

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Influencia de los parámetros de corte en la generación de calor en procesos de torneado

Autor: Ana Cabrera Ramírez de Arellano

Tutor: Aida Estévez Urra

Dpto. Ingeniería mecánica y fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Influencia de los parámetros de corte en la generación de calor en procesos de torneado

Autor:

Ana Cabrera Ramírez de Arellano

Tutor:

Aida Estévez Urra

Profesor colaborador

Dpto. de Ingeniería mecánica y fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Influencia de los parámetros de corte en la generación de calor en procesos de torneado

Autor: Ana Cabrera Ramírez de Arellano

Tutor: Aida Estévez Urra

El tribunal nombrado para juzgar el TFG arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis profesores

A los maestros del taller

En este trabajo se ha analizado la temperatura alcanzada en probetas de acero al ser mecanizadas mediante torneado, variando distintos parámetros de corte (avance, profundidad de pasada, velocidad de corte). Se han tomado imágenes térmicas con una cámara termográfica y posteriormente se han procesado con un software que incluía, para determinar la temperatura máxima tanto en la pieza como en la interfaz herramienta-pieza. La ventaja de usar termografía para medir temperatura frente a otras técnicas, como puede ser el uso de termopares, es que permite trabajar de manera rápida y es una técnica no destructiva. La variación de la temperatura en función de los distintos parámetros estudiados se ha representado en distintas gráficas y, a partir de estas figuras, se han analizado los resultados. También se ha medido la rugosidad superficial de las piezas con el objetivo de ver como afecta la temperatura alcanzada al acabado tras el mecanizado.

Resumen	ix
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Tareas a desarrollar	1
2 Generación de calor en procesos de mecanizado	3
2.1 Introducción	3
2.2 Zonas de generación de calor	3
2.3 Ecuaciones que determinan el intercambio de calor	4
2.3.1 Generación de calor en términos de fricción	4
2.3.2 Temperatura máxima	5
2.3.3 Cálculo de la temperatura de corte. El método de Cook.	7
2.3.4 Medición de la temperatura de corte	7
2.4 Parámetros que influyen en la temperatura	9
2.4.1 Propiedades de los materiales	9
2.4.2 Variables de corte	11
2.4.3 Material de la herramienta de corte	12
2.4.4 Fluido de corte	13
3 Medición de temperatura mediante termografía	15
3.1 Introducción	15
3.2 Procedimientos termográficos	15
3.3 Principios físicos	16
3.3.1 Región infrarroja	16
3.3.2 Emisividad	17
3.3.3 Parámetros que afectan a la emisividad	18
3.3.4 Interpretación de la imagen térmica	19
3.3.5 Determinación de la emisividad de una muestra	20
3.4 Cámara termográfica	21
4 Parte experimental	23
4.1 Material y máquina herramienta	23
4.2 Ensayos realizados	24
4.3 Medición de la temperatura	27
4.4 Medición de rugosidad superficial	30

5	Análisis de resultados	33
5.1	Análisis de las medidas de temperatura	33
5.1.1	Variación de la temperatura modificando la profundidad de pasada	34
5.1.2	Variación de la temperatura modificando el avance	37
5.1.3	Temperatura máxima en la viruta	39
5.2	Análisis de las medidas de rugosidad Ra	40
6	Conclusiones	49
	Referencias	51
A.	Anexo A: imágenes térmicas del ensayo 1	53
B.	Anexo B: Imágenes térmicas del ensayo 2	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Algunas características de los detectores cuánticos y térmicos (Cañada Soriano, 2016)	21
Tabla 4.1 Parámetros de corte del torno	24
Tabla 4.2 Plaquita WNMG080408 y parámetros de corte recomendados	24
Tabla 4.3 Variables experimentales del ensayo 1	25
Tabla 4.4 Variables experimentales del ensayo 2	26
Tabla 4.5 Especificaciones técnicas rugosímetro M1	30
Tabla 5.1 Temperatura máxima alcanzada en el ensayo 1	33
Tabla 5.2 Temperatura máxima alcanzada en el ensayo 2	34
Tabla 5.3 Temperatura alcanzada en la interfaz herramienta-pieza con $f=0,047$ mm/rev	40
Tabla 5.4 Valores de rugosidad en el ensayo 1	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Principales zonas de generación de calor en el corte de metales. (Freites & Pérez, 2016)	4
Figura 2.2 Valor de Γ en función de $R \cdot \tan\phi$ (Boothroyd, 1978)	6
Figura 2.3 Efecto de la zona de deformación secundaria sobre la temperatura de la viruta (Boothroyd, 1978)	7
Figura 2.4 Temperaturas en función de la velocidad de corte para tres materiales de trabajo (Groover, 2007)	8
Figura 2.5 Variación de la temperatura para distintos avances en la interfaz herramienta-pieza	9
Figura 2.6 Efecto de la temperatura sobre la resistencia y la ductilidad (Groover, 2007)	10
Figura 2.7 Dureza en caliente en función de la temperatura (Groover, 2007)	10
Figura 2.8 Distribución de la energía total de corte entre la herramienta, la viruta y la pieza de trabajo en función de la velocidad de corte (Schmidt & Roubik, 1949)	11
Figura 2.9 Relaciones típicas de dureza en caliente para materiales de herramienta seleccionados (Groover, 2007)	13
Figura 3.1 Clasificación de las ondas electromagnéticas en función de su longitud de onda	17
Figura 3.2 Magnitud de la radiación percibida por una cámara de onda corta variando las condiciones del medio. 1: temperatura del objeto; 2: Emitancia (Cañada Soriano, 2016)	19
Figura 3.3 Magnitud de la radiación percibida por una cámara de onda larga variando las condiciones del medio. 1: temperatura del objeto; 2: Emitancia (Cañada Soriano, 2016)	19
Figura 4.1 Barras de acero F-1252 empleadas en los ensayos	23
Figura 4.2 Torno L-1/165	23
Figura 4.3 Probetas mecanizadas e identificadas	25
Figura 4.4 Cámara termográfica FLIR-E49001	27
Figura 4.5 Parámetros de la cámara termográfica	27
Figura 4.6 Rango de temperatura de las medidas	27
Figura 4.7 Datos de la cámara termográfica	28
Figura 4.8 Posición de la cámara durante la toma de datos	28
Figura 4.9 Captura de video	29
Figura 4.10 Fotografía térmica y temperaturas en distintos puntos	29
Figura 4.11 Medición de la rugosidad	30
Figura 4.12 Huella por cambio de avance	30
Figura 5.1 Variación de la temperatura para distintos avances con profundidad de pasada 0,5 mm	35
Figura 5.2 Variación de la temperatura para distintos avances con profundidad de pasada 1 mm	35
Figura 5.3 Variación de la temperatura para distintos avances con profundidad de pasada 1,5 mm	36

Figura 5.4 Temperatura máxima alcanzada en función de la velocidad de corte	37
Figura 5.5 Variación de la temperatura para distintas profundidades de pasada con avance de 0,047 mm/rev	38
Figura 5.6 Variación de la temperatura para distintas profundidades de pasada con avance de 0,12 mm/rev	38
Figura 5.7 Variación de la temperatura para distintas profundidades de pasada con avance de 0,66 mm/rev	39
Figura 5.8 Temperatura en la interfaz pieza-herramienta para distintas	40
Figura 5.9 Rugosidad y temperatura para avance 0,047 mm/rev	42
Figura 5.10 Rugosidad y temperatura para avance 0,12 mm/rev	43
Figura 5.11 Rugosidad y temperatura para avance 0,66 mm/rev	44
Figura 5.12 Rugosidad y temperatura para profundidad 0,5 mm	45
Figura 5.13 Rugosidad y temperatura para profundidad 1 mm	46
Figura 5.14 Rugosidad y temperatura para profundidad 1,5 mm	47
Figura A.1 Imagen térmica del ensayo 1.1	53
Figura A.2 Imagen térmica del ensayo 1.2	53
Figura A.3 Imagen térmica del ensayo 1.3	54
Figura A.4 Imagen térmica del ensayo 1.4	54
Figura A.5 Imagen térmica del ensayo 1.5	54
Figura A.6 Imagen térmica del ensayo 1.6	55
Figura A.7 Imagen térmica del ensayo 1.7	55
Figura A.8 Imagen térmica del ensayo 1.8	55
Figura A.9 Imagen térmica del ensayo 1.9	56
Figura A.10 Imagen térmica del ensayo 1.10	56
Figura A.11 Imagen térmica del ensayo 1.11	56
Figura A.12 Imagen térmica del ensayo 1.12	57
Figura A.13 Imagen térmica del ensayo 1.13	57
Figura A.14 Imagen térmica del ensayo 1.14	57
Figura A.15 Imagen térmica del ensayo 1.15	58
Figura A.16 Imagen térmica del ensayo 1.16	58
Figura A.17 Imagen térmica del ensayo 1.17	58
Figura A.18 Imagen térmica del ensayo 1.18	59
Figura A.19 Imagen térmica del ensayo 1.19	59
Figura A.20 Imagen térmica del ensayo 1.20	59
Figura A.21 Imagen térmica del ensayo 1.21	60

Figura A.22 Imagen térmica del ensayo 1.22	60
Figura A.23 Imagen térmica del ensayo 1.23	60
Figura A.24 Imagen térmica del ensayo 1.24	61
Figura A.25 Imagen térmica del ensayo 1.25	61
Figura A.26 Imagen térmica del ensayo 1.26	61
Figura A.27 Imagen térmica del ensayo 1.27	62
Figura B.1 Imagen térmica del ensayo 2.1	63
Figura B.2 Imagen térmica del ensayo 2.2	63
Figura B.3 Imagen térmica del ensayo 2.3	64
Figura B.4 Imagen térmica del ensayo 2.4	64
Figura B.5 Imagen térmica del ensayo 2.5	64
Figura B.6 Imagen térmica del ensayo 2.6	65
Figura B.7 Imagen térmica del ensayo 2.7	65
Figura B.8 Imagen térmica del ensayo 2.8	65
Figura B.9 Imagen térmica del ensayo 2.9	66
Figura B.10 Imagen térmica del ensayo 2.10	66
Figura B.11 Imagen térmica del ensayo 2.11	66
Figura B.12 Imagen térmica del ensayo 2.12	67
Figura B.13 Imagen térmica del ensayo 2.13	67
Figura B.14 Imagen térmica del ensayo 2.14	67
Figura B.15 Imagen térmica del ensayo 2.15	68
Figura B.16 Imagen térmica del ensayo 2.16	68
Figura B.17 Imagen térmica del ensayo 2.17	68
Figura B.18 Imagen térmica del ensayo 2.18	69
Figura B.19 Imagen térmica del ensayo 2.19	69
Figura B.20 Imagen térmica del ensayo 2.20	69
Figura B.21 Imagen térmica del ensayo 2.21	70
Figura B.22 Imagen térmica del ensayo 2.22	70
Figura B.23 Imagen térmica del ensayo 2.23	70
Figura B.24 Imagen térmica del ensayo 2.24	71

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Durante el mecanizado se genera calor por fricción tanto en la herramienta como en la pieza mecanizada. La temperatura que se alcanza en la interfase herramienta-viruta tiene repercusiones en estos dos elementos, influyendo en la vida de la herramienta, cambios en las propiedades del metal en la zona de corte, tratamientos térmicos locales no deseados, deformaciones que afectan directamente a las tolerancias de acabado, etc.

La no consecución de las tolerancias deseadas en una pieza lleva a tener que repetir el mecanizado cuando no a rechazar la pieza y fabricar otra nueva, lo que supone un incremento en los costes del sistema de producción.

Existen distintos autores que han analizado mediante métodos numéricos la generación de calor en los procesos de corte. El método de Cook calcula el aumento de temperatura medio en la interfase herramienta-viruta. Trigger (Trigger, Chao, & American Society of Mechanical Engineers, 1950) determinó experimentalmente la relación entre parámetros de corte y temperatura en función de las condiciones de corte y el material. Además, diversos estudios se han realizado en distintos procesos de mecanizado y materiales como, por ejemplo:

- (Soriano, Garay, Aristimuño, & Iriarte, 2013) analiza el efecto de los parámetros de corte sobre la temperatura al taladrar hueso cortical bovino.
- (Aguiar Vieira, Monteiro Baptista, & Lages, 2009) hace un estudio de los efectos térmicos del rectificado en distintos materiales metálicos.
- (San Juan, Martín, Santos, & Cabezudo, 2012) evalúa los daños y la temperatura producidos por taladrado en fibra de carbono.
- (Angelone, Caggiano, Improta, & Nele, 2018) determina la calidad superficial de agujeros usando termografía.
- (Morán González, 2000) mide por distintos medios la temperatura que se genera en una pieza de acero durante una operación de mandrinado.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio experimental sobre las temperaturas máximas que se alcanzan durante el torneado y la influencia que los parámetros de corte tienen sobre la misma. Además, se comprobará la distribución de temperatura entre pieza, viruta y herramienta en función de los parámetros de corte elegidos.

1.3 Tareas a desarrollar

Para lograr estos objetivos se ha realizado una intensa búsqueda bibliográfica sobre trabajos relacionados con el estudio del calor generado en procesos de mecanizado y el uso de la termografía en ellos. Los trabajos consultados van desde libros y manuales a artículos de revistas, publicaciones web, trabajos de investigación, tesis doctorales y otros trabajos de investigación universitarios.

Se han realizado dos grupos de ensayos sobre barras de acero. En el primer grupo de ensayos se han variado

avance, profundidad de pasada y velocidad de giro, manteniendo constantes el resto de los parámetros para poder compararlos entre ellos. En el segundo grupo de ensayos se ha mantenido constante la velocidad de giro y la profundidad de pasada para evaluar en función de la velocidad de corte y el avance la temperatura máxima generada. Además, las fotografías térmicas tomadas permiten ver la distribución de temperatura entre los distintos elementos del proceso de mecanizado.

A partir de los ensayos realizados se han registrado valores de temperatura máxima, para lo que se ha utilizado una cámara termográfica junto a un software que permite estudiar las imágenes térmicas, distribución de temperatura y rugosidad de la pieza.

2 GENERACIÓN DE CALOR EN PROCESOS DE MECANIZADO

2.1 Introducción

Los procesos de mecanizado se emplean para mejorar las distintas propiedades de las piezas que se trabajan, pero un mecanizado inadecuado puede llegar a provocar daño superficial. Durante el proceso de corte, la carga y la velocidad sobre la fricción y el desgaste, son frecuentemente manifestaciones del aumento de temperatura. Alrededor de un 98 % (Marinesco, Rowe, Dimitrov, & Inasaki, 2004) de la energía consumida en el corte se transmite en forma de calor, sin embargo, también existen pérdidas de energía durante la deformación elástica. La generación de calor puede hacer que las temperaturas en las superficies de corte sean muy altas, provocando fenómenos como:

- Difusión y aumento del tamaño del grano.
- Transformaciones de fase y, consecuentemente, endurecimiento.
- Expansión o contracción del material, agrietamiento y tensiones residuales.
- Reacciones químicas que da paso a oxidación.

Además, reducen la vida útil de la herramienta y la viruta caliente puede suponer un riesgo para el operador de la herramienta.

Es importante hacer notar el efecto de la temperatura sobre la pieza a mecanizar o cortar. Considerando que casi todo el trabajo que se consume en el mecanizado es convertido en calor, se pueden dar temperaturas muy altas en la interfase herramienta-viruta. La temperatura que se alcanza en esta interfase durante el mecanizado por arranque de viruta tiene diferentes repercusiones en los elementos que participan en el proceso, influyendo tanto en la vida de la herramienta como en la pieza, produciendo cambios en las propiedades del metal como los ya mencionados, que afectan directamente al acabado superficial y a las tolerancias dimensionales y geométricas.

En este capítulo se van a describir las zonas, ecuaciones y parámetros que afectan a la generación de calor durante el mecanizado.

2.2 Zonas de generación de calor

Se distinguen tres zonas de generación de calor en el corte de metales, como se muestra en la figura 2.1.

El calor se genera en la zona de cizalladura o zona primaria de deformación a causa del trabajo plástico realizado en el plano pieza-viruta. El calentamiento local en esta zona resulta en temperaturas altas, así como ablandamiento del material grandes deformaciones.

El calor que se genera en la zona de fricción o zona secundaria de deformación es causado por la deformación de la viruta y la fricción de deslizamiento entre la herramienta y la viruta.

El calor que se genera en la zona terciaria de deformación, en la interfase herramienta-pieza de trabajo, es a causa del trabajo producido para vencer la fricción, la cual ocurre entre la herramienta y la superficie

maquinada de la pieza de trabajo. Sin embargo, a menos que la herramienta esté desgastada severamente, esta fuente de calor será pequeña.

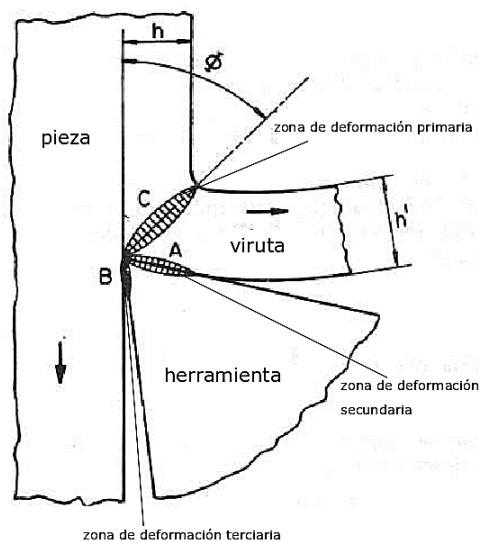


Figura 2.1 Principales zonas de generación de calor en el corte de metales. (Freites & Pérez, 2016)

2.3 Ecuaciones que determinan el intercambio de calor

2.3.1 Generación de calor en términos de fricción

Las ecuaciones termodinámicas para las operaciones de corte de metales determinan la relación entre la temperatura y la velocidad de corte en función de unos parámetros que dependen de las condiciones de corte del material de trabajo. (Freites & Pérez, 2016)

La energía consumida durante el corte de metales se expresa según la ecuación (2.1).

$$P = F_t \cdot v_c \quad (2.1)$$

F_t – Fuerza cortante en N

v_c – Velocidad de corte en mm/min

Considerando que todo el trabajo que se realiza durante el corte es convertido a calor, se obtiene la expresión 2.2.

$$Q = P = F_t \cdot v_c \quad (2.2)$$

La máxima cantidad de trabajo que se obtiene de un sistema durante un cambio sea de composición o de estado, ocurre si el cambio es reversible. Para que el sistema pueda lograr el equilibrio con el medio circundante durante dicho cambio, la energía interna del sistema debe cambiar, intercambiar calor y desarrollar trabajo, estos cambios cumplen con la primera ley de la termodinámica, dada por la ecuación 2.3:

$$\dot{Q} - \dot{W} = 0 \quad (2.3)$$

Donde Q es el calor que fluye en la interfaz de la herramienta y la pieza de trabajo por unidad de tiempo, y W es el trabajo que se realiza contra las fuerzas de fricción en la interfaz de la herramienta y la pieza por unidad de tiempo.

Se utiliza la ecuación 2.4 para dar el trabajo realizado por fricción:

$$\dot{W} = \mu \cdot N \cdot v_c \quad (2.4)$$

Sustituyendo las expresiones 2.4 y 2.3, se obtiene la ecuación 2.5 que expresa la generación de calor en términos de la fricción:

$$\dot{Q} = \mu \cdot N \cdot v_c \quad (2.5)$$

Siendo la velocidad de corte la dada por la expresión 2.6:

$$v_c = \frac{N \cdot \pi \cdot D}{1000} \quad (2.6)$$

2.3.2 Temperatura máxima

La temperatura máxima alcanzada se da cuando el material abandona la zona de deformación secundaria. Viene dada por la ecuación 2.7:

$$\theta_{\max} = \theta_s + \theta_m + \theta_0 \quad (2.7)$$

θ_s – Aumento en la temperatura del material que pasa por la zona de deformación primaria.

θ_m – Aumento en la temperatura del material que pasa por la zona de deformación secundaria.

θ_0 – Temperatura inicial (temperatura ambiente).

El aumento promedio de la temperatura del material que pasa por la zona de deformación primaria, θ_s , está dado por la ecuación 2.8:

$$\theta_s = \frac{(1 - \Gamma) \cdot P_s}{\rho \cdot C \cdot v_c \cdot a_c \cdot a_w} \quad (2.8)$$

P_s – Calor generado por unidad de tiempo en la zona de deformación primaria (cizalladura).

a_w – Ancho de la viruta.

C – Calor específico del material.

a_c – Espesor de viruta no deformado.

ρ – Densidad del material.

