

Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

Influencia de Parámetros de Corte en la Rugosidad  
Superficial en Procesos de Fresado

Autor: Alejandro Gonzalo Erviti Lara

Tutora: Aída Estévez Urrea

Dep. de Ingeniería Mecánica y de Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015









Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Influencia de Parámetros de Corte en la Rugosidad Superficial en Procesos de Fresado**

Autor:

Alejandro Gonzalo Erviti Lara

Tutora:

Aída Estévez Urra

Profesora Colaboradora

Dep. de Ingeniería Mecánica y de Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo de Fin de Grado: Influencia de Parámetros de Corte en la Rugosidad Superficial en Procesos de Fresado

Autor: Alejandro Gonzalo Erviti Lara

Tutora: Aída Estévez Urrea

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal





# Agradecimientos

---

Este proyecto es el resultado del esfuerzo de todos los que han colaborado en él, por eso quiero hacer especial mención a mi tutora del proyecto de fin de grado, Aída Estévez Urrea y al maestro de taller Manuel Sánchez Quiles por la ayuda, la implicación continua prestada y los conocimientos que me han transmitido durante la realización del mismo. De igual manera agradecer a todos aquellos que me han acompañado hasta llegar hasta esta meta, que me han apoyado y sentido mis victorias y mis derrotas como propias, gracias.

*Alejandro Gonzalo Erviti Lara*

*Sevilla, 2015*



# ÍNDICE

Capítulo		Página
<b>1.</b>	<b>Introducción</b> .....	1
1.1	<i>Antecedentes</i> .....	1
1.2	<i>Objetivos</i> .....	2
1.3	<i>Tareas a desarrollar</i> .....	2
<b>2.</b>	<b>Normativas</b> .....	5
2.1	<i>Norma ISO 8688 Tool life testing in milling</i> .....	5
2.1.1	<i>Norma ISO 8688-1 Face milling</i> .....	5
2.1.2	<i>Norma ISO 8688-2 End milling</i> .....	6
2.2	<i>Norma UNE 4288 Especificación geométrica de productos (GPS)</i> .....	8
<b>3.</b>	<b>Parte experimental</b> .....	9
3.1	<i>Equipos</i> .....	9
3.1.1	<i>Máquina-herramienta</i> .....	9
3.1.2	<i>Rugosímetro</i> .....	9
3.1.3	<i>Microscopio</i> .....	10
3.1.4	<i>Durómetro</i> .....	11
3.2	<i>Herramientas</i> .....	11
3.2.1	<i>Fresado frontal</i> .....	11
3.2.2	<i>Fresado combinado</i> .....	12
3.3	<i>Material</i> .....	12
3.3.1	<i>Fresado frontal</i> .....	12
3.3.2	<i>Fresado combinado</i> .....	13
3.4	<i>Condiciones de corte</i> .....	14
3.4.1	<i>Fresado frontal</i> .....	14
3.4.2	<i>Fresado combinado</i> .....	15
3.5	<i>Procedimiento experimental</i> .....	16
3.5.1	<i>Fresado frontal</i> .....	16
3.5.2	<i>Fresado combinado</i> .....	19
<b>4.</b>	<b>Resultados</b> .....	23
4.1	<i>Fresado frontal</i> .....	25
4.1.1	<i>Influencia del avance</i> .....	26
4.1.2	<i>Influencia de la velocidad de corte</i> .....	28
4.1.3	<i>Influencia del material</i> .....	29
4.1.4	<i>Influencia de los fluidos de corte</i> .....	29
4.1.5	<i>Incidencia</i> .....	30
4.2	<i>Fresado combinado</i> .....	31
4.2.1	<i>Influencia del avance</i> .....	32
4.2.2	<i>Influencia de la velocidad de corte</i> .....	34
4.2.3	<i>Influencia del material</i> .....	37
4.2.4	<i>Influencia de los fluidos de corte</i> .....	38
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	39
<b>6.</b>	<b>Trabajos futuros</b> .....	41
<b>7.</b>	<b>Bibliografía</b> .....	43
	<b>Índice de figuras</b> .....	45
	<b>Índice de tablas</b> .....	47
<b>Anexos</b>		
I.	<i>Medidas de rugosidad</i> .....	I-1
II.	<i>Perfiles de rugosidad</i> .....	II-2



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

En las piezas obtenidas mediante operaciones de mecanizado se generan superficies que influyen en la vida, el rendimiento, la duración y la salida comercial que pueda tener dicha pieza. Por los motivos anteriormente expuestos resulta importante conocer como poder obtener acabados superficiales óptimos para su aplicación final y gran importancia de esto reside en los parámetros de corte que se empleen en su proceso de fabricación.

Como consecuencia las empresas que emplean procesos de mecanizado buscan la mejora continua que haga minimizar tiempos y costes de producción, de ahí la importancia de que se realicen estudios referenciados a este aspecto. Algunos estudios donde se tratan temas asociados al acabado superficial en operaciones en procesos de mecanizados son tratados por diferentes autores.

Referidos a estudios de predicción de acabado superficial se puede comprobar cómo Benardos et al. (2002) [1] se plantean varias metodologías y estrategias con el fin de poder predecir el acabado superficial de un producto final en una operación de mecanizado.

La influencia del avance y la velocidad de corte es tratado por Sai et al. (2005) [18] donde estudia la evolución del acabado superficial a través de un método experimental sistemático, motivado por el reemplazamiento del fresado frontal frente a operaciones de torneado en operaciones destinadas al acabado de un producto.

