. 50, no. 1. pp. 194-199_DOI: [10.1016/j.corsci.2007.05.029](http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.029).
- [12] DEL-CAMPO, L., et al. Kinetics Inversion in Isothermal Oxidation of Uncoated WC-Based Carbides between 450 and 800 °C. *Corrosion Science*, 4,2009, vol. 51, no. 4. pp. 707-712_DOI: [10.1016/j.corsci.2008.12.022](http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2008.12.022).
- [13] DUVAUT, Th. Comparison between Multiwavelength Infrared and Visible Pyrometry: Application to Metals. *Infrared Physics & Technology*, 3,2008, vol. 51, no. 4. pp. 292-299_DOI: [10.1016/j.infrared.2007.12.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2007.12.001).
- [14] PUJANA J., et al. Radiation Thermometry Applied to Temperature Measurement in the Cutting Process.2007. ISBN 0957-0233.
- [15] O'SULLIVAN, D.; COTTERELL, M. Temperature Measurement in Single Point Turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 12/3,2001, vol. 118, no. 1-3. pp. 301-308_DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00853-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00853-6).
- [16] STAGGS, J.E.J.; PHYLAKTU, H.N. The Effects of Emissivity on the Performance of Steel in Furnace Tests. *Fire Safety Journal*, 1,2008, vol. 43, no. 1. pp. 1-10_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.05.002>.
- [17] FILICE, L., et al. On the FE Codes Capability for Tool Temperature Calculation in Machining Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 5/25,2006, vol. 174, no. 1-3. pp. 286-292_DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2006.01.012](http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.01.012).
- [18] ABUKHSHIM, N.A.; MATIVENGA, P.T.; SHEIKH, M.A. Heat Generation and Temperature Prediction in Metal Cutting: A Review and Implications for High Speed Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 6,2006, vol. 46, no. 7-8. pp. 782-800_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.024>.
- [19] QI, H.S.; MILLS, B. Formation of a Transfer Layer at the Tool-Chip Interface during Machining. *Wear*, 10, 2000, vol. 245, no. 1-2. pp. 136-147_DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00474-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00474-9).
- [20] BAUER W., GRÄFEN W.; RINK M. Spectral Emissivities of Heat-Treated Steel Surfaces.2003.
- [21] BOOTHROYD, G. Photographic Technique for the Determination of Metal Cutting Temperatures.1961. ISBN 0508-3443.
- [22] M'SAOUBI, R.; and CHANDRASEKARAN, H. 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*, 2,2004, vol. 44, no. 2-3. pp. 213-224_DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2003.10.006](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.006).
- [23] DAVIES, M.A.; COOKE, A.L.; LARSEN, E.R. High Bandwidth Thermal Microscopy of Machining AISI 1045 Steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*,2005, vol. 54, no. 1. pp. 63-66_DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60050-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60050-X).
- [24] HIJAZI, A., et al. A Calibrated Dual-Wavelength Infrared Thermometry Approach with Non-Greybody Compensation for Machining Temperature Measurements. *Measurement Science and Technology*, 2001, vol. 22.
- [25] LIN J.; LIU, C.Y. Measurement of Cutting Tool Temperature by an Infrared Pyrometer.2001. ISBN 0957-0233.
- [26] MÜLLER, B.; RENZ, U. Development of a Fast Fiber-Optic Two-Color Pyrometer for the Temperature Measurement of Surfaces with Varying Emissivities.2001. ISBN 0034-6748.
- [27] NG D.; FRALICK, G. Use of a Multiwavelength Pyrometer in several Elevated Temperature Aerospace Applications.2001. ISBN 0034-6748.
- [28] PUJANA, J.; ARRAZOLA, P.J.; VILLAR, J.A. In-Process High-Speed Photography Applied to Orthogonal Turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 6/20,2008, vol. 202, no. 1-3. pp. 475-485_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.007>.
- [29] ARMENDIA, M., et al. High Bandwidth Temperature Measurement in Interrupted Cutting of Difficult to Machine Materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*,2010, vol. 59, no. 1. pp. 97-100_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.059>.
- [30] KOUNTANYA, Raja. Cutting Tool Temperatures in Interrupted cutting—The Effect of Feed-Direction Modulation. *Journal of Manufacturing Processes*, 7,2008, vol. 10, no. 2. pp. 47-55_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2009.04.001>.
- [31] TOH, C.K. Comparison of Chip Surface Temperature between Up and Down Milling Orientations in High Speed Rough Milling of Hardened Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 8/25,2005, vol. 167, no. 1. pp. 110-118_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.004>.
- [32] PITTALÀ, G.M.; MONNO, M. A New Approach to the Prediction of Temperature of the Workpiece of Face Milling Operations of Ti-6Al-4V. *Applied Thermal Engineering*, 2,2011, vol. 31, no. 2-3. pp. 173-180_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.08.027>.
- [33] WISSMILLER, D.L.; PFEFFERKORN, F.E. Micro End Mill Tool Temperature Measurement and Prediction. *Journal of Manufacturing Processes*, 1,2009, vol. 11, no. 1. pp. 45-53_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2009.06.001>.
- [34] SUGITA, N.; OSA, T.; MITSUISHI, M. Analysis and Estimation of Cutting-Temperature Distribution during End Milling in Relation to Orthopedic Surgery. *Medical Engineering & Physics*, 1,2009, vol. 31, no. 1. pp. 101-107_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.05.001>.
- [35] SORIANO, J., et al. Effects of Rotational Speed, Feed Rate and Tool Type on Temperatures and Cutting Forces when Drilling Bovine Cortical Bone. *Machining Science and Technology*, 10/02,2013, vol. 17, no. 4. pp. 611-636_DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2013.837353>.
- [36] SORIANO, J., et al. A New Surgical Drill Bit Concept for Bone Drilling Operations. *Materials and Manufacturing Processes*, 10/03,2013, vol. 28, no. 10. pp. 1065-1070_DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2013.811745>.
- [37] SAN-JUAN, M.; MARTÍN, O.; SANTOS, F.J. Experimental Study of Friction from Cutting Forces in Orthogonal Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 7,2010, vol. 50, no. 7. pp. 591-600_DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.03.013>.