Γ es la fracción del calor generado en el plano de cizalladura conducido hacia la pieza, puede definirse por la ecuación 2.9:

$$\Gamma = \frac{P}{P_s} \quad (2.9)$$

Weiner y Rapier (Boothroyd, 1978) realizaron análisis teóricos de la temperatura en la pieza y en la zona de cizalladura. Supusieron que la zona de deformación primaria podía ser considerada como una fuente de calor plana de potencia uniforme, que no existían pérdidas de calor entre las superficies libres de viruta y pieza y que las propiedades térmicas del material eran constantes e independientes de la temperatura. Weiner

supuso además que no se conducía calor hacia el material en la dirección de su movimiento. Esta suposición fue clave para poder establecer una ecuación de Γ en función de $R \cdot \tan \phi$, donde R se denomina número térmico y ϕ es el ángulo de cizalladura, que puede verse en la figura 2.1.

El valor de R puede determinarse a partir de la ecuación 2.10:

$$R = \frac{\rho \cdot C \cdot v_c \cdot a_c}{K} \quad (2.10)$$

K – Conductividad térmica del material.

La figura 2.2 representa el valor de Γ en función de $R \cdot \tan \phi$.

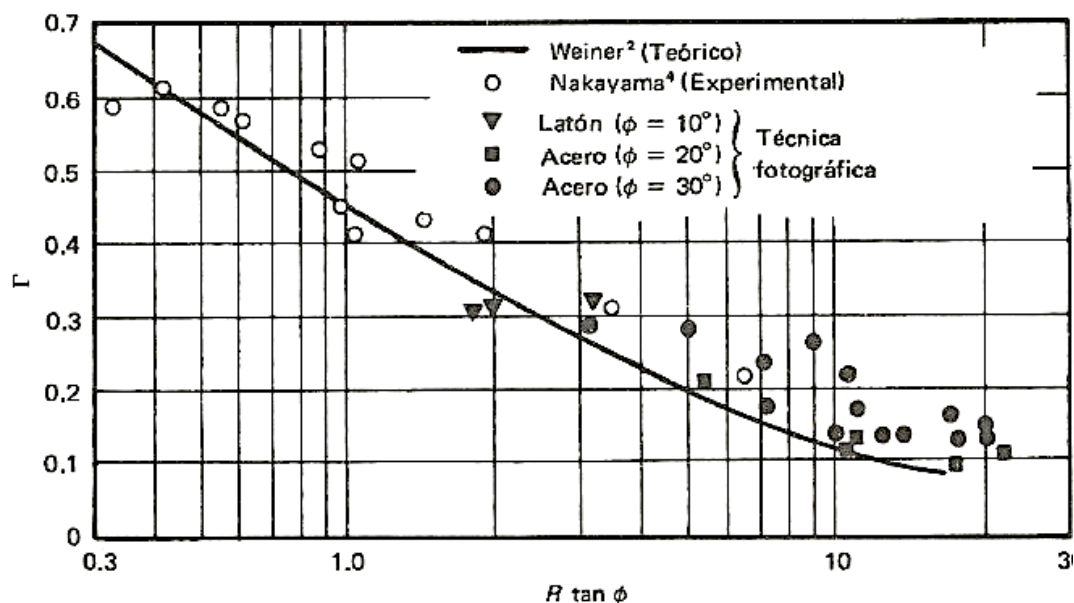


Figura 2.2 Valor de Γ en función de $R \cdot \tan \phi$ (Boothroyd, 1978)

Rapier (Boothroyd, 1978) supuso que la fuente de calor resultante de la fricción entre la viruta y la herramienta era una fuente plana de potencia constante, lo que le permitió obtener la expresión 2.11:

$$\frac{\theta_m}{\theta_f} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{R}{l_0}} \quad (2.11)$$

l_0 – Longitud de la fuente de calor dividido entre el espesor de la viruta.

El aumento promedio en la temperatura de la viruta resultante de la zona de deformación secundaria está dado por la ecuación 2.12:

$$\theta_f = \frac{P_f}{\rho \cdot C \cdot v_c \cdot a_c \cdot a_w} \quad (2.12)$$

P_f – Calor generado por unidad de tiempo en la zona de deformación secundaria (fricción).

En la figura 2.3 se representan resultados experimentales del efecto del ancho de deformación secundaria sobre las temperaturas de la viruta, donde $l_0 \cdot a_0$ es la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta, $w_0 \cdot a_0$ es el ancho de la zona de deformación secundaria.

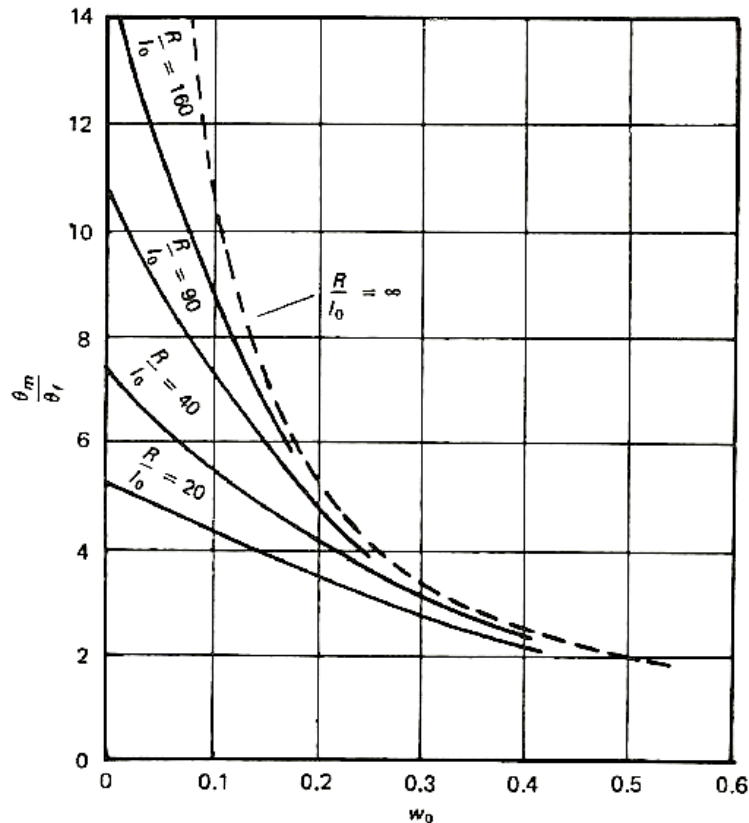


Figura 2.3 Efecto de la zona de deformación secundaria sobre la temperatura de la viruta (Boothroyd, 1978)

2.3.3 Cálculo de la temperatura de corte. El método de Cook.

Este método se deduce de un análisis dimensional (Groover, 2007), usando datos experimentales para varios materiales de trabajo a fin de establecer los valores de los parámetros de la ecuación resultante. La ecuación 2.13 determina el incremento de temperatura en la interfaz herramienta-viruta durante el mecanizado:

$$\Delta T = \frac{0.4 \cdot U}{\rho C} \cdot \left(\frac{v \cdot t_0}{K} \right)^{0.333} \quad (2.13)$$

ΔT - aumento de la temperatura media en la interfaz herramienta-viruta [$^{\circ}\text{C}$]

U - energía específica en la operación [$\text{N}\cdot\text{m}/\text{mm}^3$]

v - velocidad de corte [m/s]

t_0 - espesor de la viruta antes del corte [m]

ρC - calor específico volumétrico del material de trabajo [$\text{J}/\text{mm}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$]

K - difusividad térmica del material de trabajo [m^2/s]

2.3.4 Medición de la temperatura de corte

Existen distintos métodos experimentales para la medición de temperaturas en mecanizado. La técnica de medición más usada es el termopar herramienta-viruta. Este termopar toma la herramienta y la viruta como

dos metales diferentes que forman una junta de termopar. Al conectar los terminales eléctricos a la herramienta y a la pieza de trabajo, que a su vez está conectada a la viruta, se puede monitorear la diferencia de potencial generado por la interfaz herramienta-viruta durante el corte mediante un potenciómetro registrador u otro dispositivo de adquisición de datos apropiado. La salida de voltaje resultante del termopar herramienta-viruta, medido en mV, se puede convertir al valor de temperatura correspondiente mediante ecuaciones de calibración para la combinación particular herramienta-trabajo. La fórmula 2.14 relaciona la velocidad de corte con la temperatura medida en la interfaz herramienta-viruta (Freites & Pérez, 2016):

$$T = K \cdot v^m \quad (2.14)$$

T - temperatura medida en la interfaz herramienta-viruta.

v - velocidad de corte.

Los parámetros K y m dependen de las condiciones de corte, como puede ser la velocidad de avance, y del material de trabajo.

En la figura 2.4 se muestran las gráficas de la temperatura de corte medidas experimentalmente en función de la velocidad de corte para varios materiales de trabajo, con ecuaciones similares a la ecuación 2.14 determinadas para cada material. Existe una relación similar entre la temperatura de corte y el avance; sin embargo, el efecto del avance sobre la temperatura no es tan fuerte como la velocidad de corte. Los resultados empíricos tienden a apoyar la validez general de la ecuación de Cook, ecuación 2.14.

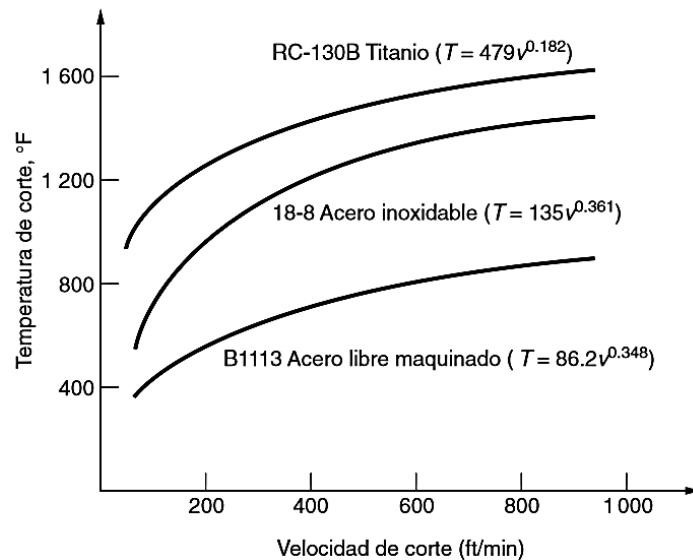


Figura 2.4 Temperaturas en función de la velocidad de corte para tres materiales de trabajo (Groover, 2007)

La figura 2.5 muestra una relación entre la velocidad de corte y la temperatura alcanzada en la interfaz de la herramienta-pieza. Los valores se han obtenido mediante una simulación.

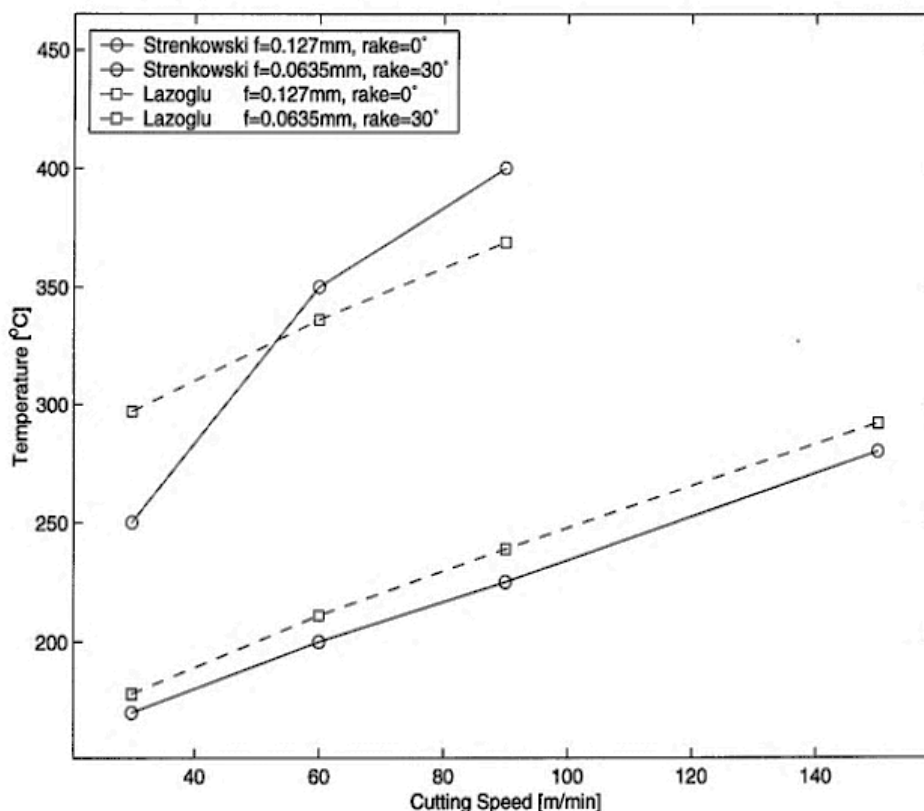


Figura 2.5 Variación de la temperatura para distintos avances en la interfaz herramienta-pieza

(Uzorh Augustine & Nwifo Olisaemeka, 2013)

2.4 Parámetros que influyen en la temperatura

2.4.1 Propiedades de los materiales

La temperatura tiene un efecto significativo sobre casi todas las propiedades de un material. Es importante conocer las propiedades del material a las temperaturas de operación del producto cuando está en uso. También es importante saber cómo afecta la temperatura las propiedades mecánicas en la manufactura.

A continuación, se describen distintas propiedades de los materiales y como les afecta la variación de temperatura (Groover, 2007).

– Ductilidad

A temperaturas elevadas, los materiales resisten menos y aumenta su ductilidad, es decir, pueden conformarse más fácilmente con el incremento de la temperatura. En la figura 2.6 se muestra el efecto de la temperatura sobre la resistencia y la ductilidad.

– Dureza en caliente

La dureza en caliente es la capacidad de un material para mantener su dureza a temperaturas elevadas. La figura 2.7 representa la dureza en caliente como una función de la temperatura en distintos materiales.

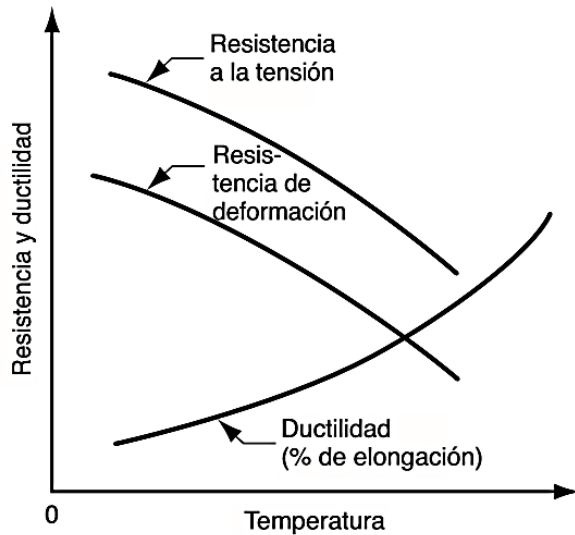


Figura 2.6 Efecto de la temperatura sobre la resistencia y la ductilidad (Groover, 2007)

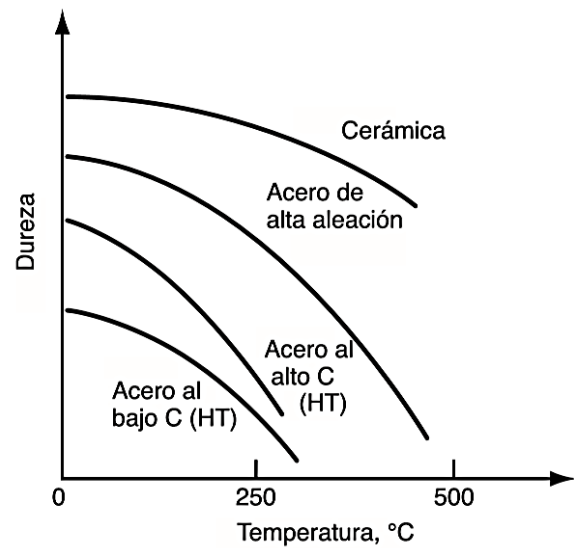


Figura 2.7 Dureza en caliente en función de la temperatura (Groover, 2007)

– Temperatura de recristalización

A medida que un material se deforma, aumenta su resistencia debido al endurecimiento por deformación. Sin embargo, si el material se calienta a temperatura elevada, se deformará sin darse endurecimiento por deformación, en su lugar se formarán granos libres de deformaciones, y el metal se comportará como un material plástico. La formación de nuevos granos libres de deformación se denomina recristalización, y la temperatura a la que esto ocurre es aproximadamente la mitad de la temperatura de fusión del metal, denominada temperatura de recristalización.

– Densidad

Generalmente, a medida que aumenta la temperatura disminuye la densidad.

– Capacidad térmica

Se define como la cantidad de energía necesaria para incrementar la temperatura de una unidad de masa del material un grado.

– Conductividad térmica

La conducción es la capacidad de una sustancia de transferir calor a través de ella misma por movimientos térmicos y sin transferencia de masa. Sirve para disipar el calor en los procesos de mecanizado, en algunos tales como torneado, es deseable que la capacidad, tanto del material como de la herramienta, para conducir el calor fuera de la fuente donde se genera es muy deseable.

– Rugosidad de la superficie: se define como el promedio de las desviaciones verticales a partir de la superficie nominal, en una longitud especificada de la superficie (Groover, 2007). Se puede aproximar mediante la ecuación 2.15.

$$Ra = \frac{f^2}{32 \cdot r} \quad (2.15)$$

f – avance [mm/rev]

r – radio de la herramienta

2.4.2 Variables de corte

Hay que considerar la importancia que tienen las variables de corte durante cualquier proceso de mecanizado, ya que estas influyen directamente en la calidad de la pieza que se obtiene (Groover, 2007).

Si el ángulo de desprendimiento es grande, las fuerzas de corte disminuyen, pues el material se deforma menos plásticamente y la herramienta se desgasta mucho en la cara de desprendimiento, al aumentar la fuerza de fricción y la velocidad relativa de la viruta sobre la cara de la herramienta.

Si el ángulo de incidencia es grande, la herramienta puede fracturar su punta debido a las altas fuerzas de corte. Cuanto más pequeño sea, mayor desgaste sufrirá la punta, aumentando las pérdidas por rozamiento de la herramienta con la superficie de la pieza.

El ángulo de inclinación de filo influye en la dirección de la viruta en su salida por la cara de desprendimiento. Toma valores positivos cuando echa la viruta fuera de la pieza y toma valores negativos cuando tiende a hacer chocar la viruta de nuevo con la pieza. Cuando se mecanizan materiales duros y frágiles se usan valores de ángulos de inclinación < 0 . Un ángulo de posición de filo distinto de 90° permite un mejor aprovechamiento de la longitud de filo, sobre todo cuando se tiene limitada la profundidad de pasada. También se usa para evitar fuerzas de impacto al inicio del corte, suavizando la entrada de la herramienta en el corte.

La velocidad de corte es el factor principal que determina la duración de la herramienta. Una alta velocidad de corte permite realizar el mecanizado en menos tiempo, pero acelera el desgaste de la herramienta. Los fabricantes de herramientas y proutuarios de mecanizado ofrecen datos orientativos sobre la velocidad de corte adecuada de las herramientas para una duración determinada de la herramienta. En ocasiones, es deseable ajustar la velocidad de corte para una duración diferente de la herramienta, para lo cual, los valores de la velocidad de corte se multiplican por un factor de corrección. La relación entre este factor de corrección y la duración de la herramienta en operación de corte no es lineal. Además, la velocidad de corte no solo influye en los valores máximos de temperatura que se alcanzan, sino en como esta se distribuye entre los distintos elementos (figura 2.8).