Boothroyd, (2006) [2] plantea mediante la ecuación 1.1 la relación teórica que existe entre la rugosidad superficial, el avance y el diámetro de la fresa en procesos de fresado. La rugosidad superficial se representa como la rugosidad media aritmética del perfil en la longitud medida (figura 1.1) y matemáticamente se define como se muestra en la ecuación 1.2.

$$Ra = \frac{0,0642}{D} \times f^2 \quad (1.1)$$

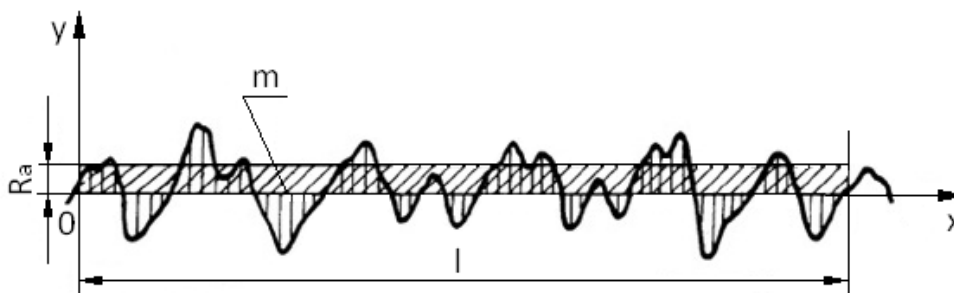


Figura 1.1 Perfil de rugosidad

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (1.2)$$

La dureza como un parámetro con el que poder estimar el acabado superficial final en una operación es tenido en cuenta por Wuyi Chen (1997) [23] que, aunque objeto directo de su estudio, es mencionado

como una observación de su estudio. Otro estudio que trabaja con la dureza como variable influyente de un mismo acero obtenido mediante diferentes tratamientos térmicos es abordado por Rodrigues et al (2010) [16].

La existencia de las dificultades de mecanizar el titanio, un material con un gran campo de aplicación, es estudiado por Sun et al. (2008) [19] donde analiza los parámetros de corte que logren mermar los impedimentos que estos materiales presentan ante un fresado combinado.

Tomando como parámetros variables el avance y la velocidad se encuentra el estudio del artículo de Korkut et. al (2005) [8] que busca asociar los efectos que tienen sobre las fuerzas de corte, el acabado superficial y la longitud de viruta en operaciones de fresado frontal.

Asociando al efecto que generaría el uso de fluido de corte Vieira et al. (2001) [22] en su artículo afronta los beneficios que pueden ocasionar en operaciones de fresado frontal sobre aceros.

Así es comprobable la importancia y el interés por la predicción del acabado superficial en operaciones de mecanizado.

## 1.2 Objetivos

Este proyecto se centrará en el estudio de la influencia de unos parámetros de corte de forma conjunta en el acabado superficial en procesos de fresado frontal y combinados, llevados a cabo en el taller de mecanizado de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

Se trabajará sobre 6 materiales diferentes (aceros de diferentes tipos) determinando la influencia del avance y la velocidad de corte sobre cada uno de ellos, a partir de la medición de la rugosidad superficial obtenida en cada caso.

En el caso del fresado frontal se estudiará además la influencia que tiene sobre el acabado superficial el empleo de fluidos de corte.

Los resultados experimentales serán comparados tanto con los resultados teóricos como entre ellos para poder de este modo distinguir y poder entender las consecuencias de los datos recopilados.

## 1.3 Tareas a desarrollar

Como primer paso se eligen, se caracterizan y se preparan con sus respectivas dimensiones geométricas que se han predefinido los 3 aceros diferentes para el fresado frontal y 6 para el fresado combinado. Para esta preparación así como para diferentes aspectos de los ensayos, se han seguido las recomendaciones de la norma *ISO 8688 Tool life testing in milling*.

Se realizarán ensayos sobre las probetas a diferentes velocidades de corte, a diferentes avances por diente y empleando fluido de corte y sin él con el fin de ver el comportamiento que adquiere cada probeta ante cada exigencia de mecanizado diferente.

Una vez mecanizadas las se procederá a la medición del acabado superficial de su superficie. Dichos valores serán procesados estadísticamente con el fin de encontrar un comportamiento identificativo para cada material en cada una de las condiciones de corte empleadas.

Al mismo tiempo se comparará el resultado obtenido con el teórico. Seguidamente se hará uso del microscopio electrónico para ver la huella dejada por la herramienta y poder obtener más información que esclarezca la influencia que causan las variaciones de la velocidad de corte y el avance por diente en

un proceso de fabricación de este tipo.

Después de cada ensayo se comprobará que la herramienta no haya sufrido ningún daño o algún tipo de desgaste que afecte a su correcto funcionamiento, ya que de ser así no se recopilaría datos representativos y no en las mismas condiciones, por lo que no serían posible comparación alguna entre los diferentes aceros empleados.





## 2 NORMATIVAS

### 2.1 Norma ISO 8688 Tool life testing in milling

Para la realización de los ensayos se hará uso de la norma *ISO 8688 Tool life testing in milling*, especialmente de las partes 1 y 2 que se refieren a fresado frontal y fresado combinado. Aunque no es específica de los ensayos a realizar y evaluar en este proyecto, sí servirá para unificar procedimientos y dar fiabilidad a la comparación con otros ensayos realizados.

#### 2.1.1 Norma ISO 8688-1 Face milling

La primera parte de la norma ISO 8688 está dedicada al fresado frontal, que es un proceso de mecanizado en el cual se hace uso de una fresa frontal para eliminar material como se muestra en la figura 2.1. La fresa frontal puede estar fabricada de aceros rápidos o de insertos. Se monta en el husillo de la fresadora y gira según un eje perpendicular a la superficie de trabajo. También se le puede proporcionar una inclinación para generar otras superficies.

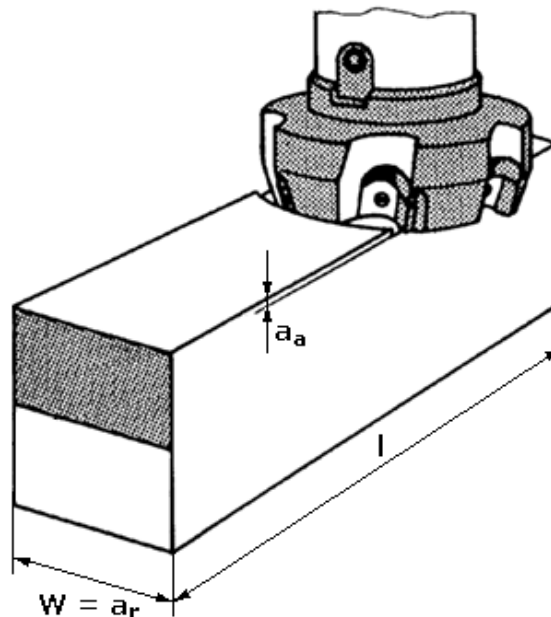


Figura 2.1 Fresado frontal

La norma establece una serie de recomendaciones para la ejecución de los ensayos. Estas son:

- Materiales  
Se recomiendan el acero AISI 1045 y la fundición según ISO 185/R grado 25
- Dimensiones de las probetas  
Las probetas deben ser de sección transversal rectangular y su ancho debe ser 0,6 veces el diámetro de la fresa y una longitud de 3 veces el diámetro de la fresa.
- Fluido de corte  
En caso de utilizarse fluido de corte, este ha de tener un caudal mínimo de 3 l/min.

— Herramienta

Se recomienda el uso de una fresa de 125 mm de diámetro y 6 insertos.

— Condiciones de corte

Las condiciones de corte recomendadas son diferentes para los diferentes ensayos que propone, como se indican en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Condiciones de corte fresado frontal

Condiciones de corte		I	II	III	IV
Profundidad axial de corte $a_a$	mm	2,5	2,5	2,5	4
Profundidad radial de corte <sup>1)</sup> $a_r$	mm	0,6D <sup>2)</sup>			
Avance $f_z$	mm/diente	0,125	0,2	0,315	0,5

<sup>1)</sup> En este caso particular, la profundidad es igual al ancho de la probeta.

<sup>2)</sup> D = diámetro de la fresa.

En los casos donde los valores de avance por diente no sean practicables se usarán valores lo más próximos posibles. Cabe recalcar que las condiciones de corte han de ser compatibles con la herramienta de corte, la fresadora, elementos de fijación, etc. En cuanto a velocidad de corte se recomienda que se utilice una velocidad de 180 m/min aproximadamente

### 2.1.2 Norma ISO 8688-2 End milling

La segunda parte de la norma ISO 8688 está dedicada al fresado combinado. El proceso de fresado combinado se lleva a cabo haciendo uso de una fresa que mecaniza dos superficies, una paralela y otra perpendicular a la superficie de trabajo, debido a que dicha fresa posee tanto filos frontales como filos de contorno. En el fresado combinado se establecen diferencias cuando se trata de mecanizar superficies con una profundidad axial mayor que la radial (figura 2.2) y para el caso en que la profundidad radial sea mayor que la axial (figura 2.3).

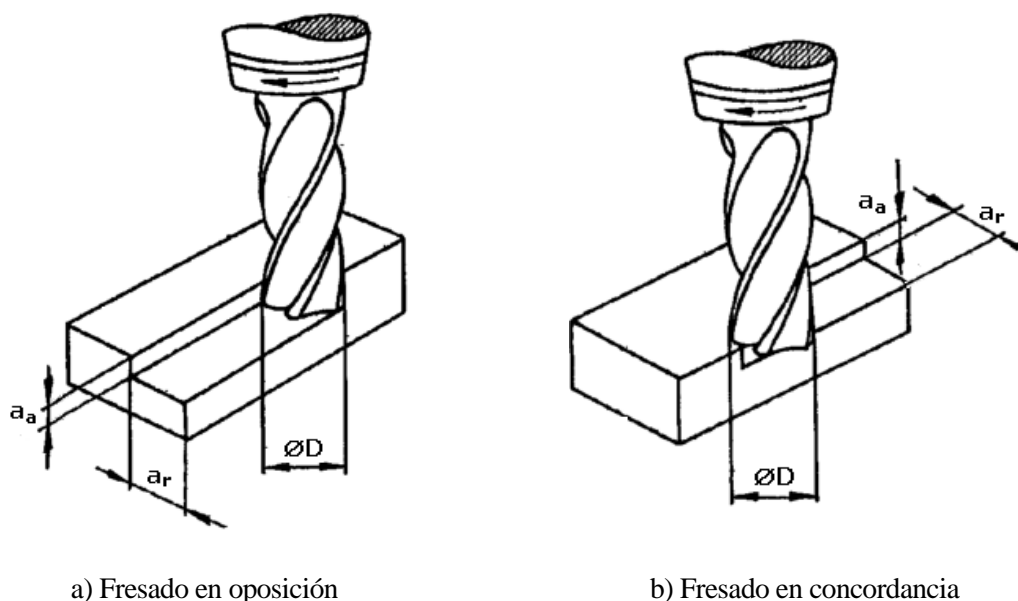
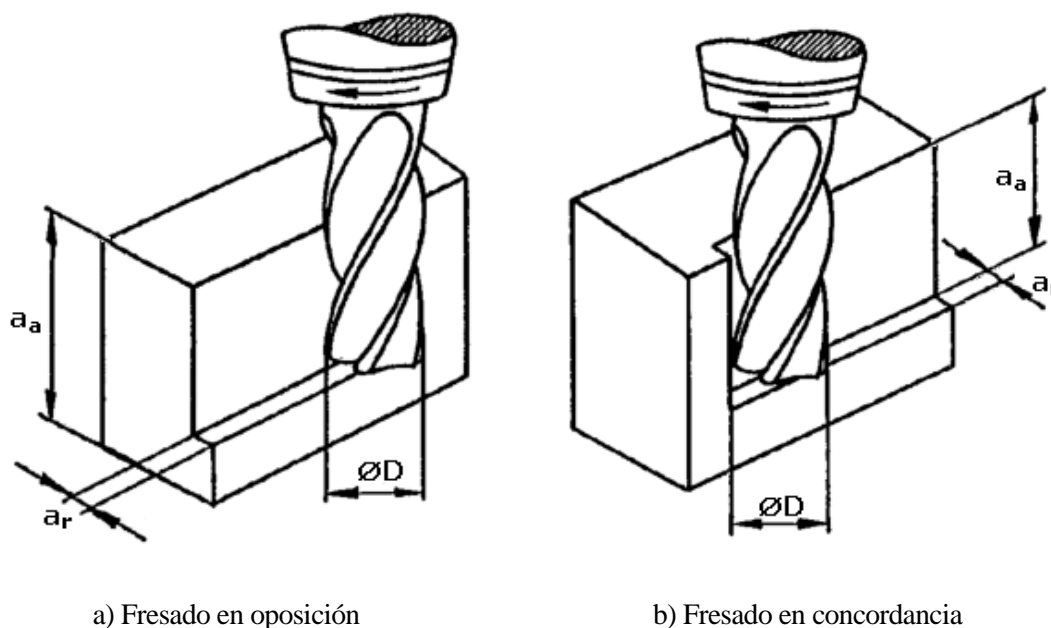