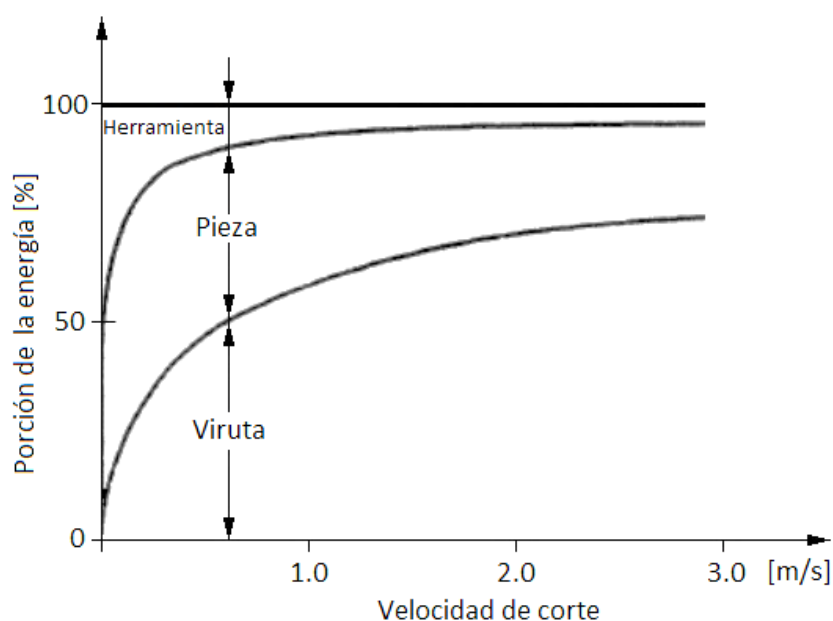


Figura 2.8 Distribución de la energía total de corte entre la herramienta, la viruta y la pieza de trabajo en función de la velocidad de corte (Schmidt & Roubik, 1949)

El avance o velocidad de avance es un factor muy importante en el torneado. Es la velocidad relativa entre la

pieza y la herramienta, es decir, la velocidad con la que progresa el corte. Cada herramienta puede cortar adecuadamente en un rango de velocidades de avance por cada revolución de la pieza, denominado avance por revolución. Este rango depende fundamentalmente del diámetro de la pieza, de la profundidad de pasada, y de la calidad de la herramienta. Este rango de velocidades se determina experimentalmente y se encuentra en los catálogos de los fabricantes de herramientas. Además, esta velocidad está limitada por las rigideces de las sujeciones de la pieza y de la herramienta y por la potencia del motor de avance de la máquina. El grosor máximo de viruta en mm es el indicador de limitación más importante para una herramienta. El filo de corte de las herramientas se prueba para que tenga un valor determinado entre un mínimo y un máximo de grosor de la viruta. La velocidad de avance es el producto del avance por revolución por la velocidad de rotación de la pieza.

2.4.3 Material de la herramienta de corte

Es importante utilizar una herramienta adecuada en función de las condiciones de corte en las que se va a llevar a cabo el trabajo y del acabado que se quiere conseguir (Freites & Pérez, 2016).

Los aceros no aleados son buenos para trabajos que no requieran de mucha precisión, ya que el filo de la herramienta es muy importante para la calidad superficial de la pieza, y estos materiales muestran una rápida pérdida de dureza conforme aumenta la temperatura. Se pierde el filo a temperaturas mayores de 250 °C.

Por otra parte, los aceros aleados se emplean para trabajar a altas velocidades y a altas temperaturas, ya que mantienen su dureza y filo en condiciones extremas.

Los carburos cementados se utilizan para trabajar a altas velocidades y con materiales muy duros. Poseen una dureza elevada, reducen el tiempo de trabajo de una pieza, aunque no son baratos, permiten obtener superficies muy lisas.

Para trabajos muy finos se emplea el diamante que, a pesar de ser un material costoso, no se desgasta tan fácilmente y se usa para el corte de otras herramientas de corte.

Los materiales cerámicos son útiles para trabajos de acabado. Se rompen con mucha facilidad y no son muy eficientes para trabajos de torneado a altas velocidades.

Las propiedades relacionadas con los requerimientos de una herramienta de corte son: dureza, tenacidad y dureza en caliente. La figura 2.9 muestra la dureza como una función de la temperatura para varios materiales de herramientas.

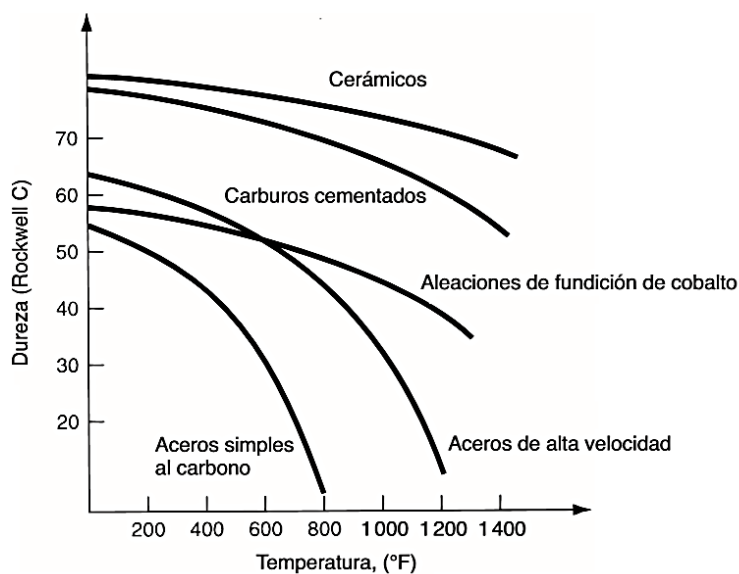


Figura 2.9 Relaciones típicas de dureza en caliente para materiales de herramienta seleccionados (Groover, 2007)

2.4.4 Fluido de corte

Una de las funciones que tiene el fluido de corte es actuar como lubricante, de manera que se reduzca la fricción entre la pieza y la herramienta y entre la herramienta y la viruta eliminada. También actúa como refrigerante, haciendo que disminuya el calor generado en la operación de mecanizado.

Los fluidos refrigerantes funcionan mejor a velocidades de corte relativamente altas, donde la generación del calor y la temperatura son un problema. Son más efectivos en los materiales susceptibles a las fallas por temperatura, como los aceros de alta velocidad, y se usan frecuentemente en operaciones de torneado (Groover, 2007).

La disminución de la temperatura se lleva a cabo a través de varios mecanismos:

- Se reduce la temperatura con el calor específico y la conductividad térmica del lubricante.
- Se reduce la fricción, reduciendo así el calor generado en la operación.
- Al reducir el coeficiente de fricción se reduce el ángulo de fricción.

La elección del fluido de corte se puede realizar en función de tres aspectos a tener en cuenta; el material de la pieza a fabricar, el material de la herramienta y el método de trabajo.

Teniendo en consideración el material de la pieza a fabricar, para las aleaciones ligeras se utiliza petróleo. Para la fundición, en seco. Para el latón, bronce y cobre, el trabajo se realiza en seco o con cualquier tipo de aceite que esté exento de azufre. Para el níquel y sus aleaciones se emplean las emulsiones. Para los aceros al carbono se emplea cualquier aceite. Para los aceros inoxidable auténticos emplean los lubricantes al bisulfuro de molibdeno.

Si la elección del fluido se hace según el material de la herramienta de corte, se encuentra que, para los aceros al carbono, dado que interesa esencialmente el enfriamiento, se emplean las emulsiones, para los aceros rápidos se orienta la elección de acuerdo con el material a trabajar. Para las aleaciones duras, se trabaja en seco o se emplean las emulsiones.

Considerando el método de trabajo, para los tornos automáticos se usan los aceites puros exentos de sustancias nocivas, dado que el operario se impregna las manos durante la puesta a punto de la máquina. Para

las operaciones de rectificado se emplean las emulsiones. Para el taladrado se utilizan los aceites puros de baja viscosidad. Para el fresado se emplean las emulsiones y para el brochado los aceites para altas presiones de corte o emulsiones.

3 MEDICIÓN DE TEMPERATURA MEDIANTE TERMOGRAFÍA

3.1 Introducción

La termografía es una ciencia que, haciendo uso de una cámara termográfica, permite obtener imágenes térmicas sin hacer contacto directo con los equipos, lo que significa que a una distancia segura y sin posibilidad de dañar objetos es posible captar anomalías de temperatura en condiciones de funcionamiento normales.

Las principales ventajas de esta técnica son (Vázquez & Fatecha Roa, 2016):

- Rapidez.
- Seguridad para el operario, al no tener que establecer contacto directo con el material, potencialmente peligroso, que se inspecciona y para el objeto que se estudia.
- Interpretación sencilla de resultados.
- Aplicable a un amplio rango de materiales y tamaños.

Como limitaciones hay que tener en cuenta:

- No es posible examinar a grandes profundidades de la superficie.
- Hay que evaluar correctamente las pérdidas.
- Puede ser difícil que grandes superficies se calienten de forma uniforme, rápida y se pueda captar contraste térmico.

3.2 Procedimientos termográficos

El ensayo termográfico puede realizarse de manera activa o pasiva y puede evaluarse cualitativa, comparativa o cuantitativamente.

Según la UNE-EN 16714-1:2017 para obtener buenos resultados el ensayo requiere:

- Cámara con sensibilidad apropiada y un rango de medición adecuado.
 - Seleccionar adecuadamente la imagen a analizar para compararla con una imagen sin perturbar.
 - Evitar reflejos.
 - Controlar las interferencias debidas a radiación externa, corrientes de aire y humedad.
 - Seleccionar adecuadamente la lente para mantener la resolución espacial requerida.
 - Buen enfoque.
 - Seleccionar los ajustes adecuados del monitor.
- Termografía pasiva

La termografía pasiva solo usa el flujo de calor producido por el calor intrínseco de la pieza ensayada. Además, necesita que la temperatura de la cámara sea calibrada con exactitud y los parámetros de medición estén bien ajustados.

- Termografía activa

En la termografía activa se genera un flujo de calor en la pieza a través de fuentes externas, de forma puntual, periódica, o continua. En función del tipo de excitación se puede obtener una subclasificación dentro de la termografía activa:

- Termografía transitoria.
- Termografía modulada.

En función del tipo de evaluación se puede distinguir entre:

- Termografía ángulo-fase.
- Termografía relacionada con la derivada del tiempo.
- Termografía por diferencial de temperatura.

Además, la termografía activa necesita que el modo de excitación, la intensidad y la variación con respecto al tiempo estén bien elegidos.

- Termografía cualitativa

Se observa la distribución de la temperatura aparente y en función de eso se determina el resultado del ensayo.

- Termografía comparativa

Consiste en evaluar las diferencias de temperatura o parámetros a través de comparar:

- Piezas iguales ensayadas en momentos distintos en las mismas condiciones.
- Piezas diferentes con la misma estructura ensayadas en las mismas condiciones.

Puede ser cualitativa o cuantitativa.

- Termografía cuantitativa

Se miden temperaturas o parámetros secundarios. Requiere un buen conocimiento de los parámetros de los materiales y sus dependencias, los parámetros de medición y los parámetros ambientales.

3.3 Principios físicos

3.3.1 Región infrarroja

Las cámaras termográficas miden la energía de las ondas electromagnéticas y la convierten en temperatura aparente, dado que es función de la temperatura del cuerpo y de su eficiencia relativa de radiación, llamada emitancia, y finalmente ofrecen el resultado como una imagen por infrarrojos (Vázquez & Fatecha Roa, 2016).

Cualquier objeto cuya temperatura esté por encima de los 0 K irradia energía infrarroja. Esta energía es el resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos y moléculas que componen la materia. El espectro electromagnético abarca ondas de diferentes longitudes de onda como se muestra en la figura 3.1.

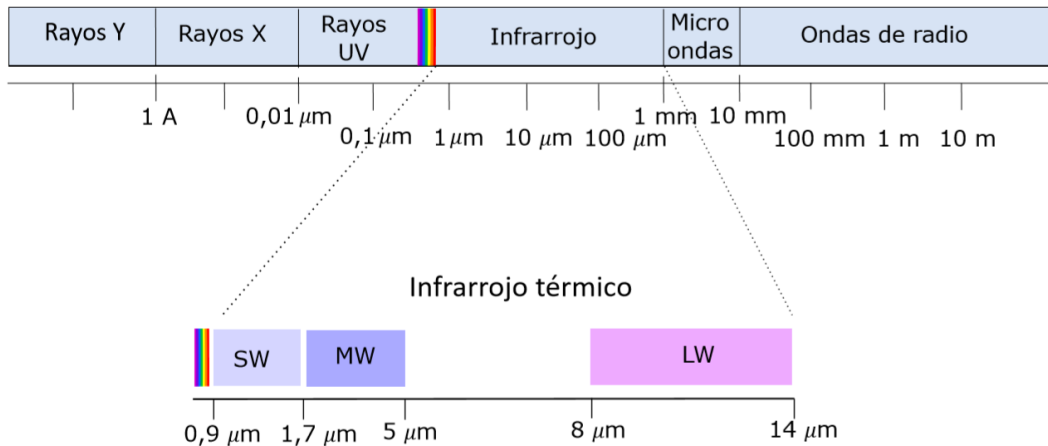


Figura 3.1 Clasificación de las ondas electromagnéticas en función de su longitud de onda

La termografía por infrarrojos puede detectar en el espectro de longitud de onda infrarroja patrones de calor que son invisibles para el ojo humano. Estos patrones de calor pueden ayudar a identificar el deterioro de los componentes antes de que fallen.

La región infrarroja se sitúa entre la región visible y de microondas del espectro electromagnético y abarca la región entre 0,7 y 14 μm. La región infrarroja en termografía se divide en tres rangos espectrales (Cañada Soriano, 2016):

- Onda corta. Abarca longitudes de onda en el rango de 0,9 a 1,7 μm, es denominado también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales.
- Onda media. El infrarrojo medio que cubre el rango de 3 a 5 μm.
- Onda larga. El infrarrojo térmico que cubre la región entre 7 a 14 μm, que incluye la porción emisiva del espectro terrestre.

El equipo de infrarrojo se diseña para operar ya sea en la banda de longitudes de ondas largas o bien en la banda de longitudes de ondas medias. La banda de longitudes de ondas largas incluye un espectro más amplio de temperaturas bajas, mientras que la banda de longitudes medias incluye un rango de temperaturas mayores.

3.3.2 Emisividad

Dependiendo de cómo se comporte un material con la radiación que recibe, se pueden distinguir dos tipos:

- Reflectores: reflejan toda la radiación que reciben.
- Cuerpos negros: absorben toda la radiación incidente. No existe ningún objeto real que emita esta radiación térmica máxima, por ello se emplean simuladores de cuerpos negros para calibrar las cámaras termográficas.

La emisividad de un cuerpo es la capacidad que tiene de emitir energía en comparación con la que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura. Viene dada por la expresión 3.1:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{W(\lambda, T)}{W_n(\lambda, T)} \quad (3.1)$$

Sabiendo que la energía total de radiación emitida por un cuerpo negro (ecuación 3.2):

$$W_n(\lambda, T) = \sigma \cdot T^4 \quad (3.2)$$

Donde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot K^4$ es la constante de Boltzmann.

Se puede expresar la energía de radiación emitida por un cuerpo con la ecuación 3.3:

$$W(\lambda, T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3.3)$$

Con $0 < \varepsilon < 1$

Hay que tener en cuenta que los cuerpos reales suelen ser emisores selectivos ya que varían su emisividad con la longitud de onda. Si se emplean dos equipos distintos, uno de SW y otro de LW, para medir un mismo objeto habrá que tener en cuenta el valor de emisividad introducido porque puede variar para las distintas cámaras utilizadas.

3.3.3 Parámetros que afectan a la emisividad

La emisividad depende de distintos parámetros, de mayor a menor importancia [6]:

- Material
Es el parámetro más importante a tener en cuenta al inspeccionar un objeto. Algunos materiales, como los metales, tienen una emisividad muy baja que dificulta el examen termográfico. En estos casos una posible solución es recubrir la superficie que se va a analizar con otro material de pequeño espesor y emisividad alta.
- Estructura superficial
Un mismo material puede tener distinta emisividad en función de cómo sea su estructura superficial. En metales, superficies que presentan defectos como oxidación y corrosión presentan valores de emisividad mayores que el mismo metal pulido.
- Ángulo de visión
La emisividad depende del ángulo de medición con respecto a la normal. Cuando un objeto se mide desde una dirección normal se obtienen valores de emisividad mayores que si se midiera desde un ángulo más oblicuo.
- Geometría
La forma del objeto que se analiza influye en cómo se mide su emisividad. Agujeros e irregularidades se pueden llegar a percibir como cuerpos negros.
- Longitud de onda
En metales, a medida que la longitud de onda de un material aumenta la emisividad también lo hace, mientras que en óxidos y otros elementos no metálicos se producen aumentos.
- Temperatura
La temperatura influye sobre los parámetros, por lo que es importante controlarla para que no perturbe las propiedades de los objetos que se miden y que la emisividad se mantenga constante.

La mayoría de los objetos de la naturaleza son cuerpos opacos. Para analizar el intercambio de energía de

estos cuerpos se utiliza la ecuación 3.4 que compara la cantidad de radiación emitida por un objeto con la reflejada por él:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{obj}}^4 + \rho \cdot T_{\text{refl}}^4 = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_{\text{obj}}^4 + \sigma \cdot (1 - \varepsilon) \cdot T_{\text{refl}}^4 \quad (3.4)$$

En función de la temperatura del objeto y del entorno se pueden obtener errores en la medición. Para saber si se está realizando una medición correcta de la temperatura la parte de radiación emitida tiene que predominar sobre la reflejada, si es a la inversa o ambas partes se parecen mucho la incertidumbre aumenta y no se puede afirmar que la medición sea válida.

Cuando la temperatura del entorno y del objeto que se analiza son similares, es más complejo realizar una medida exacta ya que en proporción la radiación del entorno que interfiere en la medición es mayor [8].

La figura 3.2 muestra cómo afecta la variación de la temperatura del objeto a la radiación percibida por una cámara de onda corta siendo $\varepsilon = 0.88$, $T_{\text{refl}} = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{atm}} = 20^\circ\text{C}$ parámetros fijos.

La figura 3.3 muestra cómo afecta la variación de la temperatura del objeto a la radiación percibida por una cámara de onda larga siendo $\varepsilon = 0.88$, $T_{\text{refl}} = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{atm}} = 20^\circ\text{C}$ parámetros fijos.

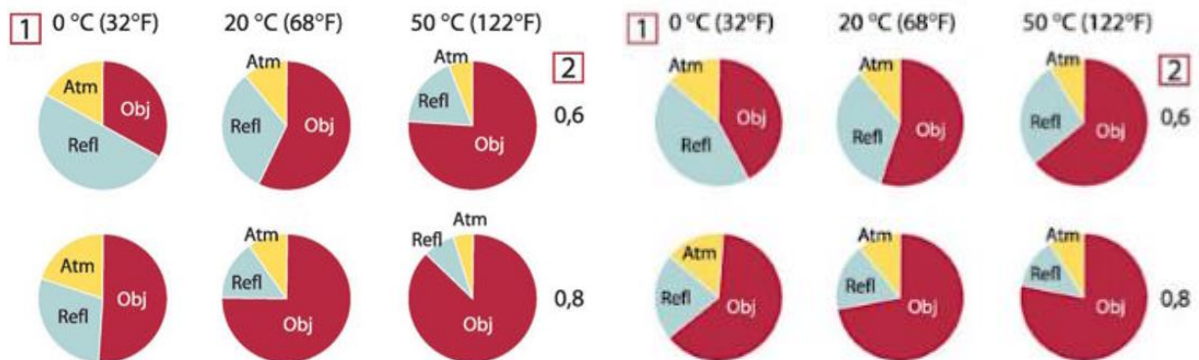


Figura 3.2 Magnitud de la radiación percibida por una cámara de onda corta variando las condiciones del medio. 1: temperatura del objeto; 2: Emitancia (Cañada Soriano, 2016)

Figura 3.3 Magnitud de la radiación percibida por una cámara de onda larga variando las condiciones del medio. 1: temperatura del objeto; 2: Emitancia (Cañada Soriano, 2016)

3.3.4 Interpretación de la imagen térmica

Si no se fija ningún parámetro de compensación en la cámara, el valor de temperatura obtenido se denomina temperatura aparente, que se corresponde con un valor de radiación y no con el de la temperatura real. Para obtener la temperatura real, habrá que compensar el efecto de la atmósfera y de la radiación reflejada de la emisividad.

- Compensación de la atmósfera

Una pequeña parte de la radiación saliente de un objeto es absorbida por la atmósfera. También la atmósfera emite su propia radiación, aunque se considera despreciable. Para paliar todos estos efectos hay que definir distintos parámetros en la cámara:

- Humedad relativa
- Temperatura del aire
- Distancia al objeto
- Compensación de la radiación reflejada

Se debe eliminar la parte reflejada por el objeto que llega a la cámara porque no está relacionada con la temperatura. Para calcular la componente reflejada se emplea la ecuación 3.5:

$$W_{\text{refl}} = \sigma \cdot \rho \cdot T_{\text{refl}}^4 \quad (3.5)$$

ρ – reflectividad. Se calcula a partir de la emisividad introducida.

T_{refl} – temperatura aparente reflejada. Calculada por el usuario.