Figura 2.2 Fresado combinado ( $a_a > a_r$ )


 Figura 2.3 Fresado combinado ( $a_a < a_r$ )

La norma establece una serie de recomendaciones para la ejecución de los ensayos. Estas son:

- Materiales  
Se recomiendan el acero AISI 1045 y la fundición según ISO 185/R grado 25
- Dimensiones de las probetas  
La sección de la probeta tiene que ser rectangular y sus dimensiones se recomiendan que tengan un ancho que sea de 2 veces el diámetro de la fresa y una longitud que sea 10 veces el diámetro de la fresa
- Fluido de corte  
En caso de utilizarse fluido de corte, este ha de tener un caudal mínimo de 3 l/min.
- Herramienta  
Las fresas recomendadas son dos que se diferencian solo en el número de filos, una de 2 filos y otra con 4 filos, con un diámetro de 25 mm y una longitud de 121 mm.
- Condiciones de corte  
Las condiciones de corte recomendadas son diferentes para los diferentes ensayos que propone, como se indican en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Condiciones de corte fresado combinado.

Condiciones de corte		I	II	III	IV
		$a_a > a_r$ (ver figura 2.2)		$a_a < a_r$ (ver figura 2.3)	
Profundidad axial de corte $a_a$	mm	20	20	12,5	12,5
Profundidad radial de corte <sup>1)</sup> $a_r$	mm	2,5	2,5	20	20
Avance $f_z$	mm/diente	0,08	0,125	0,08	0,08

<sup>1)</sup> La profundidad radial máxima es 0,8 veces el diámetro de la fresa.

Las condiciones de corte han de ser compatibles con la herramienta de corte, la fresadora, elementos de fijación, etc. La profundidad máxima radial será 0,8 veces el diámetro en los ensayos. La velocidad de corte recomendada es de aproximadamente 30 m/min para aceros rápidos S2 y S4, y de 35 m/min para aceros rápidos S8 y S11, según la clasificación SAE para aceros rápidos [5].

## 2.2 Norma UNE 4288 Especificación geométrica de productos (GPS)

Para la medición de la rugosidad superficial se ha hecho uso de la norma UNE 4288 Especificación geométrica de productos (GPS) donde se determinan las reglas y procedimientos a seguir con el fin de poder comparar con los límites de tolerancia de los valores adquiridos de los parámetros del acabado superficial leídos.

En esta norma entre otros aspectos que son tratados, se ha seguido principalmente el apartado de *Reglas y Procedimientos de verificación utilizando instrumentos de palpador*, cuyo fin es la elección de la longitud básica de muestreo en función de los valores de Ra. Como el perfil generado es no periódico, mediante el valor teórico de Ra se asigna el valor de longitud básica de muestreo correspondiente al intervalo en el que se encuentra, según se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Longitudes básicas de muestreo

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Longitud básica de muestreo de rugosidad $l_r$ [mm]	Longitud de evaluación de rugosidad $l_n$ [mm]
$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

Se realiza una medida con la longitud básica de muestreo recomendada por la tabla y con el valor obtenido de Ra, se vuelve nuevamente a la misma tabla y se comprueba si dicho valor se encuentra en el intervalo estimado inicialmente. De no cumplirse se hace elige una nueva longitud de muestreo que se corresponda con el valor de Ra medido.

## 3 PARTE EXPERIMENTAL

En la ejecución de los experimentos se han determinado los elementos a utilizar y las condiciones en las cuales van a operar.

### 3.1 Equipos

#### 3.1.1 Máquina-herramienta

La máquina-herramienta empleada ha sido una fresadora marca Jarbe modelo CM-60 que se muestra en la figura 3.1 y cuyas especificaciones técnicas aparecen en la tabla 3.1



Tabla 3.1 Especificaciones técnica de la fresadora CM-60

Características	Dimensiones
Superficie útil de la mesa	1050 x 240 mm
Movimiento longitudinal automático	780 mm
Movimiento transversal automático	300 mm
Movimiento vertical automático	400 mm
Paso de los usillos	5 mm
Mesa con giro a cada lado	45°
Velocidades del eje portafresas	12
Vueltas por minutos del portafresas	De 50 a 1250 rpm
Eje portafresas	Cono ISA 1 ¾
Avances automáticos	12
Movimientos de los avances	De 9 a 625 mm/min
Retroceso rápidos de los avances longitudinal y vertical	2000 mm/min
Retroceso rápido del avance vertical	1000 mm/min
Motor de la caja de velocidades	3 HP
Motor de la caja de avances	1,5 HP
Motobomba de refrigeración	0,1 HP

Figura 3.1 Fresadora CM-60

#### 3.1.2 Rugosímetro

El equipo que se ha utilizado para la lectura de los acabados superficiales generados en las probetas es el modelo M1 del fabricante Mahr, que se muestra en la figura 3.2 y cuyas características se indican en la tabla 3.2.



Palpador



Unidad de medida

Figura 3.2 Rugosímetro M1

Tabla 3.2 Especificaciones técnicas rugosímetro M1

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

### 3.1.3 Microscopio óptico

Para observar las huellas dejadas en las operaciones de fresado y sacar más información para entender el comportamiento que tiene cada probeta, se usa el microscopio óptico Nikon modelo SMZ800 (figura 3.3). Se ha usado una fuente luminosa modelo Intralux 4100. Las características técnicas se indican en la tabla 3.3.



Tabla 3.3 Especificaciones técnicas microscopio óptico SMZ800

Sistema óptico	Sistema de zoom óptico paralelo
Software	KAPPA Imagebase
Aumentos	x10 / x20 / x30 / x40 / x50 / x6,3

Figura 3.3 Microscopio óptico SMZ 800

### 3.1.4 Durómetro

Para la caracterización de los aceros en cuanto a dureza ha sido utilizado el durómetro modelo M4U-025 del fabricante EMCOTest automatic (figura 3.4). Se determinó la dureza Brinell de los aceros aplicando una carga de  $187,5 \text{ kg/cm}^2$  con una bola de  $2,5 \text{ mm}$  de diámetro.



Figura 3.4 Durómetro M4U-025

## 3.2 Herramientas

### 3.2.1 Fresado frontal

Para el fresado frontal se hará uso de un portaplaquitas de modelo ASX445-080A06R del fabricante Mitsubishi según se muestra en la figura 3.5.

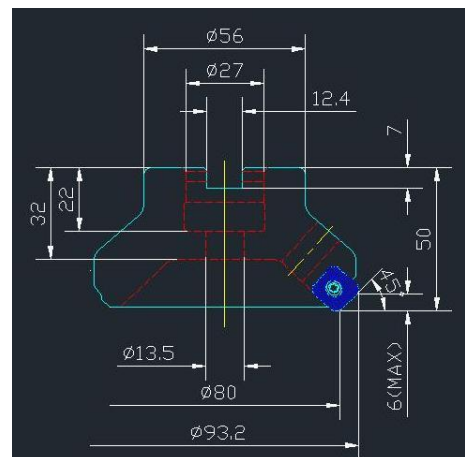


Figura 3.5 Portaplaquitas

El número de insertos que son montados en el portaplaquitas son 6 cuyo modelo es SEMT13T3AGSN-JM de grado F7030 del fabricante Mitsubishi. Ver figura 3.6.

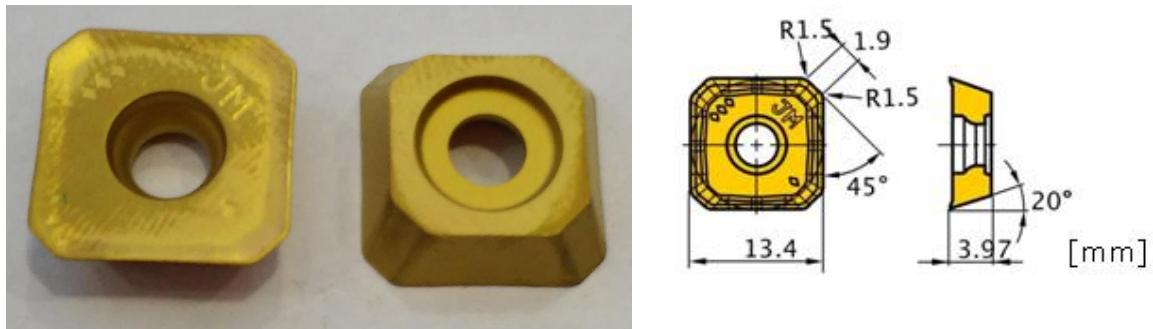


Figura 3.6. Plaquita SEMT13T3AGSN-JM.

### 3.2.2 Fresado combinado

Para el fresado combinado ha sido usada una fresa de dos filos modelo STD A9 9040 de acero rápido, diámetro de 12 mm, con una longitud de corte igual a 16 mm y una longitud total de 72 mm del fabricante UNCETA. Ver figura 3.7.



Figura 3.7. Fresa STD A9 9040

## 3.3 Material

### 3.3.1 Fresado frontal

Se han empleado 3 tipos de acero que estaban disponibles en el taller, de los cuales no se sabía su clasificación. De ahí que se les determinara su composición química y se les haya medido la dureza Brinell (tabla 3.4) para poder hacer su clasificación.



Tabla 3.4. Composición química y dureza de los aceros empleados frontal

Material	Composición química [%]								Dureza Brinell (HB) (2,5 mm/187,5 kg)
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	
Acero 1	0,145	0,79	0,21	0,027	0,016	0,16	0,13	0,025	146,4
Acero 2	0,422	0,83	0,26	0,027	0,014	0,12	0,12	0,024	221,8
Acero 3	0,311	0,45	0,30	0,012	0,008	2,04	2,04	0,44	203,6

Del análisis anterior se clasificaron los aceros [bibliografía] y se estableció la siguiente correspondencia:

Acero 1: AISI 1013

Acero 2: AISI 1040

Acero 3: AISI 1030

Las probetas se fabricaron siguiendo las dimensiones recomendadas por la norma 8688-1 y según la disponibilidad del mismo. Las dimensiones se indican en la tabla 3.5 y las probetas se muestran en la figura 3.8.

Tabla 3.5 Dimensiones de las probetas para el fresado frontal

	Dimensiones [mm]		
	Ancho	Alto	Largo
AISI 1013	48,2	48	180
AISI 1040	68,1	30	180
AISI 1030	68	68	180

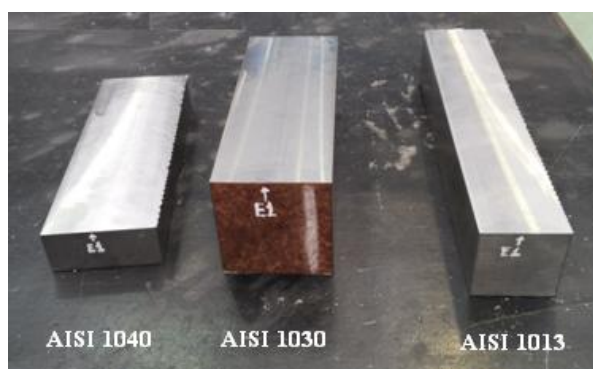


Figura 3.8 Probetas para fresado frontal

### 3.3.2 Fresado combinado

Como ha sido comentado antes, los aceros usados en el fresado frontal son empleados en el fresado combinado. Las composiciones químicas de los aceros no especificadas aun y sus respectivas durezas son las que se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Composición química y dureza de los aceros empleados

Material	Composición química [%]					Dureza Brinell HB (2,5 mm/187,5 kg)
	C	Mn	Si	S	P	
AISI 1024	0,43-0,50	0,6-0,9	0,15-0,35	< 0,05	< 0,04	186,4
AISI 1213	0,13	0,7-1,0	< 0,05	0,24-0,33	0,07-0,12	209,2
AISI 1045	0,17-0,24	1,4-1,8	0,17- 0,37	< 0,05	< 0,035	277,6

Las probetas se fabricaron igualmente siguiendo las dimensiones recomendadas por la norma 8688-2 y

según la disponibilidad del mismo. Las dimensiones se indican en la tabla 3.7 y las probetas se muestran en la figura 3.9.