3.3.5 Determinación de la emisividad de una muestra

Evaluar la emisividad de una muestra utilizando este modelo de cámara puede realizarse en dos pasos (Manual del usuario, 2017):

- Medir la temperatura aparente reflejada. Este parámetro se utiliza para compensar la radiación reflejada en el objeto. Si la emisividad es baja y la temperatura del objeto está relativamente alejada de la reflejada, es importante establecer la temperatura aparente reflejada y compensarla correctamente. Para ello, hay que llevar a cabo el siguiente procedimiento:
 - Hacer una bola con un gran trozo de papel de aluminio.
 - Deshacer la bola de papel de aluminio y pegar el papel en un trozo de cartón del mismo tamaño.
 - Colocar el cartón delante del objeto que desee medir asegurándose de que el lado con el papel de aluminio mire hacia la cámara.
 - Establecer un valor de emisividad de 1,0.
 - Medir la temperatura aparente del papel de aluminio y anotarla. La lámina se considera un reflector perfecto, por lo que su temperatura aparente es igual a la temperatura aparente reflejada del entorno.
- Determinación de la emisividad
 - Seleccionar un lugar en el que colocar la muestra.
 - Determinar y establecer la temperatura aparente reflejada según el procedimiento anterior.
 - Colocar en la muestra un trozo de cinta aislante cuya elevada emisividad le sea conocida.
 - Calentar la muestra al menos a 20 K sobre la temperatura ambiente de forma regular.
 - Enfocar y ajustar automáticamente la cámara y congelar la imagen.
 - Ajustar las opciones Nivel y Campo para obtener niveles de brillo y contraste óptimos en las imágenes.
 - Establecer una emisividad similar a la de la cinta (normalmente 0,97).
 - Medir la temperatura de la cinta utilizando una de las siguientes funciones de medida:
 - Isoterma (permite determinar tanto la temperatura como el grado de regularidad al calentar la

muestra).

- Punto (más simple).
- Cuadro Med. (apropiada para superficies con emisividad variable).
- Anotar la temperatura.
- Mover la función de medida a la superficie de la muestra.
- Cambiar el valor de emisividad hasta que lea la misma temperatura que en la medida anterior.
- Anotar la emisividad.

3.4 Cámara termográfica

Los principales componentes de una cámara infrarroja son:

- Lente
- Detector

El detector es el elemento principal de una cámara a partir del cual se diseñan el resto de los elementos del sistema: óptica, sistema de refrigeración, electrónica de lectura y acondicionamiento de la señal.

Según el mecanismo físico de detección que usen, se pueden distinguir dos tipos (Cañada Soriano, 2016):

- Detectores térmicos
Se basa en el incremento de temperatura generado por la radiación absorbida.
- Detectores cuánticos
Miden la interacción entre los fotones de la radiación IR incidente y el material del detector.

	Cuánticos	Térmicos
Temperatura de trabajo	LW y MW: 70-80 K SW: 200 K	Cercana a temperatura ambiente
Mínima sensibilidad	15-20 mK	50 mK
Estabilidad	Buena	Tienen derivada natural
Velocidad	Hasta 40 kHz (rápidos)	Máximo 100 Hz (lentos)
Tiempo de respuesta	μ s	ms

Tabla 3.1 Algunas características de los detectores cuánticos y térmicos (Cañada Soriano, 2016)

- Software de procesamiento.

4 PARTE EXPERIMENTAL

En este capítulo se expondrán las especificaciones de los ensayos realizados, refiriendo el material y los equipos empleados.

4.1 Material y máquina herramienta

Los ensayos se realizaron sobre barras cilíndricas de acero F-1252 de 35 cm de longitud y 40 mm de diámetro inicial (figura 4.1).



Figura 4.1 Barras de acero F-1252 empleadas en los ensayos

Para eliminar el óxido y la suciedad se realizó una pasada de 1 mm, siendo el diámetro inicial de los ensayos 39 mm.

Para el torneado de las probetas se ha empleado el torno Pinacho modelo L-1/165, mostrado en la figura 4.2, y cuyas especificaciones se indican en la tabla 4.1.



Figura 4.2 Torno L-1/165

Para cilindrado f [mm/rev]					Para refrentado f [mm/rev]					N [rpm]		
0,38	0,48	0,56	0,66	0,86	0,17	0,21	0,25	0,30	0,39	60	220	860
0,19	0,24	0,28	0,33	0,43	0,085	0,106	0,128	0,15	0,192	92	360	1 400
0,095	0,12	0,14	0,165	0,21	0,042	0,053	0,064	0,075	0,096	140	530	2 000
0,047	0,06	0,07	0,082	0,105	0,021	0,026	0,032	0,037	0,048			

Tabla 4.1 Parámetros de corte del torno

Las plaquitas utilizadas son el WNMG080408 de Garant, cuyos parámetros de corte recomendados son los que se indican en la tabla 4.2.


	ap [mm]	1 ÷ 4
	f [mm/rev]	0,15 ÷ 0,5
	Vc [m/min]	290 ÷ 190

Tabla 4.2 Plaquita WNMG080408 y parámetros de corte recomendados

4.2 Ensayos realizados

Se han realizado dos grupos de ensayos que se comentarán a continuación. Ambos se han realizado a temperatura ambiente.

Ensayo 1: Tiene como objetivo conocer la influencia que tienen los parámetros de corte sobre la temperatura. Se han variado avance, profundidad de pasada y velocidad de giro de la máquina, realizando distintas combinaciones entre ellos.

Los valores de corte recomendados por el fabricante de las plaquitas no era posible alcanzarlos con el torno empleado ya que superaban las velocidades de giro disponibles en éste. Por ello se ha trabajado con las tres velocidades de giro posibles mayores: 2 000, 1 400 y 860 rpm.

Entre todos los valores de avance posibles, se han seleccionado 0,047, 0,12 y 0,66 mm/rev. El motivo de esta elección es trabajar en condiciones más extremas para ver el efecto que esto tiene en la temperatura.

Se trabajará con profundidades de pasada de 0,5, 1 y 1,5 mm. No se ha podido trabajar con profundidades mayores, como recomienda el fabricante de las plaquitas, por limitaciones de potencia del torno. En su lugar se ha optado por un valor menor de 0,5 mm.

La tabla 4.3 resume todas las combinaciones de parámetros ensayadas.

Para maximizar el aprovechamiento de material, en cada barra se han mecanizado tramos de 10 cm cada uno. También se han ido variando los diámetros según las pasadas realizadas, garantizando siempre condiciones de corte similares que permitan hacer comparación de resultados. Las probetas se han ido identificando según el ensayo para el posterior tratamiento de los datos (figura 4.3).

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]
1	2000	0,047	0,5	39
2	2000	0,12	0,5	39
3	2000	0,66	0,5	39
4	1400	0,047	0,5	37
5	1400	0,12	0,5	37
6	1400	0,66	0,5	37
7	860	0,047	0,5	35
8	860	0,12	0,5	35
9	860	0,66	0,5	35
10	2000	0,047	1	39
11	2000	0,12	1	39
12	2000	0,66	1	39
13	1400	0,047	1	37
14	1400	0,12	1	37
15	1400	0,66	1	37
16	860	0,047	1	35
17	860	0,12	1	35
18	860	0,66	1	35
19	2000	0,047	1,5	39
20	2000	0,12	1,5	39
21	2000	0,66	1,5	39
22	1400	0,047	1,5	37
23	1400	0,12	1,5	37
24	1400	0,66	1,5	37
25	860	0,047	1,5	35
26	860	0,12	1,5	35
27	860	0,66	1,5	35

Tabla 4.3 Variables experimentales del ensayo 1



Figura 4.3 Probetas mecanizadas e identificadas

Ensayo 2: Tiene como objetivo evaluar la relación entre la velocidad de corte y la temperatura, variando el avance.

En este caso, la variación de la velocidad de corte se ha conseguido variando los diámetros, pero empleando siempre la velocidad de giro máxima de la máquina de 2 000 rpm. También se ha mantenido constante la profundidad de pasada de 0,5 mm. Las combinaciones ensayadas son las mostradas en la tabla 4.4. La velocidad de corte indicada en la tabla ha sido calculada mediante la ecuación 2.6.

Número	f [mm/rev]	D [mm]	Vc [m/min]
1	0,047	40	251,3
2	0,12		
3	0,66		
4	0,047	39,5	248,2
5	0,12		
6	0,66		
7	0,047	39	245,0
8	0,12		
9	0,66		
10	0,047	38,5	241,9
11	0,12		
12	0,66		
13	0,047	38	238,8
14	0,12		
15	0,66		
16	0,047	37,5	235,6
17	0,12		
18	0,66		
19	0,047	37	232,5
20	0,12		
21	0,66		
22	0,047	36,5	229,3
23	0,12		
24	0,66		

Tabla 4.4 Variables experimentales del ensayo 2

4.3 Medición de la temperatura

Durante la realización de las operaciones de mecanizado se ha medido la temperatura se ha usado una cámara termográfica FLIR-E49001 (figura 4.4).



Figura 4.4 Cámara termográfica FLIR-E49001

Los parámetros configurables de la cámara son mostrados en la figura 4.5. Se ha mantenido el valor de la emisividad que viene por defecto, ya que es el valor óptimo para medir la temperatura en aceros. Como distancia al objeto de medida se ha establecido el valor más pequeño (1 m), aunque que la distancia entre la cámara y la pieza mecanizada era aún menor. Los valores de tempera y humedad relativa se han establecido para condiciones ambientales.

La cámara permite seleccionar un rango de temperaturas entre las que se va a medir. En el caso del mecanizado todos los valores esperados eran mayores que 0 °C y podrían ser mayores que 150 °C, por lo que se ha seleccionado el rango 0-650 °C (figura 4.6).

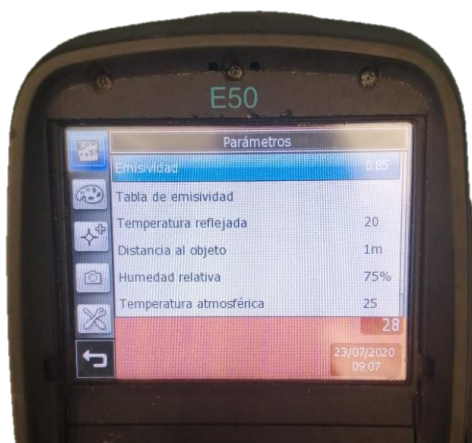


Figura 4.5 Parámetros de la cámara termográfica

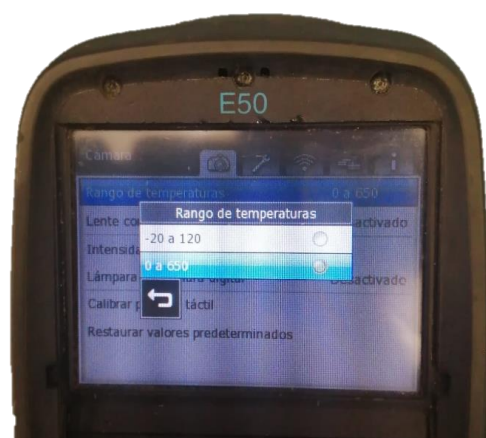


Figura 4.6 Rango de temperatura de las medidas

Otros datos de la cámara son los mostrados en la figura 4.7.

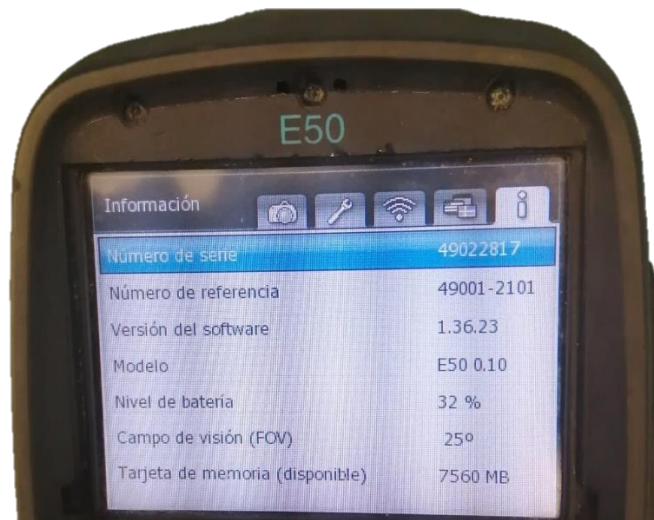


Figura 4.7 Datos de la cámara termográfica

Para la toma de datos se ha situado la cámara paralela a la plaquita, como en la figura 4.8, de forma que las imágenes captadas sean lo más claras posibles.



Figura 4.8 Posición de la cámara durante la toma de datos

Como medidas de protección se han usado guantes, gafas y una pantalla para evitar cortes por el impacto de virutas.

En cada uno de los ensayos se han grabado vídeos y/o tomado fotografías. De los videos se extrae la temperatura máxima alcanzada en la pieza y un rango de valores entre los que ésta oscila (figura 4.9). De las fotografías se puede conocer la temperatura por puntos, pudiendo así determinar la temperatura máxima alcanzada en la herramienta, en la pieza y en la viruta (figura 4.10).



Figura 4.9 Captura de video

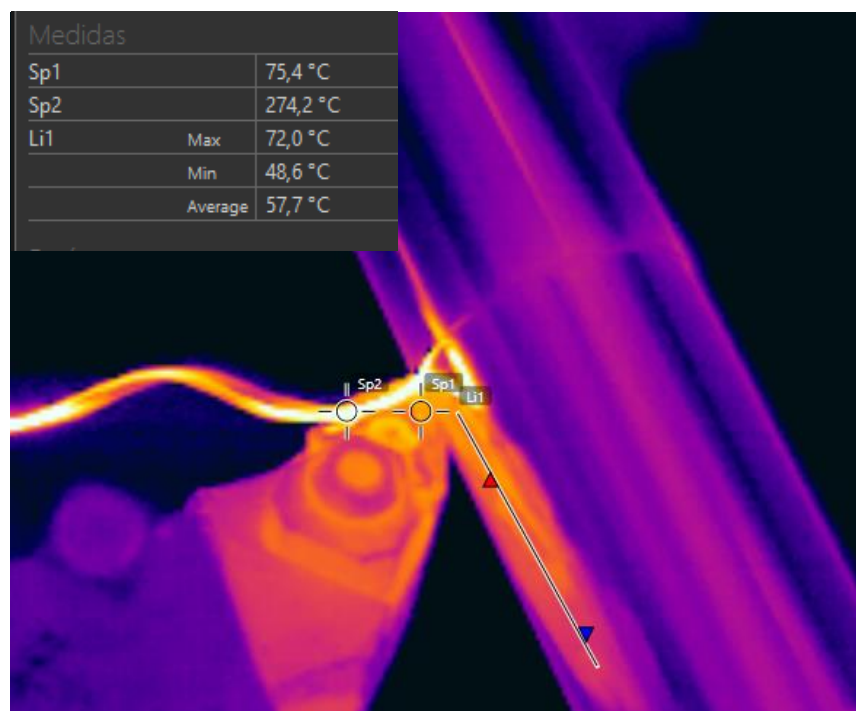


Figura 4.10 Fotografía térmica y temperaturas en distintos puntos

4.4 Medición de rugosidad superficial

Con vistas a evaluar cómo afecta el calor al acabado superficial obtenido en la pieza, se ha medido la rugosidad media aritmética Ra mediante el rugosímetro Mahr M1, cuyas características se muestran en la tabla 4.5.

Características	Dimensiones
Velocidad transversal	0,5 mm/s
Rangos de medición	100 μm - 150 μm
Resolución del perfil	12 nm
Longitudes de corte	0,25 / 0,8 / 2,5 mm
Longitudes transversales según DIN/ISO	1,75 / 5,6 / 17,5 mm
Parámetros	Ra, Rz, Rmax, RPC

Tabla 4.5 Especificaciones técnicas rugosímetro M1

En la figura 4.11 se puede apreciar la instalación experimental empleada en la medición de rugosidad, específicamente para las probetas del ensayo 1, al inicio y al final del tramo mecanizado bajo las mismas condiciones de corte. Los tramos están claramente identificados por la huella de la herramienta en función del avance empleado (figura 4.12). Se ha configurado el rugosímetro para una longitud de medida de 5,600 mm para los dos avances menores y 17,50 mm para el avance mayor, según criterios de la norma UNE 82305-1 y los valores de Ra teóricos determinados según la ecuación 2.15.



Figura 4.11 Medición de la rugosidad



Figura 4.12 Huella por cambio de avance

Para obtener las medidas de temperatura y rugosidad y realizar varias pasadas sobre las probetas, la secuencia de trabajo en el ensayo 1 ha sido:

- Mecanizado de la probeta 1, realizando una sola pasada a una sola profundidad y con una misma velocidad de giro, variando el avance entre los tres elegidos.
- Mecanizado de la probeta 2, con otra profundidad distinta a la de la probeta 1, a la misma velocidad de giro que la probeta 1 y variando el avance entre los tres elegidos.
- Mecanizado de la probeta 3, con otra profundidad distinta a la de las probetas 1 y 2, a la misma velocidad de la probeta 1, variando el avance entre los tres elegidos.

- Medidas de la rugosidad al inicio y al final de los tramos mecanizados en las tres probetas.
- Pasadas para uniformar la superficie de las tres probetas.
- Cambio de filo de plaquita.
- Repetición de los pasos anteriores cambiando la velocidad de giro.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos después de procesar las mediciones de temperatura y de rugosidad superficial.

5.1 Análisis de las medidas de temperatura

A partir de las mediciones de temperatura realizadas con la cámara termográfica, se han podido obtener las imágenes de la distribución de calor durante el corte. Dichas figuras se muestran en el anexo A. Del procesamiento de los datos aportados se han obtenido los valores de temperatura máxima en la pieza que se indican en las tablas 5.1 para el ensayo 1 en la tabla 5.2 para el ensayo 2.

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
1	2000	0,047	0,5	39	137
2	2000	0,12	0,5	39	80
3	2000	0,66	0,5	39	124
4	1400	0,047	0,5	37	153
5	1400	0,12	0,5	37	92
6	1400	0,66	0,5	37	167
7	860	0,047	0,5	35	149
8	860	0,12	0,5	35	123
9	860	0,66	0,5	35	187
10	2000	0,047	1	39	154
11	2000	0,12	1	39	132
12	2000	0,66	1	39	159
13	1400	0,047	1	37	174
14	1400	0,12	1	37	103
15	1400	0,66	1	37	168
16	860	0,047	1	35	154
17	860	0,12	1	35	146
18	860	0,66	1	35	182
19	2000	0,047	1,5	39	190
20	2000	0,12	1,5	39	183
21	2000	0,66	1,5	39	159
22	1400	0,047	1,5	37	189
23	1400	0,12	1,5	37	155
24	1400	0,66	1,5	37	221
25	860	0,047	1,5	35	247
26	860	0,12	1,5	35	187
27	860	0,66	1,5	35	213

Tabla 5.1 Temperatura máxima alcanzada en el ensayo 1

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]	Vc [m/min]
1	2000	0,047	0,5	40	150	251,3
2	2000	0,12	0,5	40	106	
3	2000	0,66	0,5	40	140	
4	2000	0,047	0,5	39,5	114	248,2
5	2000	0,12	0,5	39,5	80	
6	2000	0,66	0,5	39,5	102	
7	2000	0,047	0,5	39	150	245,0
8	2000	0,12	0,5	39	90	
9	2000	0,66	0,5	39	133	
10	2000	0,047	0,5	38,5	145	241,9
11	2000	0,12	0,5	38,5	83	
12	2000	0,66	0,5	38,5	119	
13	2000	0,047	0,5	38	127	238,8
14	2000	0,12	0,5	38	88	
15	2000	0,66	0,5	38	118	
16	2000	0,047	0,5	37,5	149	235,6
17	2000	0,12	0,5	37,5	83	
18	2000	0,66	0,5	37,5	120	
19	2000	0,047	0,5	37	144	232,5
20	2000	0,12	0,5	37	81	
21	2000	0,66	0,5	37	110	
22	2000	0,047	0,5	36,5	150	229,3
23	2000	0,12	0,5	36,5	83	
24	2000	0,66	0,5	36,5	111	

Tabla 5.2 Temperatura máxima alcanzada en el ensayo 2

5.1.1 Variación de la temperatura modificando la profundidad de pasada

Las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 representan cómo varía la temperatura máxima alcanzada en la pieza en función de la velocidad de corte. Cada una de ellas está calculada para una profundidad de pasada diferente.