Tabla 3.7 Dimensiones de las probetas para el fresado combinado

	Dimensiones [mm]		
	Ancho	Alto	Largo
AISI 1024	19	21	110
AISI 1213	22	18	132
AISI 1045	17	17	122



Figura 3.9 Probetas para fresado combinado

### 3.4 Condiciones de corte

Una vez se han conocidos los requisitos que recomienda la norma para realización de los ensayos, se da la situación de que no se dispone de todos los medios para cumplir al completo la forma de operar según dicha norma. A continuación se plantean las recomendaciones y las opciones que finalmente se adoptaron para la realización de los ensayos.

#### 3.4.1 Fresado frontal

La norma 8688-1 recomienda el uso de un portaplaquitas de 125 mm de diámetro y 6 insertos, pero se ha usado un portaplaquitas de 80 mm de diámetro con 6 insertos por ser del que se contaba en el taller (figura 3.5).

Así mismo, la profundidad axial de corte debería ser de 2,5 mm. Debido a las condiciones de velocidad de corte, las limitaciones de la máquina-herramienta y la integridad de los insertos, no se puede alcanzar ese valor y se ha empleado una profundidad axial de 1 mm.

En cuanto a la longitud de las probetas, estas debían ser 3 veces el diámetro de la fresa. Por disponibilidad del material las longitudes a ensayar son de 180 mm, aspecto que aunque no cumple con lo planteado por la norma, está dentro del rango de validez para la realización de los ensayos.

En este ensayo, para hacer cumplir los requerimientos de avance por diente bajo una misma velocidad de corte, se presenta el problema de que la velocidad de corte a la que se consiguen dichos avances está por debajo de la velocidad de corte recomendada por el fabricante de la herramienta, que en este caso es de 200 m/min a 300 m/min para mecanizar aceros y por la norma.

Por tanto, de las 3 opciones de velocidad de corte a la que se pueden alcanzar los valores de avance por diente según la máquina herramienta, se tomará el que tenga la velocidad de corte más alta que es de 98 m/min, correspondiente a un régimen de giro igual a 390 rpm. A esta velocidad de corte no se consiguen exactamente los valores de avance por diente recomendados en la norma pero sí valores suficientemente próximos, según se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Comparación de valores recomendados y experimentales para fresado frontal

Velocidad de corte (m/min)			Avance (mm/diente)	
Según ISO 8688-1	Según HTA	Experimental	Según ISO 8688-1	Experimental
180	200 ÷ 300	98,01	0,125	0,119
			0,200	0,178
			0,315	0,267

Para obtener más información sobre la influencia que tiene la velocidad de corte, aún cuando no se está operando en el rango recomendado por el fabricante, se han realizado otros ensayos como se muestra en la tabla 3.9. Para cada valor de velocidad de corte establecida, se ha trabajado en tres valores de avances asociados a ellas.

Tabla 3.9 Valores de velocidades de corte y avances experimentales para fresado frontal

Velocidad de corte (m/min)	Avance experimental (mm/diente)
130,69	0,089
	0,133
	0,200
193,52	0,060
	0,090
	0,135
233,74	0,050
	0,074
	0,112

### 3.4.2 Fresado combinado

La norma ISO 8688-2 recomienda emplear dos herramientas de acero rápido de 2 o 4 filos de 25 mm de diámetro, 45 mm de longitud de corte axial y una longitud axial total de 121 mm. Por disponibilidad de recursos en el taller se ha usado una fresa de 12 mm de diámetro, longitud de corte axial de 16 mm y una longitud axial total de 72 mm (figura 3.7).

Se especifican profundidades de corte tanto axiales como radiales asociadas a la herramienta recomendada (ver tabla 2.2). Estas se han modificado en proporción a la herramienta a emplear, empleándose una profundidad de corte axial de 7,1 mm y una profundidad de corte radial de 1,2 mm

La longitud de las probetas debería ser de 10 veces el diámetro de la fresa, que en este caso sería de 120 mm cumpliéndose esa recomendación en todas menos en una probeta (AISI 1024).

En cuanto al avance por diente, se cumple con las recomendaciones de la norma y se obtienen los siguientes valores de avances que pueden ser comparados con los que nos hace cumplir la norma que son mostrados en la tabla 3.10. La velocidad recomendada para la herramienta ha sido obtenida del catálogo UNCETA [10].

Tabla 3.10 Comparación de valores recomendados y experimentales para fresado combinado

Velocidad de corte (m/min)			Avance (mm/diente)				
Según ISO 8688-2	Según HTA	Experimental	Según ISO 8688-2	Experimental			
S2	30	25 ÷ 32	0,080	0,081			
S4							
S8	35				29,03	0,125	0,121
S11							

Para obtener más información, esta vez variando la velocidad de corte sobre el acabado superficial se han realizado dos ensayos adicionales variando la velocidad de corte imponiendo una superior de 35,06 m/min y otra inferior de 19,60 mm/min, obteniéndose los siguientes avances mostrados en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Valores de velocidades de corte y avances experimentales para fresado combinado

Velocidad de corte (m/min)	Avance experimental (mm/diente)
19,60	0,199
	0,179
35,06	0,067
	0,100

En todos los ensayos se emplea fluido de corte con un caudal de 3,125 l/min, ya que al usar una herramienta de acero rápido, se consiguen mejores condiciones de operación.

### 3.5 Procedimiento experimental

Según lo planteado en los apartados anterior, estableciendo un criterio entre lo que se recomienda y los medios de que se disponen, se determinan las condiciones en las que se realizan los ensayos y las acciones asociadas a ellos, tanto de preparación como de medida posterior.