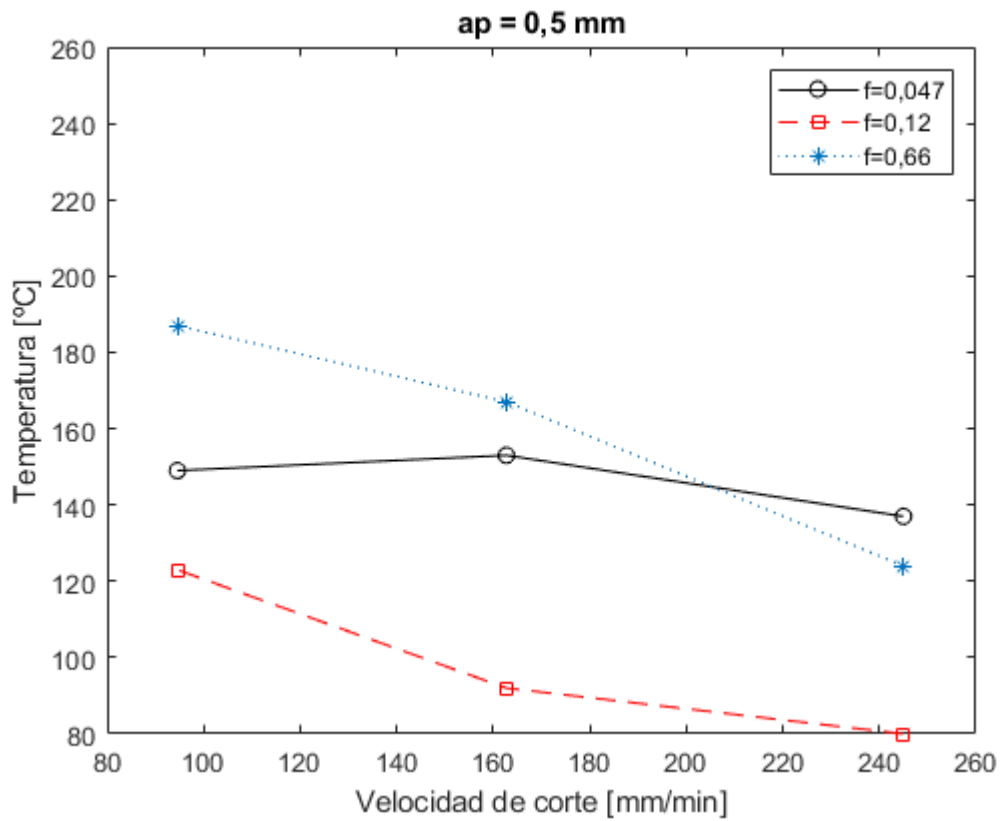


Figura 5.1 Variación de la temperatura para distintos avances con profundidad de pasada 0,5 mm

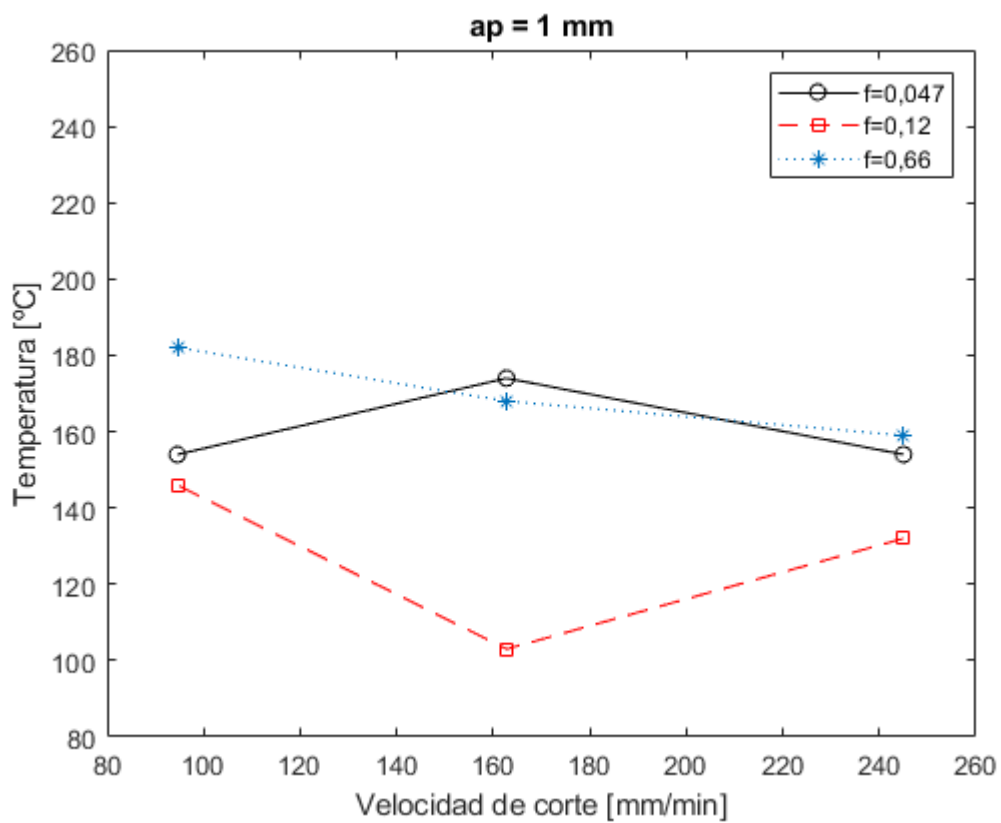


Figura 5.2 Variación de la temperatura para distintos avances con profundidad de pasada 1 mm

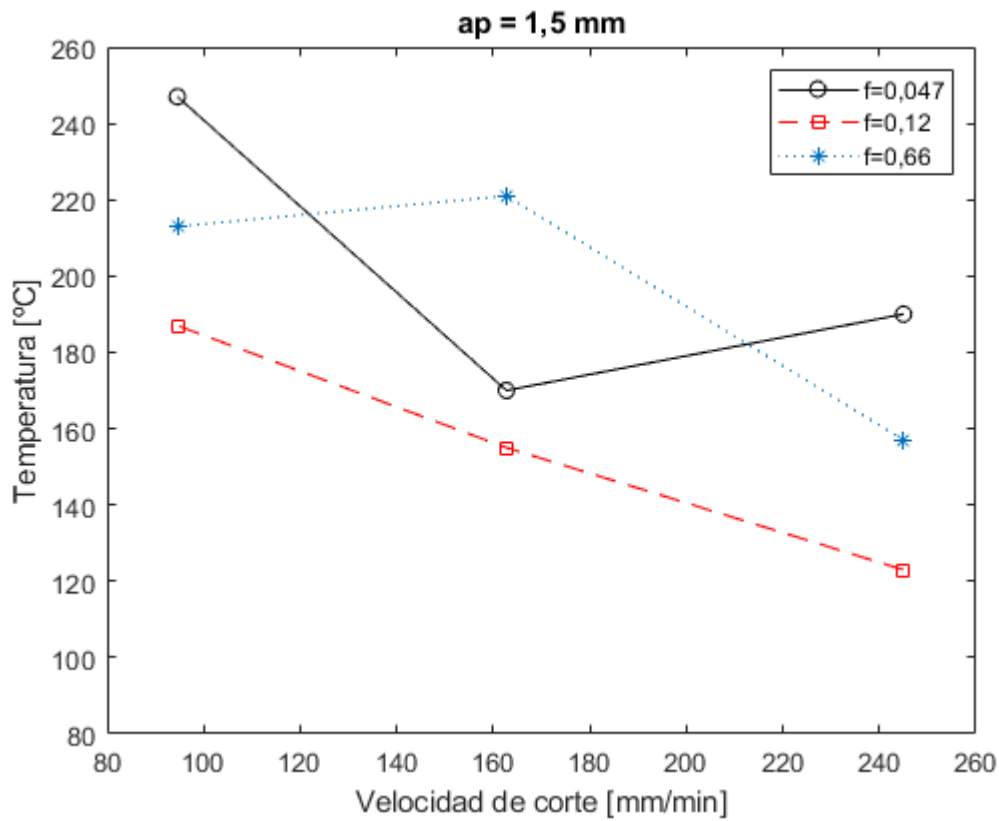


Figura 5.3 Variación de la temperatura para distintos avances con profundidad de pasada 1,5 mm

Para las tres profundidades, el avance de 0,12 mm/rev que es el más próximo a los valores recomendados por el fabricante de las plaquitas, es el que proporciona una gráfica con valores de temperatura menores. Las gráficas que se corresponden con los avances de 0,66 y 0,047 no siguen un patrón claro, por lo que en el ensayo 2 se han realizado más pruebas para obtener más puntos de esas curvas y que sean más exactas.

De la tabla 5.2 se puede obtener la gráfica de la figura 5.4, donde se han representado los valores de temperatura alcanzados en función de la velocidad de corte para tres avances distintos.

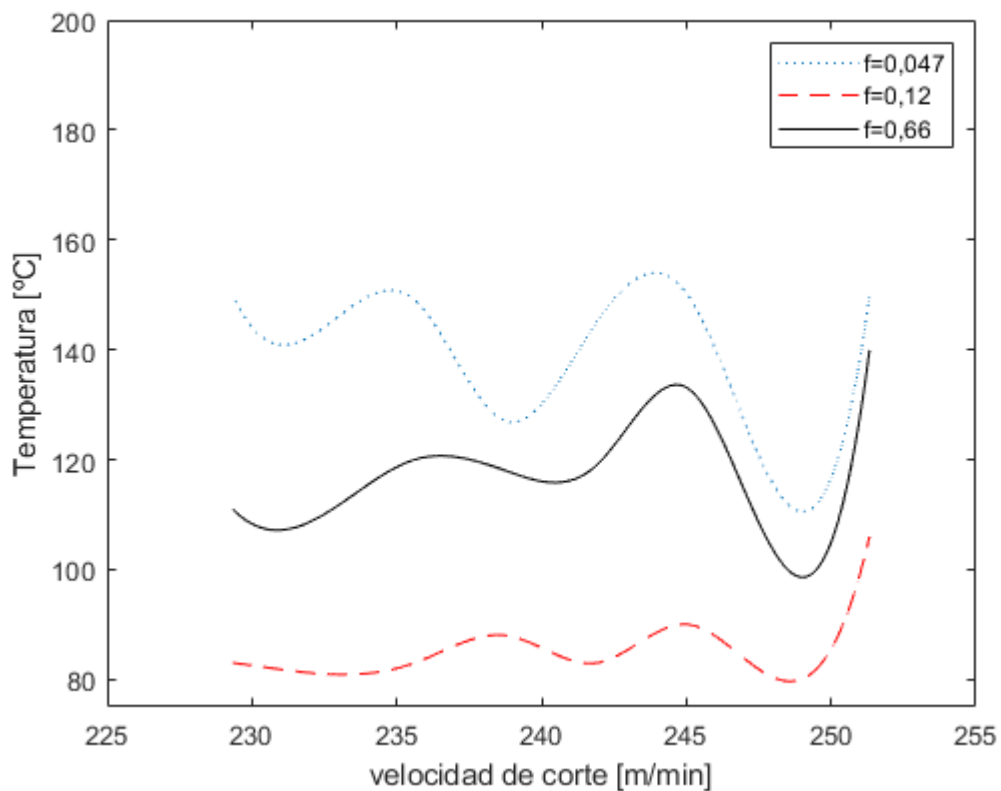


Figura 5.4 Temperatura máxima alcanzada en función de la velocidad de corte

De la gráfica 5.4 se comprueba que para valores de avance próximos a los recomendados por el fabricante de las plaquitas ($0,15 \div 0,5$ mm/rev) se genera menos calor que para valores más alejados. También se conocen mejor las curvas de los avances 0,047 y 0,66 mm/rev, siendo la del menor avance la que mayores valores de temperatura alcanza.

5.1.2 Variación de la temperatura modificando el avance

Las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 representan como varía la temperatura máxima alcanzada en la pieza en función de la profundidad de pasada. Cada una de ellas está calculada para un avance diferente.

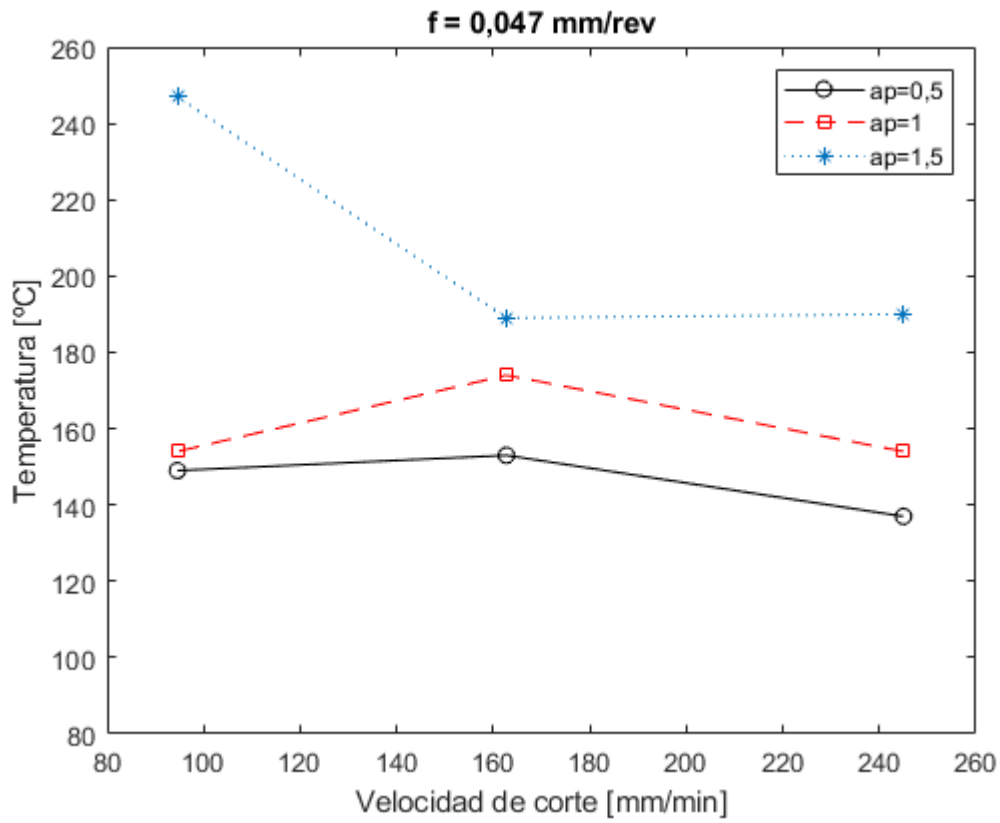


Figura 5.5 Variación de la temperatura para distintas profundidades de pasada con avance de 0,047 mm/rev

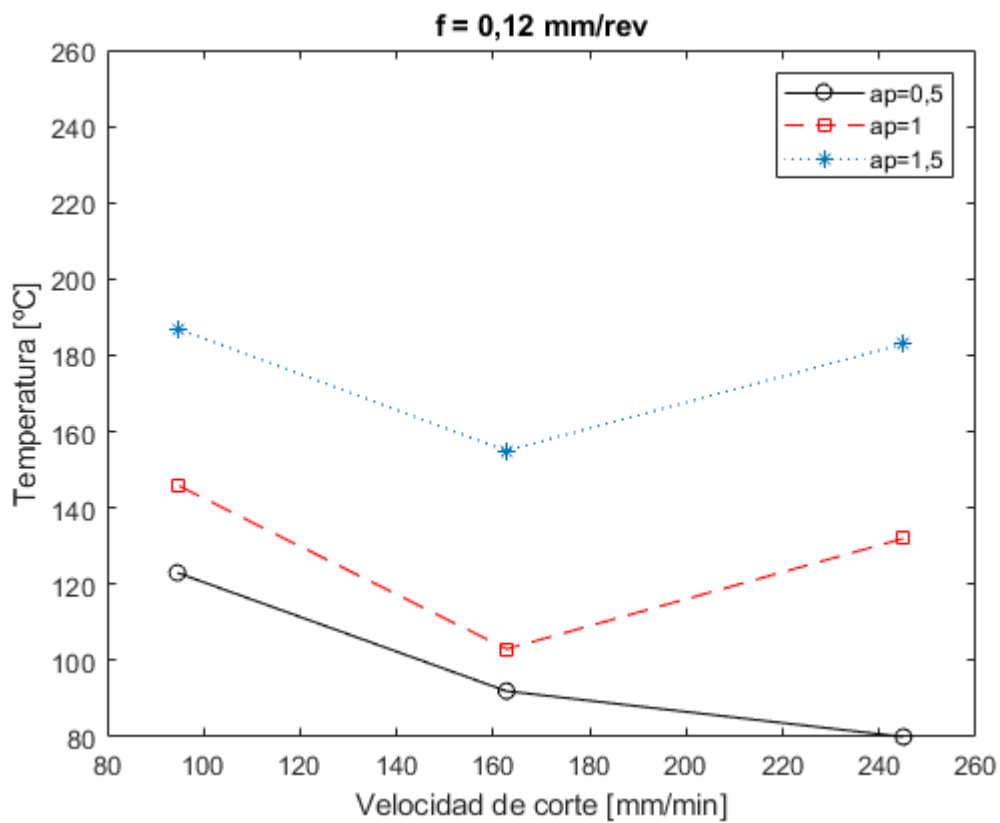


Figura 5.6 Variación de la temperatura para distintas profundidades de pasada con avance de 0,12 mm/rev

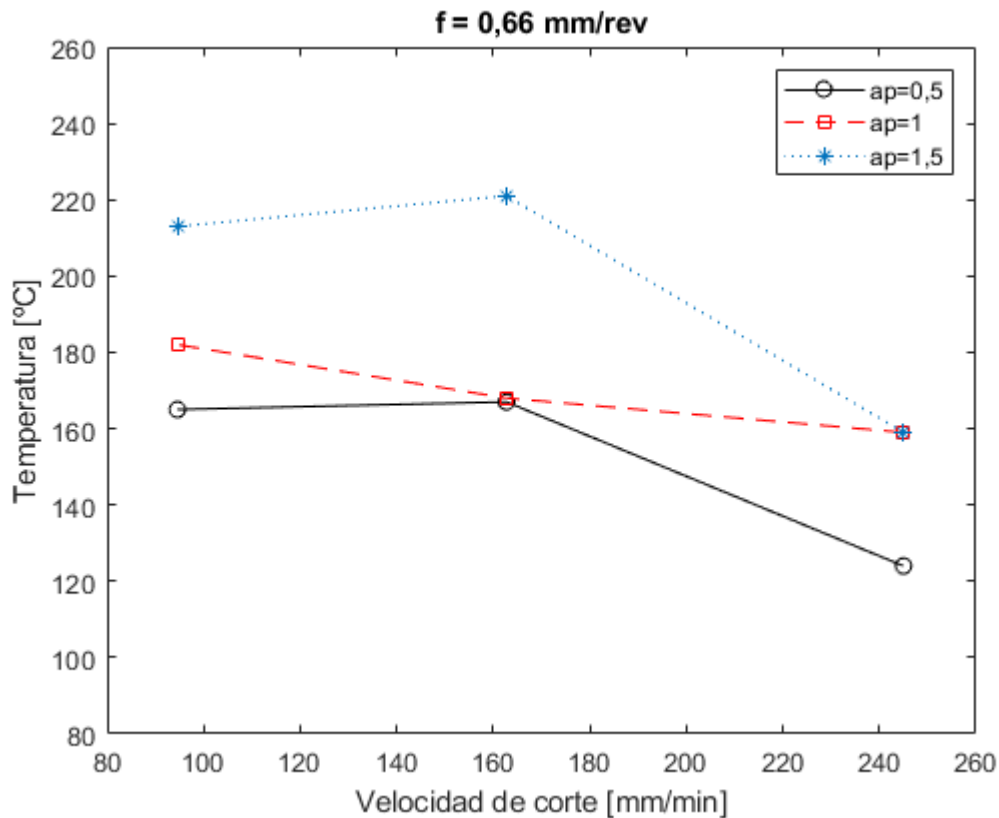


Figura 5.7 Variación de la temperatura para distintas profundidades de pasada con avance de 0,66 mm/rev

Observando todos los casos, se puede afirmar que, a mayor profundidad de pasada, mayor calor se genera en la pieza durante el mecanizado. A pesar de que el valor de profundidad de 0,5 mm está fuera de las recomendaciones del fabricante, es el que menores valores de temperatura proporciona.

5.1.3 Temperatura máxima en la viruta

A medida que la velocidad de corte aumenta, el calor que se produce se concentra más en la viruta y no en la pieza, lo cual es lo mejor para evitar daños superficiales en este elemento.

Si se analizan las fotografías térmicas, se puede obtener la temperatura en la interfaz de la herramienta-pieza, que es similar a la de la viruta que se elimina, así para un avance de 0,047 mm/rev y dos profundidades distintas, 1 y 1,5 mm, se ha representado la variación de la temperatura frente a la velocidad de corte (figura 5.8). Los valores que se han tenido en cuenta corresponden a los de la tabla 5.3. Se ha tenido en cuenta solamente los datos recogidos para el avance de 0,047 mm/rev ya que la calidad de las fotografías térmicas es mucho mejor que para los otros avances ensayados.