#### 3.5.1 Fresado frontal

Se toman los tres tipos de acero con los cuales se va a trabajar en su estado de recepción y se adecuan para obtener probetas con la geometría necesaria mediante procesos de mecanizado. En la figura 3.10 se muestra el corte de las probetas a la longitud de ensayo.

Posteriormente se caracterizan los 3 aceros mediante un ensayo Brinell para conocer su dureza (figura 3.11)

Una vez ya tenidas las probetas listas se montan los 6 insertos en el portaplaquitas asegurándose de que ningún inserto, aunque estuviera sin utilizar, no presente ningún defecto visible. Seguidamente se coloca en la máquina-herramienta correctamente y se coloca la probeta.

Una vez montada la probeta mediante mordazas, se establecen las condiciones de corte. En este caso se establecen la velocidad de giro y el avance de la mesa de la máquina-herramienta como se muestra en la figura 3.12.



Figura 3.10 Preparación de probetas



Figura 3.11 Ensayos Brinell frontal



Figura 3.12 Fijación de parámetros de corte

También se fijara el caudal de fluido de corte y su adecuada colocación para que pueda ser lo más efectiva posible cuando sea necesario. Una vez concluido todo se realiza el ensayo. En la figura 3.13 se puede apreciar un instante del proceso de corte.

Cuando finaliza la pasada se comprueba si ha quedado algún resto de viruta en la superficie, se limpia y se confirma que la superficie esta apta para realizar la medición de la rugosidad superficial.

Para la medición de la rugosidad se divide la superficie total mecanizada de la probeta en 3 sectores y dentro de esos sectores se toman medidas en 3 direcciones: en dirección del avance (en ambos sentidos), perpendicular al avance y en sentido diagonal. Esto se muestra en la figura 3.14.



Figura 3.13 Ensayo fresado frontal



Figura 3.14 Sectores y sentidos de medida de Ra

Para realizar las medidas las probetas se colocan sobre una mesa de planitud, teniendo especial cuidado en la correcta colocación de la misma respecto al palpador del rugosímetro, para lo cual se emplean medidas plano paralelas y niveles (figura 3.15). Los parámetros de medida se ajustan según la norma ISO 4288. Se obtendrán tanto el valor de la medida como una representación gráfica de la lectura llevada a cabo.

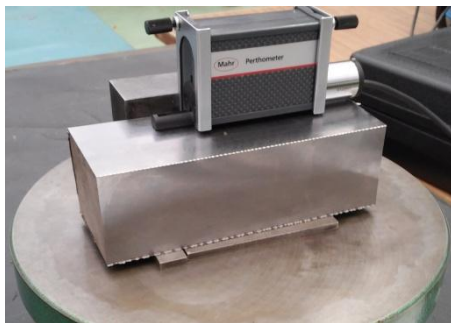


Figura 3.15 Medición de rugosidad en probetas de fresado frontal

Después de realizar el proceso de la medida se realiza una fotografía con el microscopio óptico para ver la huella dejada por los insertos en la operación de mecanizado, con el fin de poder entender un poco más el valor obtenido en la medida (figura 3.16).

Con esto se finalizaría el protocolo a cumplir asociado a un ensayo y que se repetirá en los ensayos posteriores. Antes de comenzar el siguiente sobre otro acero o sobre el mismo acero pero en condiciones de corte diferentes, hay que asegurarse que las plaquitas se encuentran en perfecto estado y no hay signos de desgaste o rotura de filo que proporcionaría un resultado no aceptable.

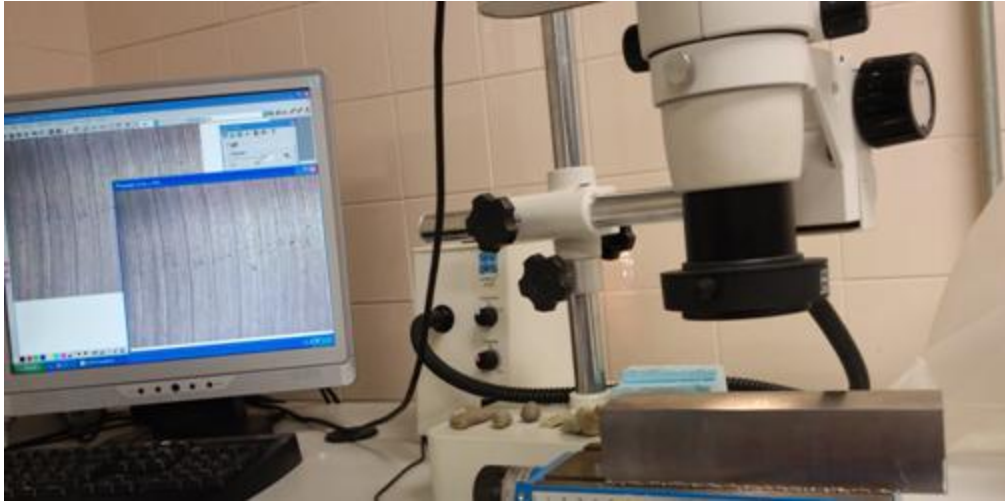


Figura 3.16 Vista de la huella dejada durante el mecanizado

### 3.5.2 Fresado combinado

Inicialmente se tomaran los 6 materiales en su estado de recepción, es decir, en forma de barras y se mecanizaron dándole las dimensiones adecuadas para la realización de los ensayos mediante fresado combinado, según se aprecia en la figura 3.17. Del mismo modo que en el fresado frontal, se determinó la dureza de las probetas mediante ensayo Brinell.



Figura 3.17 Planeado para preparación de una probeta

Una vez están listas las probetas, se fijan a la mesa mediante mordazas y se ajustan los parámetros de corte de la máquina-herramienta (figura 3.12), según cada uno de los ensayos a realizar. Se coloca correctamente el conducto de salida del fluido de corte, de manera que sea lo más efectivo posible. Con todo listo se ajustan las profundidades de corte y se inicia el ensayo (ver figura 3.18).



Figura 3.18 Proceso de fresado combinado

Al terminar el ensayo, se extrae la probeta mecanizada y se realiza una inspección visual sobre la superficie de medición a ver si existe alguna impureza que no permita una buena medida de la misma.