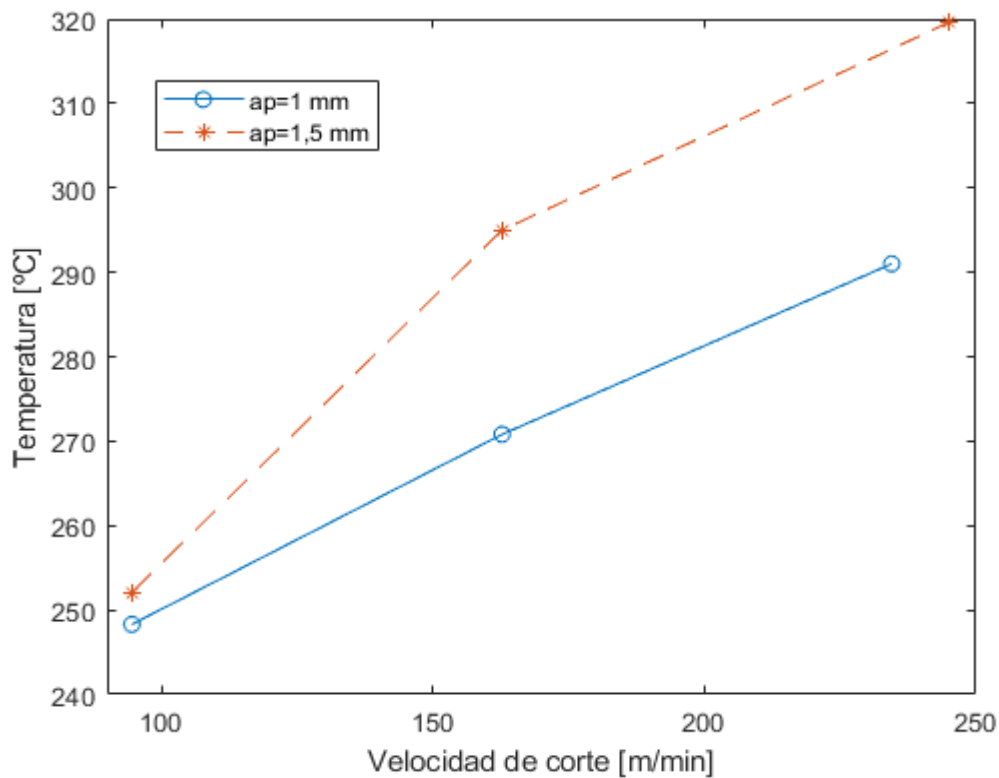


Figura 5.8 Temperatura en la interfaz pieza-herramienta para distintas profundidades de pasada con $f=0,047$ mm/rev

A partir de la figura 5.8 se comprueba que a medida que aumenta la velocidad de corte, aumenta la temperatura en esta zona del mecanizado. Los valores son similares a los mostrados en la figura 2.5.

Ensayo 1			
Número	Vc [m/min]	ap [mm]	Tª [°C]
10	232,477	1	291
13	162,734	1	270,8
16	94,562	1	185,7
19	245,044	1,5	319,6
22	162,734	1,5	295
26	94,562	1,5	252,1

Tabla 5.3 Temperatura alcanzada en la interfaz herramienta-pieza con $f=0,047$ mm/rev

5.2 Análisis de las medidas de rugosidad Ra

Se ha medido la rugosidad de todas las probetas del ensayo 1. Por cada tramo mecanizado a unas condiciones de corte específicas se han tomado dos medidas de la rugosidad, una al inicio y otra la final. Los valores obtenidos son los que se muestran en la tabla 5.4. Los valores de rugosidad obtenidos en el inicio y final de los tramos mecanizados son muy similares, por lo que solo se han tenido en cuenta los finales.

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	Ra medida [μm]	Ra teórica [μm]
1	2000	0,047	0,5	39	0,866	0,086
2	2000	0,12	0,5	39	0,997	0,563
3	2000	0,66	0,5	39	7,800	17,016
4	1400	0,047	0,5	37	0,561	0,086
5	1400	0,12	0,5	37	0,755	0,563
6	1400	0,66	0,5	37	7,845	17,016
7	860	0,047	0,5	35	0,599	0,086
8	860	0,12	0,5	35	0,997	0,563
9	860	0,66	0,5	35	9,330	17,016
10	2000	0,047	1	39	0,995	0,086
11	2000	0,12	1	39	0,900	0,563
12	2000	0,66	1	39	8,152	17,016
13	1400	0,047	1	37	1,406	0,086
14	1400	0,12	1	37	0,672	0,563
15	1400	0,66	1	37	9,960	17,016
16	860	0,047	1	35	0,645	0,086
17	860	0,12	1	35	0,963	0,563
18	860	0,66	1	35	9,415	17,016
19	2000	0,047	1,5	39	1,533	0,086
20	2000	0,12	1,5	39	0,837	0,563
21	2000	0,66	1,5	39	7,941	17,016
22	1400	0,047	1,5	37	1,089	0,086
23	1400	0,12	1,5	37	0,678	0,563
24	1400	0,66	1,5	37	9,696	17,016
25	860	0,047	1,5	35	0,820	0,086
26	860	0,12	1,5	35	0,957	0,563
27	860	0,66	1,5	35	9,295	17,016

Tabla 5.4 Valores de rugosidad en el ensayo 1

En las figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 se han representado los valores de rugosidad en función de la velocidad de corte, para distintos valores de profundidad de pasada y avance. También se ha representado el valor de la temperatura alcanzado en la pieza, por cada gráfica hay dos líneas que se corresponden con los valores de temperatura máximos y mínimos para esas velocidades de corte.

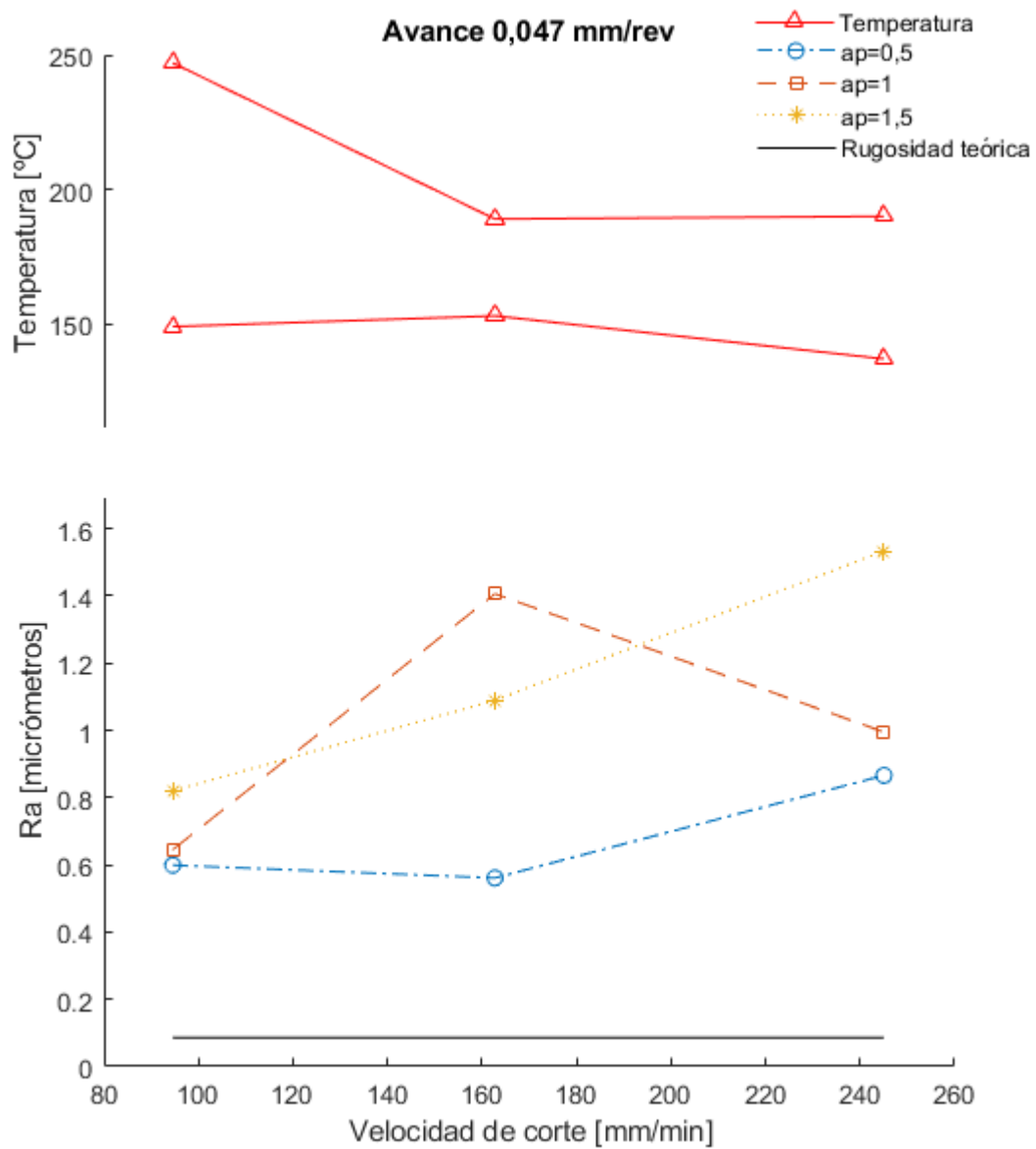


Figura 5.9 Rugosidad y temperatura para avance 0,047 mm/rev

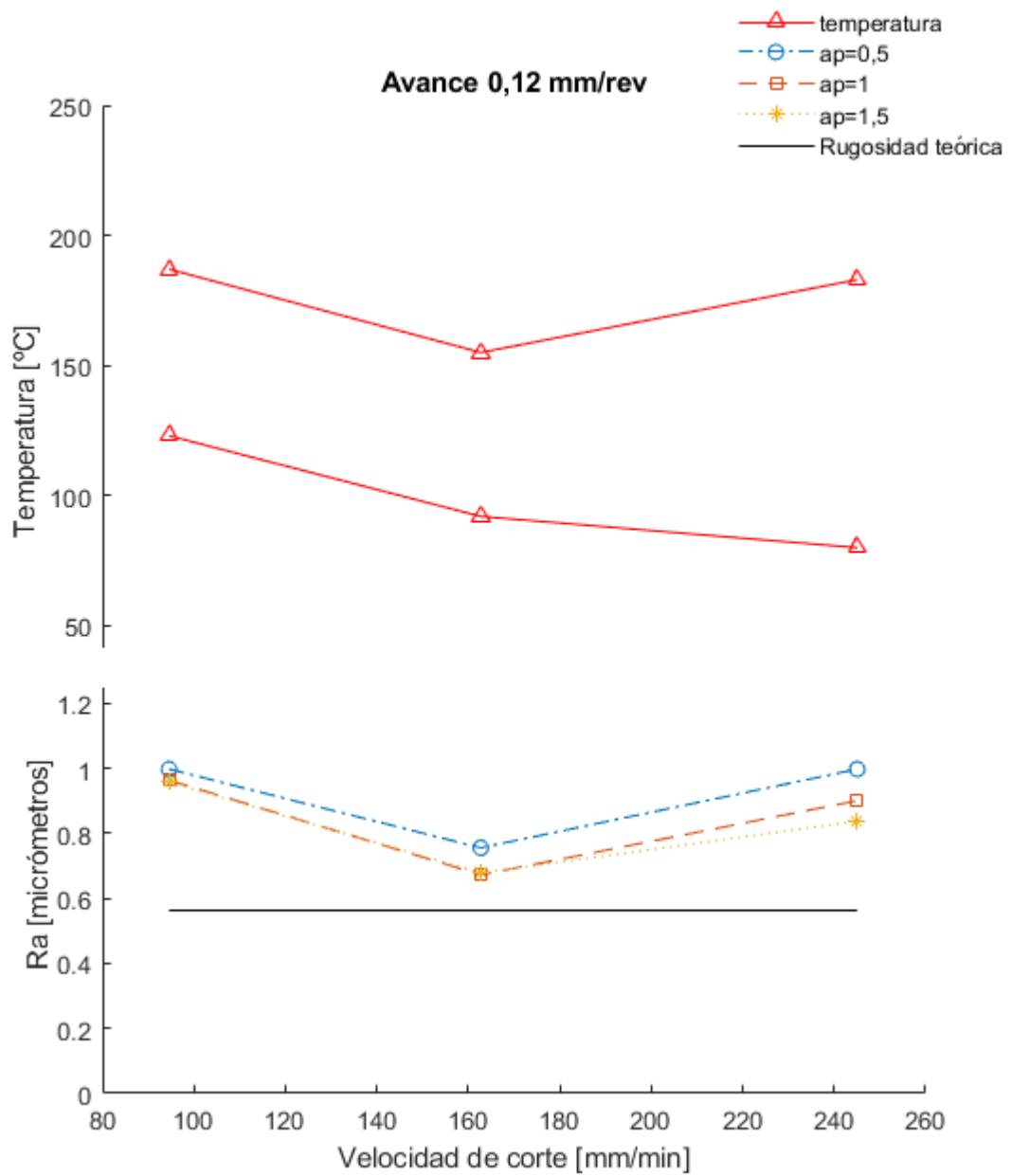


Figura 5.10 Rugosidad y temperatura para avance 0,12 mm/rev

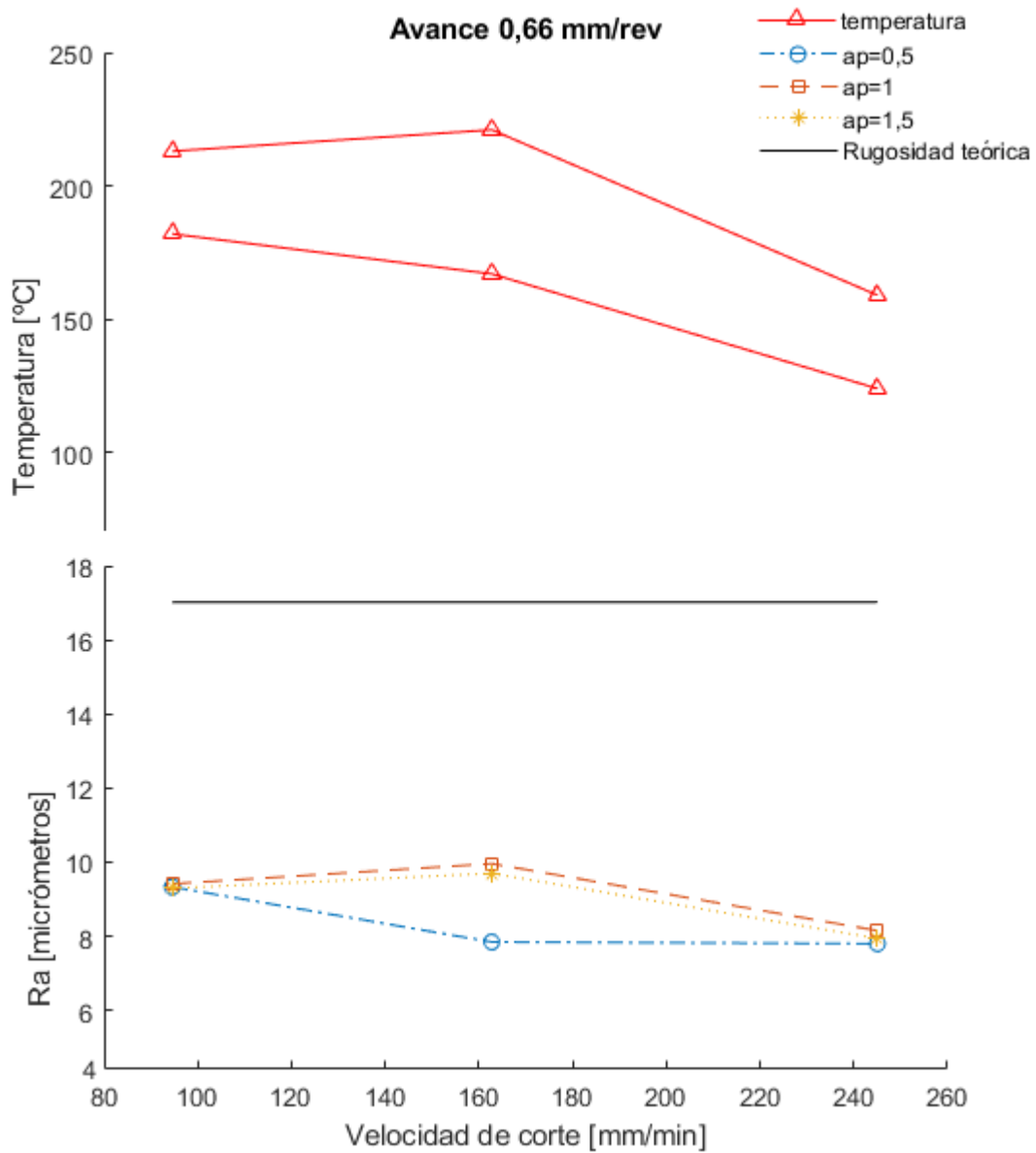


Figura 5.11 Rugosidad y temperatura para avance 0,66 mm/rev

De la figura 5.10 se observa que los valores de rugosidad superficial obtenidos son muy similares a la rugosidad teórica. En la figura 5.9, cuando el avance es de 0,047 mm/rev, los valores obtenidos de rugosidad son superiores al teórico, mientras que en la figura 5.11, con un avance de 0,66 mm/rev, los valores obtenidos son mucho menores al teórico.

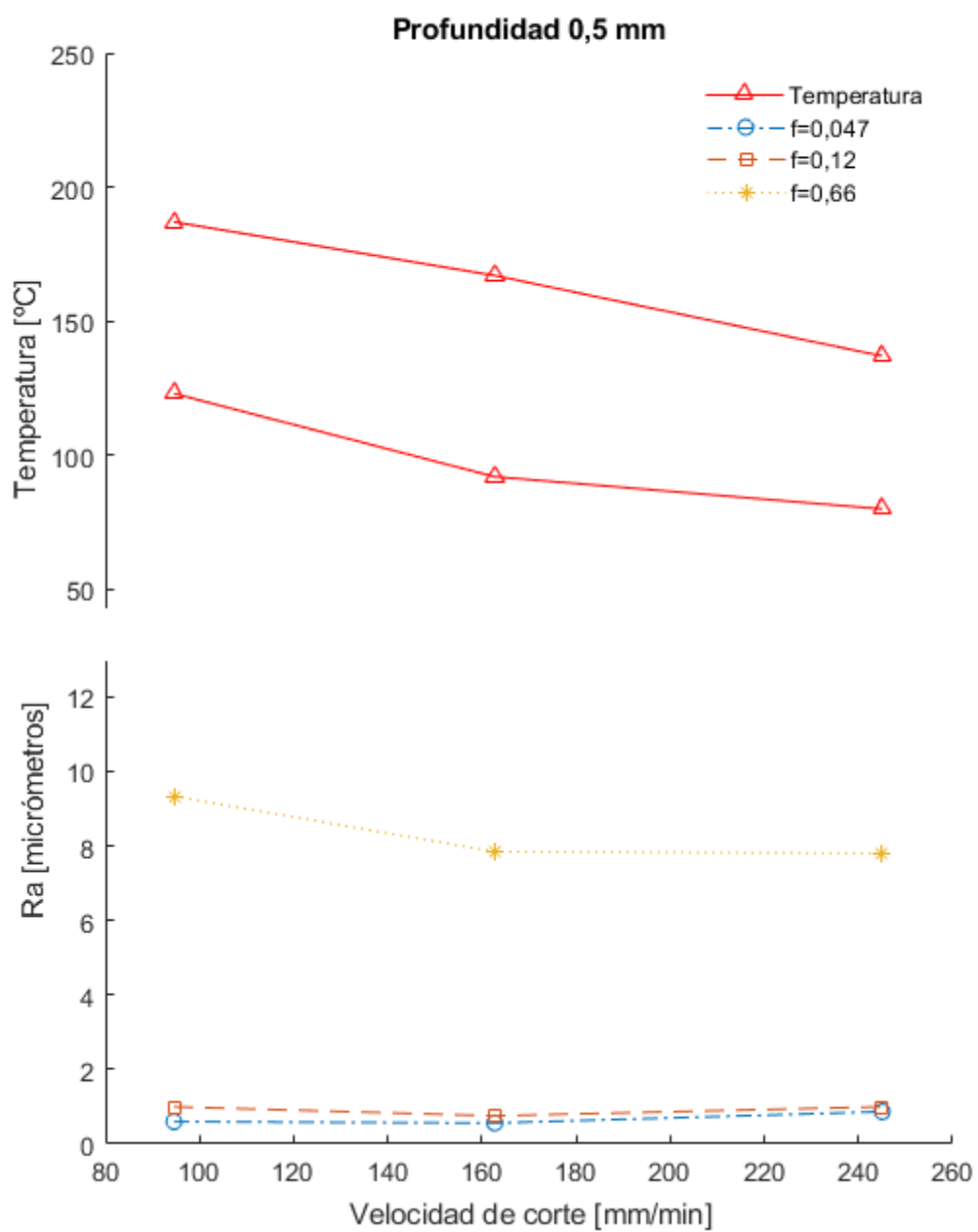


Figura 5.12 Rugosidad y temperatura para profundidad 0,5 mm

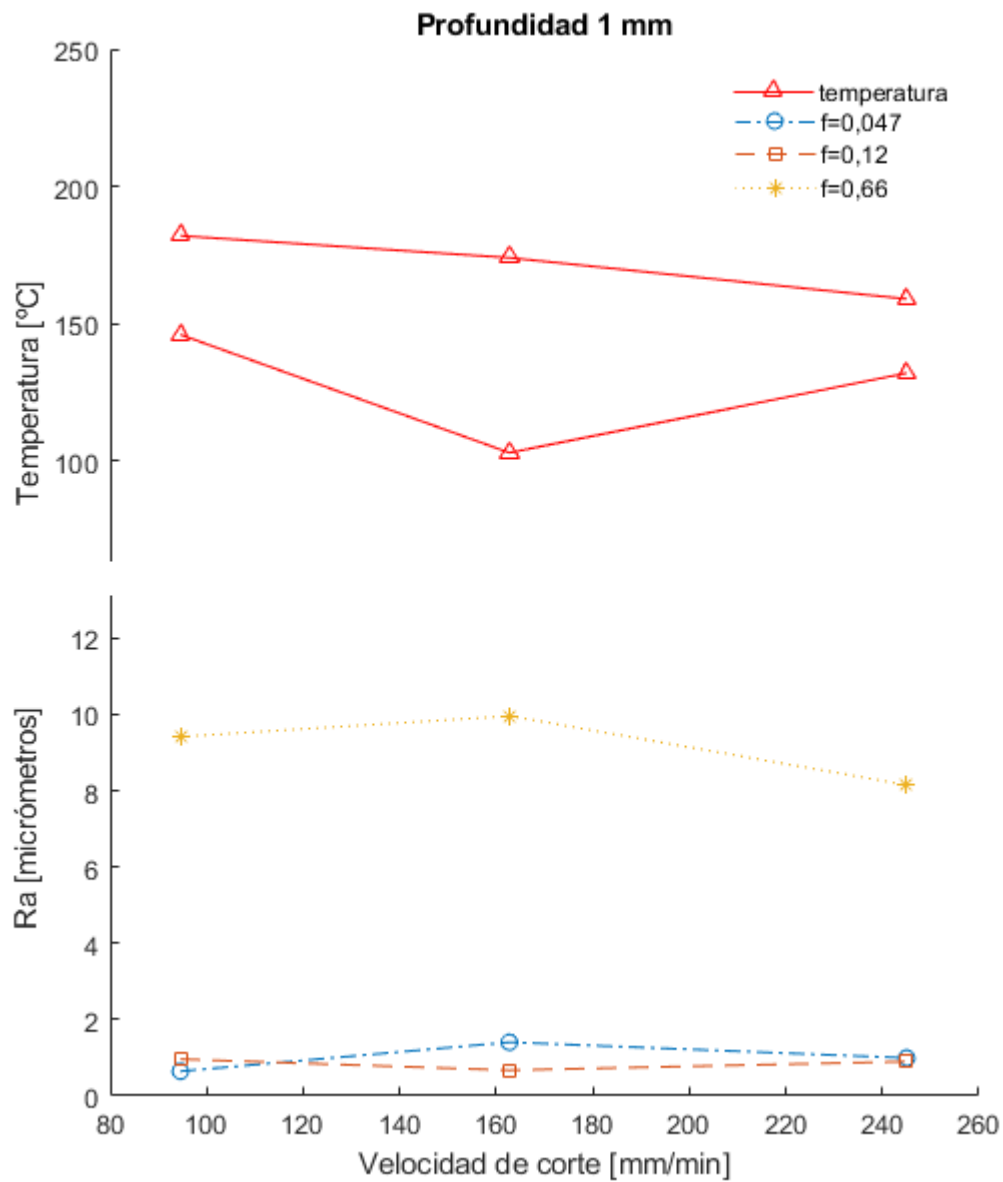


Figura 5.13 Rugosidad y temperatura para profundidad 1 mm

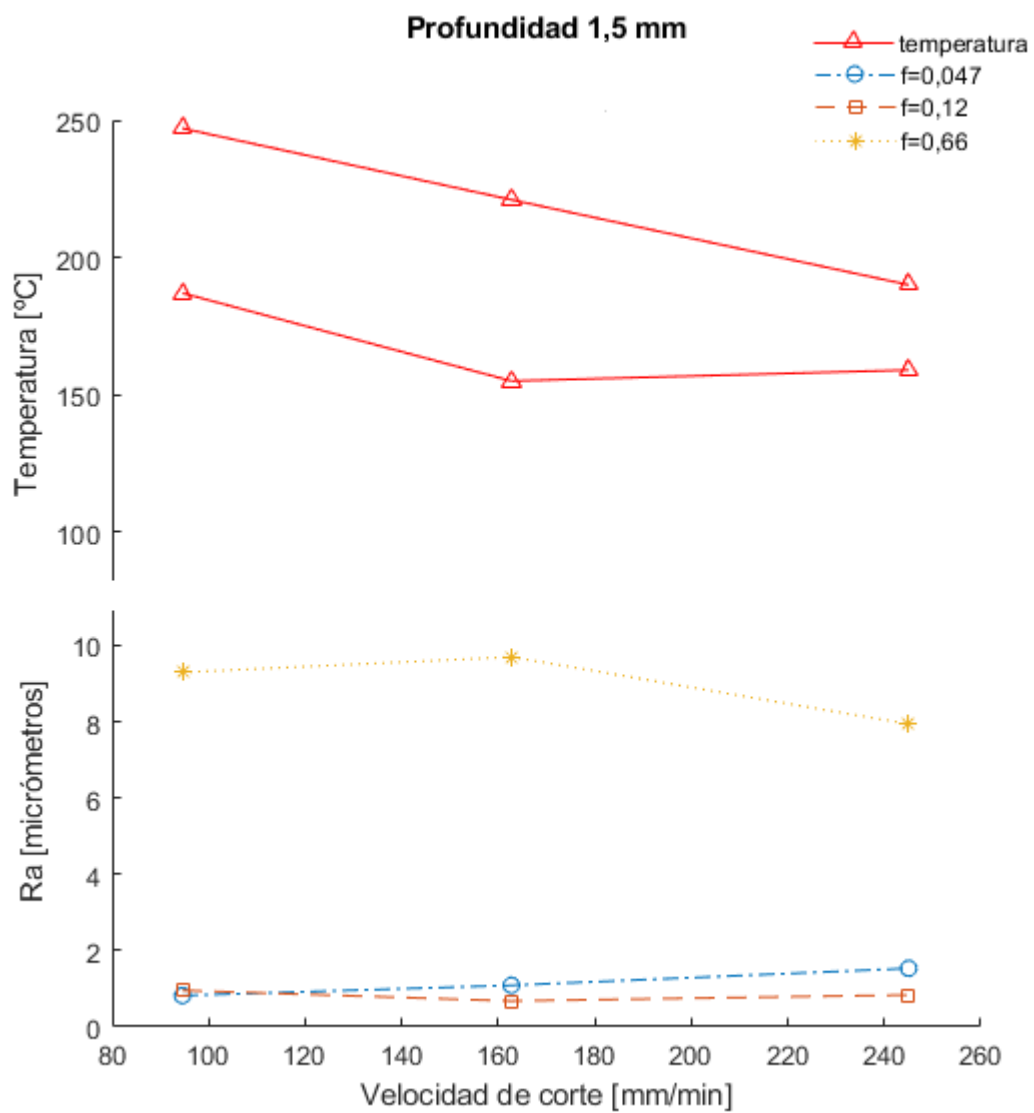


Figura 5.14 Rugosidad y temperatura para profundidad 1,5 mm

De las últimas figuras se observa que no hay una relación clara entre los valores de temperatura alcanzados y la rugosidad superficial de las piezas.

6 CONCLUSIONES

A partir de las discusiones realizadas en el capítulo 5, pueden extraerse las siguientes conclusiones y reflexiones sobre como se ha llevado a cabo el trabajo.

En el análisis de la temperatura se han obtenido resultados esperados; cuanto mayor es el avance y la profundidad de pasada utilizados, mayor es la temperatura que se alcanza en la pieza durante el corte, aunque al usar valores próximos a los recomendados por el fabricante de las plaquitas la temperatura alcanzada debe ser la menor. Al analizar la temperatura en función de distintas profundidades de pasada los valores mínimos de temperatura se han obtenido para la profundidad menor, a pesar de estar fuera del rango de valores recomendados por el fabricante. Esto es debido a que los fabricantes recomiendan valores en función del rendimiento y la vida útil.

También se ha comprobado que, al aumentar la velocidad de corte, el calor generado se concentra más en la viruta y no en la pieza. En todos los casos se comprueba que el parámetro de corte más influyente es la velocidad de corte.

Uno de los problemas principales que ha conllevado recopilar los datos para analizar el comportamiento de la temperatura es la toma de imágenes térmicas. A pesar de que la distancia mecanizada ha sido una constante en todos los ensayos, el tiempo de mecanizado no, por lo que las imágenes no se han tomado cuando el torno llevaba funcionando el mismo tiempo. Además, como se observa en los videos, los valores de temperatura que muestra la cámara fluctúan ligeramente, por lo que, aunque se han tenido en cuenta siempre los valores máximos, podría haber sido más adecuado trabajar con franjas de valores en lugar de puntos.

La posición de la cámara respecto a la pieza no ha sido siempre la misma, ya que no ha sido posible fijarla en un punto desde el que tomar todas las imágenes, por lo que hubiera sido más conveniente para garantizar datos más exactos poder trabajar de esta manera. Una gran limitación para el análisis de los resultados ha sido el número de puntos tomados para realizar cada gráfica, el motivo por el que se ha realizado el segundo ensayo es para obtener más puntos, pero realizar esto es costoso en tiempo y en recursos.

En el análisis de rugosidad se han comparado los valores de rugosidad de las piezas y los valores de temperatura alcanzados durante el torneado. En todos los casos los valores de rugosidad obtenidos son muy similares, independientemente de si el calor generado ha sido mayor o menor, aunque con la menor de las profundidades de pasadas utilizadas los valores de R_a son los menores en todos los casos. En el caso del mayor avance (0,66 mm/rev) los valores que se han obtenido son muy distintos al valor teórico esperado, que podría deberse a que las condiciones de corte no son las recomendadas por el fabricante.

En los ensayos realizados no se ha empleado fluido de corte porque podría empeorar la calidad de las imágenes térmicas y porque el objetivo del trabajo es establecer relaciones entre los parámetros de corte y la temperatura alcanzada.

Se ha analizado tanto la temperatura alcanzada en la pieza como en la viruta, siendo los dos elementos principales en los que se concentra el calor, y se ha dejado de lado la temperatura alcanzada en la herramienta, dado que gracias a otros estudios que se han realizado se sabe que el porcentaje de calor almacenado es menor. El calor de la viruta se ha analizado solamente para valores de avance pequeños, ya que la calidad de las fotografías térmicas es mejor en este caso.

REFERENCIAS

- Aguiar Vieira, A., Monteiro Baptista, A., & Lages, P. (2009). On the temperature field during superficial grinding: an experimental study. 40(11-12), 1084–1092. h. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- Angelone, R., Caggiano, A., Improta, I., & Nele, L. (2018). Temperature Measurements for the Tool Wear and Hole Quality Assessment During Drilling of CFRP/CFRP Stacks. *Procedia CIRP*, 67, 416–421. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.235>
- Boothroyd, G. (1978). *Fundamentos del corte de metales y de las máquinas-herramientas*. Bogotá: McGraw-Hill Latinoamericana.
- Cañada Soriano, M. (2016). *Termografía infrarroja: nivel II*. Madrid: FC Editorial.
- Freites, A., & Pérez, P. (2016). *La termodinámica en el corte de los metales*. Venezuela: Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño. Escuela de Ing. Industrial nº 45.
- Groover, M. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems (3rd ed.)*. New Jersey: John Wiley.
- Manual del usuario. (2017). Obtenido de <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-ex-series-user-manual.pdf>
- Marinesco, I., Rowe, W., Dimitrov, B., & Inasaki, I. (2004). *Tribology of abrasive machining process*. Norwich, NY: William Andrew Publishing.
- Morán González, J. (2000). *Efectos térmicos en el mecanizado de piezas de acero al carbono*. (Tesis doctoral). Madrid: Escuela técnica superior de ingenieros navales de la Universidad Politécnica de Madrid.
- San Juan, M., Martín, O., Santos, F., & Cabezudo. (2012). Study of Temperature and Workpiece Damage in Drilling of Carbon Fiber Composites. *AIP Conference Proceedings*. (1431 (495)). Obtenido de <https://aip.scitation.org/doi/citedby/10.1063/1.470>
- Schmidt, A., & Roubik, J. (1949). Distribution of Heat generate in drilling. 71, 245. *ASME Transactions*.
- Soriano, J., Garay, A., Aristimuño, P., & Iriarte, L. (2013). EFFECTS OF ROTATIONAL SPEED, FEED RATE AND TOOL TYPE ON TEMPERATURES AND CUTTING FORCES WHEN DRILLING BOVINE CORTICAL BONE. *Machining Science and Technology*, 17(4).
- Trigger, K., Chao, B., & American Society of Mechanical Engineers. (1950). *An analytical evaluation of metal-cutting temperatures*. New York, N.Y: ASME.
- Uzorh Augustine, C., & Nwifo Olisaemeka, C. (2013). Thermal Aspect of Machining: Evaluation of Tool and Chip Temperature during Machining Process Using Numerical Method. 2, 66-79. Owerri, Imo State, Nigeria: The International Journal Of Engineering And Science (IJES).
- Vázquez, M. Á., & Fatecha Roa, J. (2016). Análisis por imagen termográfica de equipos eléctricos en operación en una planta industrial. 21(2), 241–249. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*. Obtenido de <https://doaj.org/article/442c53d>

A. ANEXO A: IMÁGENES TÉRMICAS DEL ENSAYO 1

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
1	2000	0,047	0,5	39	137



Figura A.1 Imagen térmica del ensayo 1.1

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
2	2000	0,12	0,5	39	80



Figura A.2 Imagen térmica del ensayo 1.2

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
3	2000	0,66	0,5	39	124

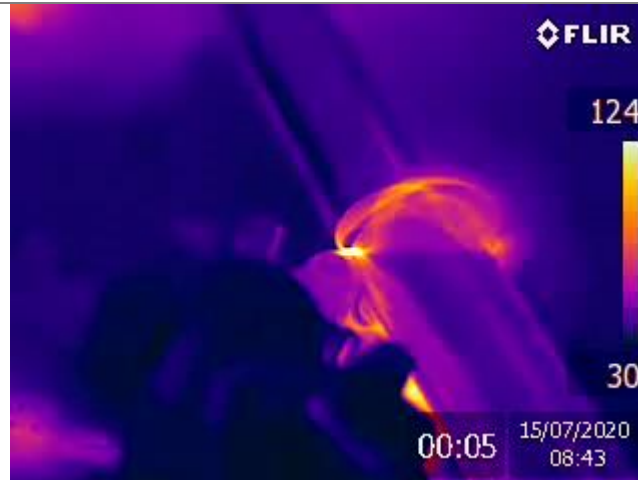


Figura A.3 Imagen térmica del ensayo 1.3

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
4	1400	0,047	0,5	37	153

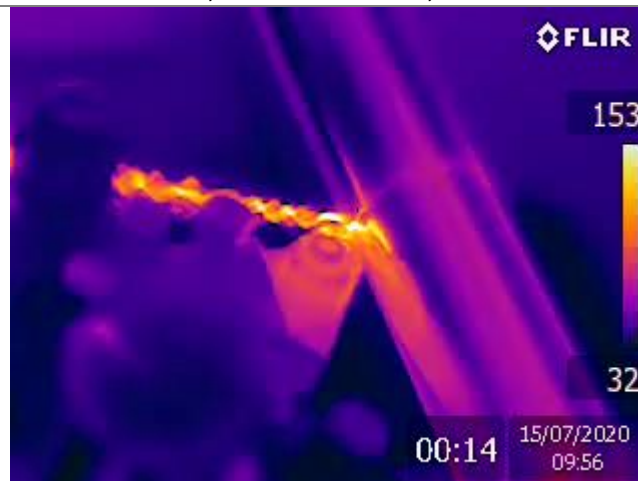


Figura A.4 Imagen térmica del ensayo 1.4

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
5	1400	0,12	0,5	37	92



Figura A.5 Imagen térmica del ensayo 1.5

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
6	1400	0,66	0,5	37	179



Figura A.6 Imagen térmica del ensayo 1.6

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
7	860	0,047	0,5	35	149

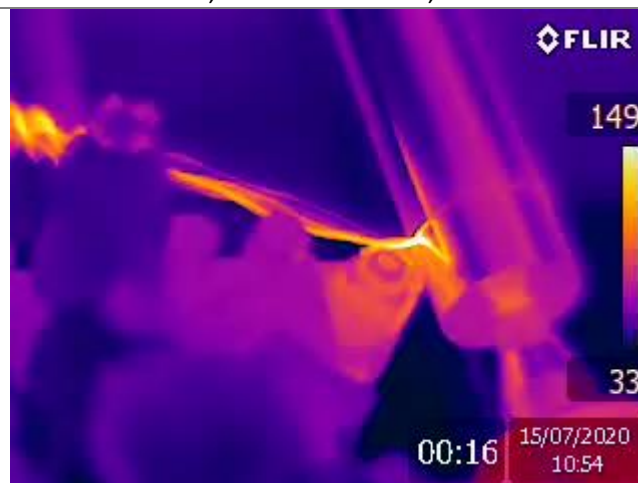


Figura A.7 Imagen térmica del ensayo 1.7

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
8	860	0,12	0,5	35	123

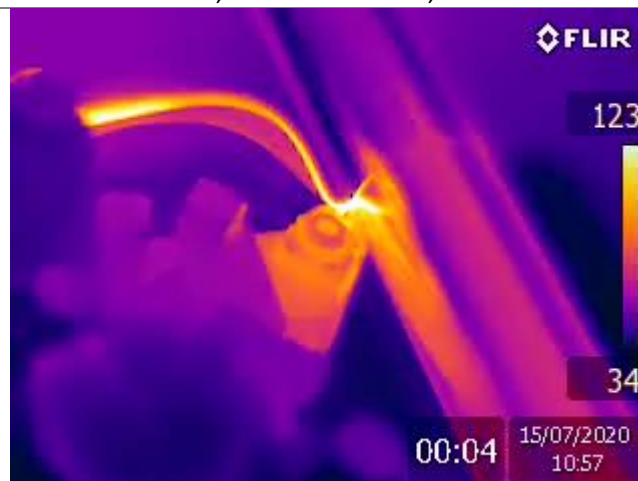


Figura A.8 Imagen térmica del ensayo 1.8

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
9	860	0,66	0,5	35	187



Figura A.9 Imagen térmica del ensayo 1.9

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
10	2000	0,047	1	39	154

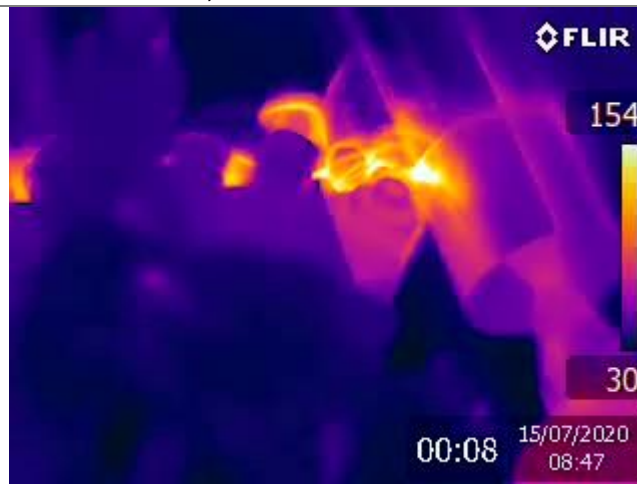


Figura A.10 Imagen térmica del ensayo 1.10

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
11	2000	0,12	1	39	132



Figura A.11 Imagen térmica del ensayo 1.11

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
12	2000	0,66	1	39	159



Figura A.12 Imagen térmica del ensayo 1.12

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
13	1400	0,047	1	37	174

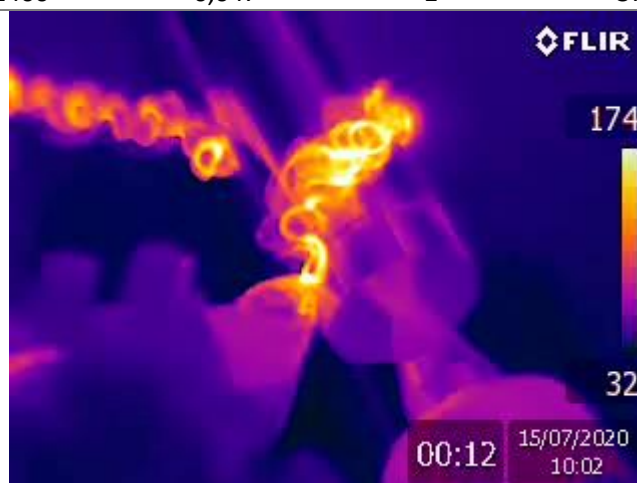


Figura A.13 Imagen térmica del ensayo 1.13

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
14	1400	0,12	1	37	103

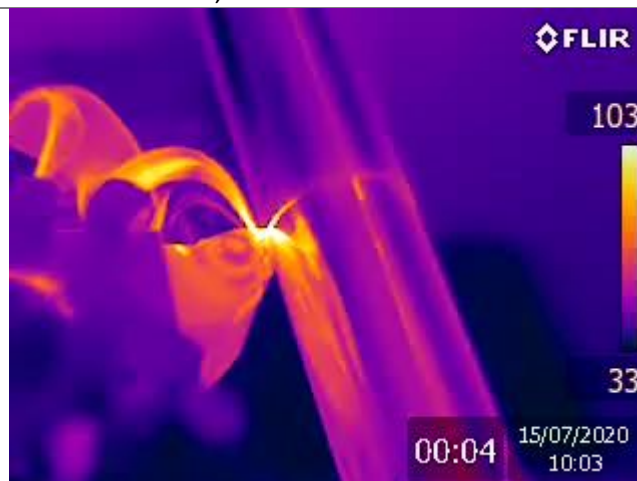


Figura A.14 Imagen térmica del ensayo 1.14

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
15	1400	0,66	1	37	168

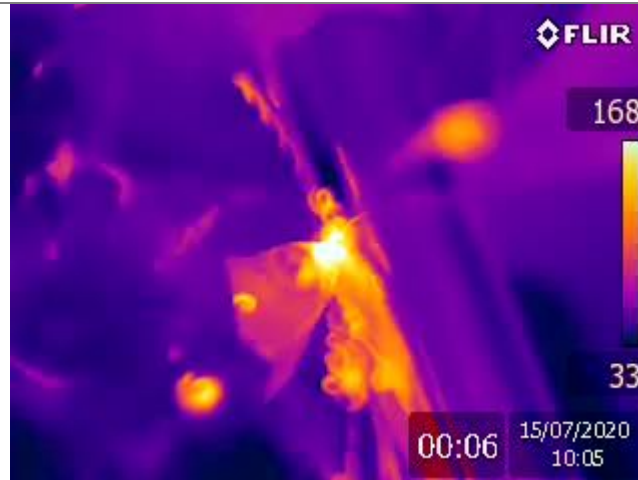


Figura A.15 Imagen térmica del ensayo 1.15

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
16	860	0,047	1	35	154

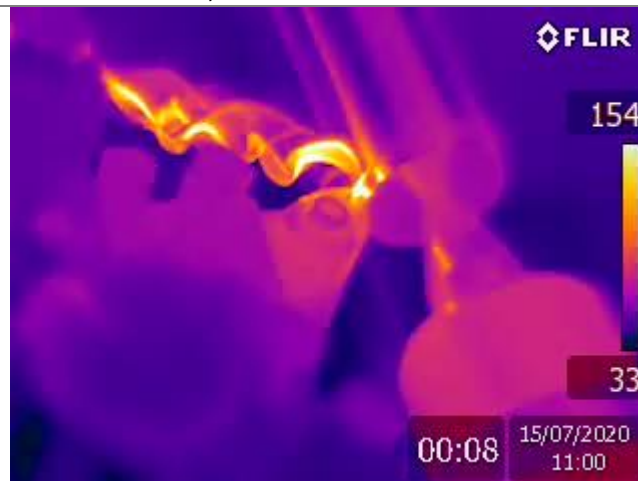


Figura A.16 Imagen térmica del ensayo 1.16

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
17	860	0,12	1	35	146

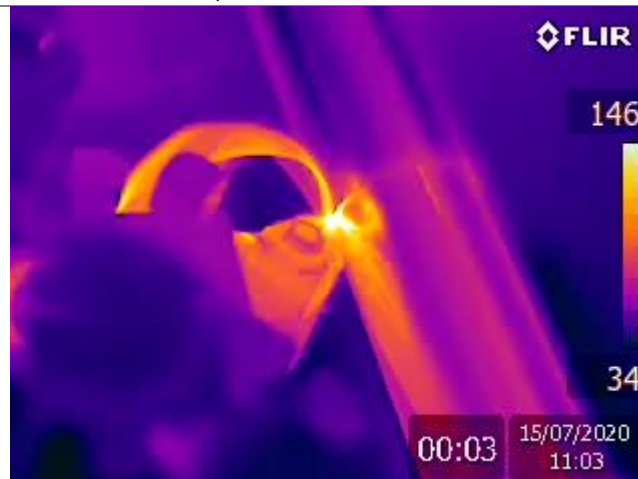


Figura A.17 Imagen térmica del ensayo 1.17

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
18	860	0,66	1	35	182



Figura A.18 Imagen térmica del ensayo 1.18

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
19	2000	0,047	1,5	39	190



Figura A.19 Imagen térmica del ensayo 1.19

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
20	2000	0,12	1,5	39	183

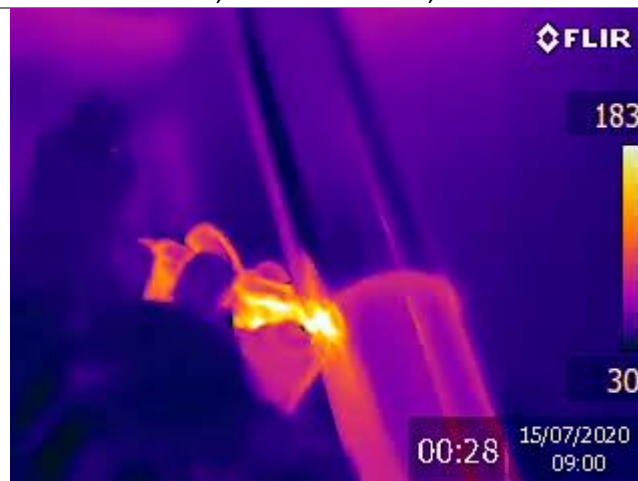


Figura A.20 Imagen térmica del ensayo 1.20

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
21	2000	0,66	1,5	39	159

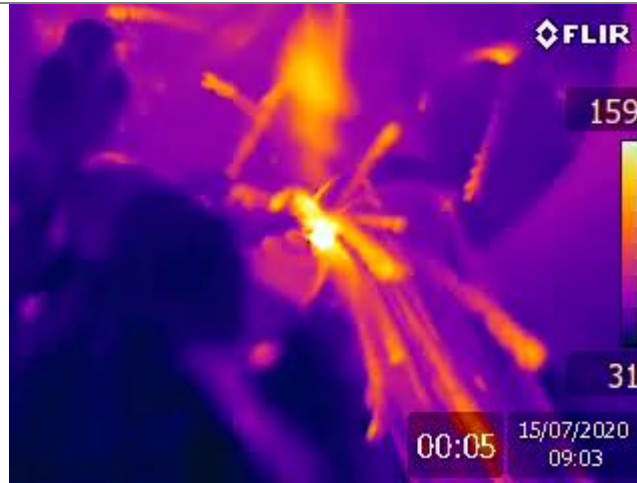


Figura A.21 Imagen térmica del ensayo 1.21

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
22	1400	0,047	1,5	37	189



Figura A.22 Imagen térmica del ensayo 1.22

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
23	1400	0,12	1,5	37	155

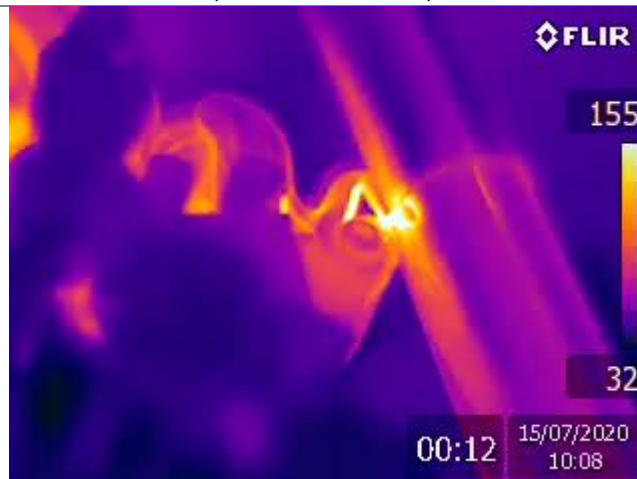


Figura A.23 Imagen térmica del ensayo 1.23

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
24	1400	0,66	1,5	37	221



Figura A.24 Imagen térmica del ensayo 1.24

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
25	860	0,047	1,5	35	246

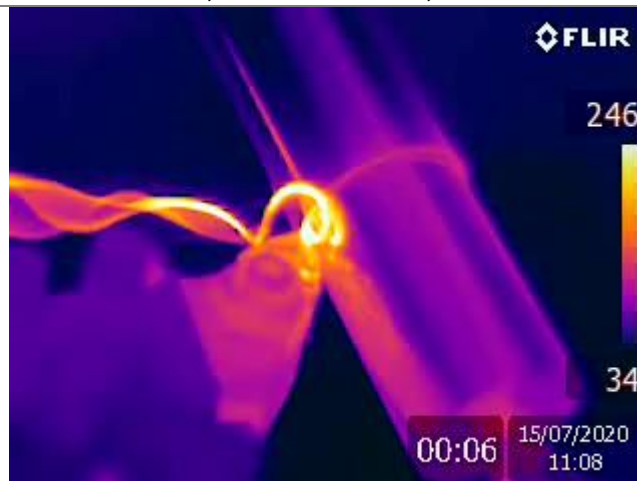


Figura A.25 Imagen térmica del ensayo 1.25

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
26	860	0,12	1,5	35	187



Figura A.26 Imagen térmica del ensayo 1.26

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
27	860	0,66	1,5	35	213



Figura A.27 Imagen térmica del ensayo 1.27

B. ANEXO B: IMÁGENES TÉRMICAS DEL ENSAYO 2

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
1	2000	0,047	0,5	40	150



Figura B.1 Imagen térmica del ensayo 2.1

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
2	2000	0,12	0,5	40	106

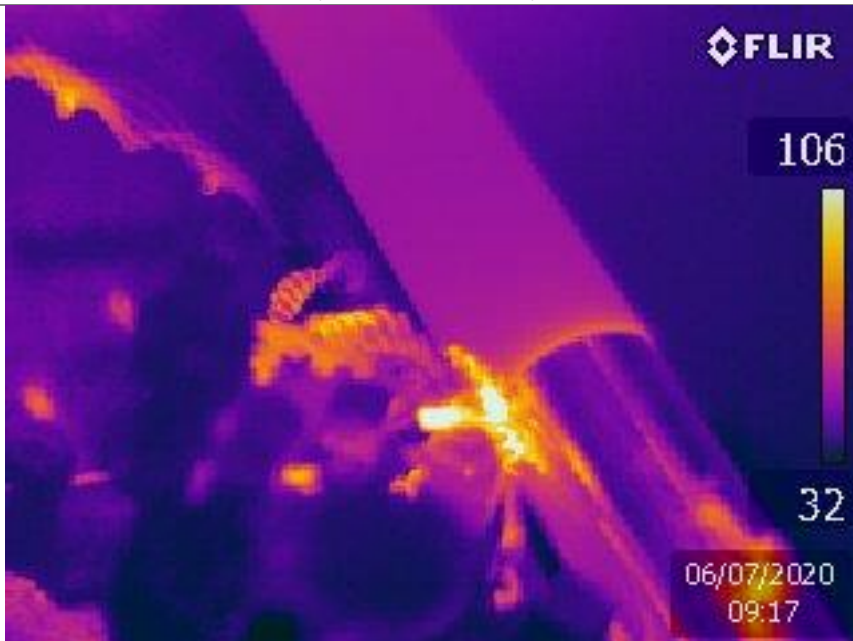


Figura B.2 Imagen térmica del ensayo 2.2

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
3	2000	0,66	0,5	40	149



Figura B.3 Imagen térmica del ensayo 2.3

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
4	2000	0,047	0,5	39,5	114



Figura B.4 Imagen térmica del ensayo 2.4

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
5	2000	0,12	0,5	39,5	80

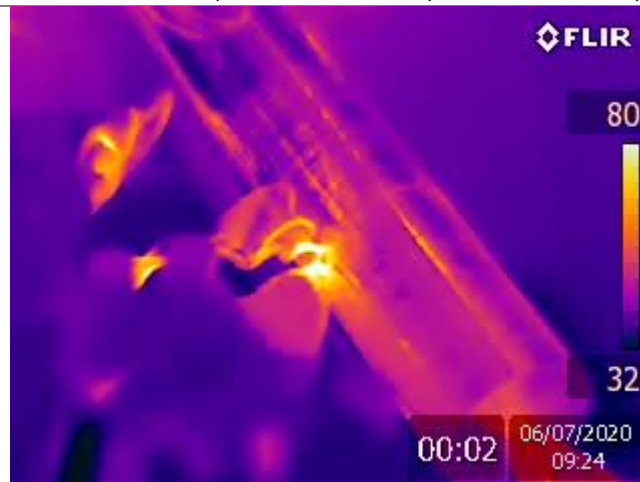


Figura B.5 Imagen térmica del ensayo 2.5

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
6	2000	0,66	0,5	39,5	102



Figura B.6 Imagen térmica del ensayo 2.6

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
7	2000	0,047	0,5	39	150



Figura B.7 Imagen térmica del ensayo 2.7

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
8	2000	0,12	0,5	39	90



Figura B.8 Imagen térmica del ensayo 2.8

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
9	2000	0,66	0,5	39	115

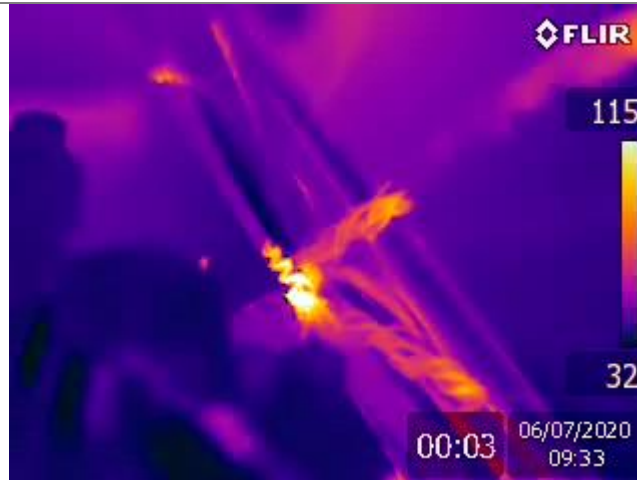


Figura B.9 Imagen térmica del ensayo 2.9

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
10	2000	0,047	0,5	38,5	145



Figura B.10 Imagen térmica del ensayo 2.10

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
11	2000	0,12	0,5	38,5	83



Figura B.11 Imagen térmica del ensayo 2.11

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
12	2000	0,66	0,5	38,5	119

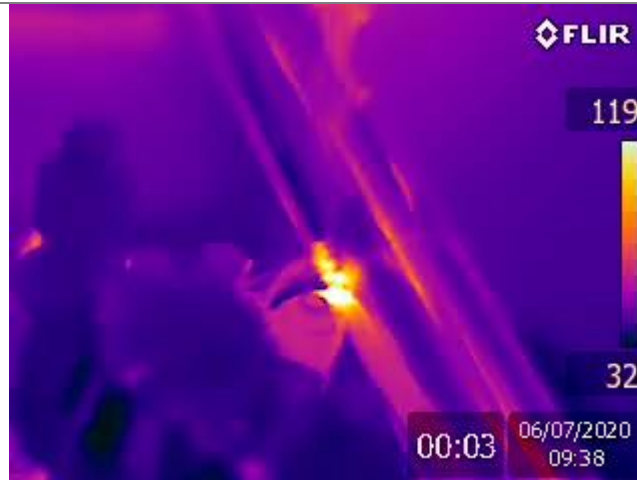


Figura B.12 Imagen térmica del ensayo 2.12

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
13	2000	0,047	0,5	38	127

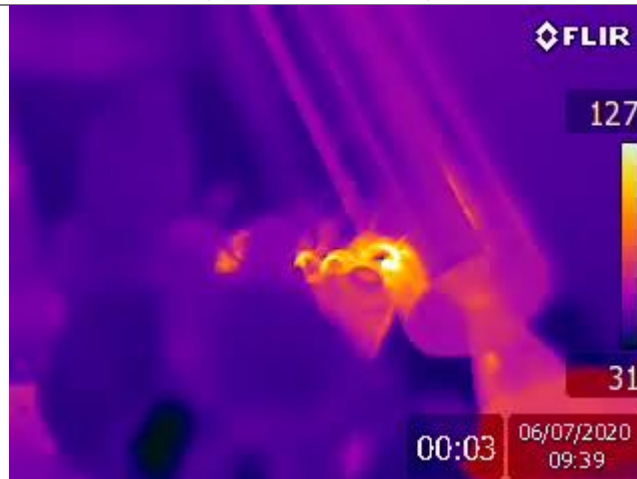


Figura B.13 Imagen térmica del ensayo 2.13

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
14	2000	0,12	0,5	38	88



Figura B.14 Imagen térmica del ensayo 2.14

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
15	2000	0,66	0,5	38	118

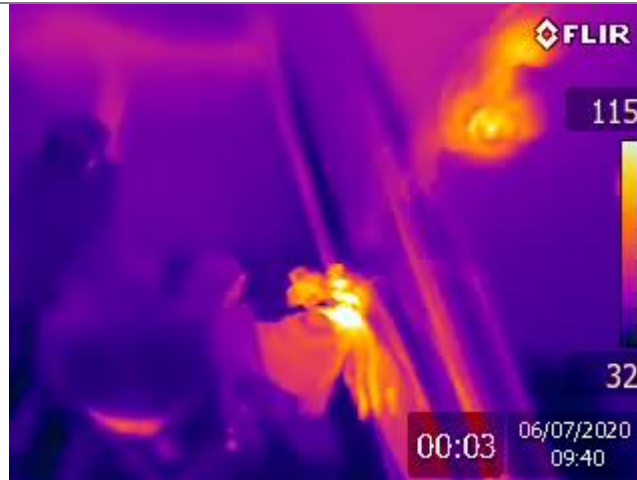


Figura B.15 Imagen térmica del ensayo 2.15

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
16	2000	0,047	0,5	37,5	149



Figura B.16 Imagen térmica del ensayo 2.16

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
17	2000	0,12	0,5	37,5	83



Figura B.17 Imagen térmica del ensayo 2.17

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
18	2000	0,66	0,5	37,5	113



Figura B.18 Imagen térmica del ensayo 2.18

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
19	2000	0,047	0,5	37	144



Figura B.19 Imagen térmica del ensayo 2.19

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
20	2000	0,12	0,5	37	81



Figura B.20 Imagen térmica del ensayo 2.20

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
21	2000	0,66	0,5	37	110



Figura B.21 Imagen térmica del ensayo 2.21

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
22	2000	0,047	0,5	36,5	150



Figura B.22 Imagen térmica del ensayo 2.22

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
23	2000	0,12	0,5	36,5	83

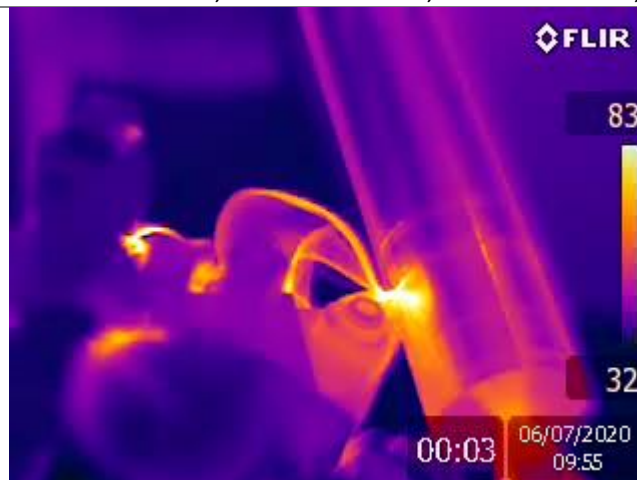


Figura B.23 Imagen térmica del ensayo 2.23

Número	N [rpm]	f [mm/rev]	ap [mm]	D [mm]	T _{max} [°C]
24	2000	0,66	0,5	36,5	111



Figura B.24 Imagen térmica del ensayo 2.24