Para la medida de rugosidad se coloca en una mesa de planitud tanto la pieza como el rugosímetro y se realizará la medida de la zona mecanizada según se indica en la figura 3.19. Aquí también se divide la superficie mecanizada en 3 sectores y se mide solo en la dirección del avance. En algunos casos se han usado elementos auxiliares como medidas planoparalelas para ayudar a la correcta medición.



Figura 3.19 Medición de rugosidad en probetas de fresado combinado

Con el fin de tener más información de la superficie se llevará la probeta al microscopio electrónico donde se realizará una fotografía de la superficie mecanizada para observar la huella dejada por la fresa en la superficie. Un ejemplo de esto se aprecia en la figura 3.20



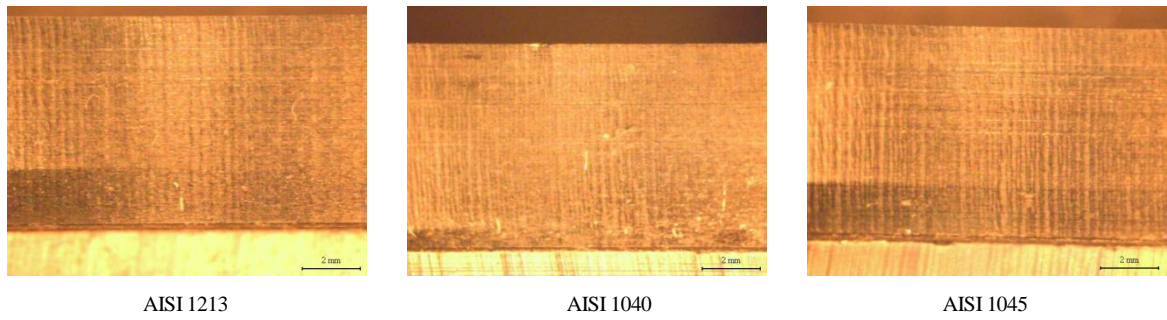


Figura 3.20 Superficie mecanizada por fresado combinado vista al microscopio óptico

De este modo ya se cumpliría el procedimiento en un ensayo. Antes de realizar el siguiente se ha de comprobar que la fresa no presenta desgaste ni rotura de filo, de este modo se volvería a realizar el mismo proceso en el siguiente ensayo.



## 4 RESULTADOS

En las tablas 4.1 y 4.2 se muestran las características de los ensayos realizados con fresado frontal y fresado combinado respectivamente.

Tabla 4.1 Referencia de ensayos realizados en fresado frontal

Ensayo	Conjunto de materiales	Vc (m/min)	f <sub>z</sub> (mm/diente)
1	AISI 1013	98,01	0,119
2			0,178
3			0,267
4		130,69	0,089
5			0,133
6			0,200
7		193,52	0,060
8			0,090
9			0,135
10		233,74	0,050
11			0,074
12			0,112
13	AISI 1030	98,01	0,119
14			0,178
15			0,267
16		130,69	0,089
17			0,133
18			0,200
19		193,52	0,060
20			0,090
21			0,135
22		233,74	0,050
23			0,074
24			0,112
25	AISI 1040	98,01	0,119
26			0,178
27			0,267
28		130,69	0,089
29			0,133
30			0,200
31		193,52	0,060
32			0,090
33			0,135
34		233,74	0,050
35			0,074
36			0,112

Tabla 4.2 Referencia de ensayos realizados en fresado combinado

Ensayo	Conjunto de materiales	Vc (m/min)	f <sub>z</sub> (mm/diente)
1C	AISI 1013	29,03	0,029
2C			0,044
3C			0,054
4C			0,081
5C			0,121
6C		19,60	0,179
7C			0,199
8C		35,06	0,067
9C			0,100
10C	AISI 1024	29,03	0,029
11C			0,044
12C			0,054
13C			0,081
14C			0,121
15C		19,60	0,179
16C			0,199
17C		35,06	0,067
18C			0,100
19C	AISI 1030	29,03	0,029
20C			0,044
21C			0,054
22C			0,081
23C			0,121
24C		19,60	0,179
25C			0,199
26C		35,06	0,067
27C			0,100
28C	AISI 1213	29,03	0,029
29C			0,044
30C			0,054
31C			0,081
32C			0,121
33C		19,60	0,179
34C			0,199
35C		35,06	0,067
36C			0,100
37C	AISI 1040	29,03	0,029
38C			0,044
39C			0,054
40C			0,081
41C			0,121
42C		19,60	0,179
43C			0,199
44C		35,06	0,067
45C			0,100
46C	AISI 1045	29,03	0,029
47C			0,044
48C			0,054
49C			0,081
50C			0,121
51C		19,60	0,179
52C			0,199
53C		35,06	0,067
54C			0,100

#### 4.1 Fresado frontal

Los valores de rugosidad medidos se muestran en las tablas de la I.1 a la I.3 del Anexo I. Se han realizado una media de 10 medidas por probetas. En el anexo II se muestran perfiles de rugosidad medidos de los ensayos, así como las correspondientes fotografías de la superficie mecanizada obtenida.

A pesar de haber medido en diferentes direcciones, en las tablas se reflejan las medidas tomadas en la dirección del avance. A medida que se desarrollaba el estudio se comprobó que no eran fiables las medidas tomadas en las otras direcciones por la gran dispersión que presentaban. Un ejemplo de esto se aprecia en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores de rugosidad medidos en direcciones diferentes a la del avance

Ensayo	Dirección de lectura	Resultados ( $\mu\text{m}$ )						Desviación típica
1	Perpendicular al avance	0,308	0,457	0,686	0,172	0,371	0,461	0,20
		0,722	0,164	0,286				
	Oblicua al avance	0,521	0,485	1,040	0,714	1,239	0,937	0,30
13	Perpendicular al avance	0,446	0,706	0,848	0,147	0,267	0,750	0,23
		0,228	0,528	0,714				
	Oblicua al avance	0,294	0,166	0,874	0,688	0,666	0,536	0,23
		0,611	0,702					
25	Perpendicular al avance	1,314	1,552	2,119	0,581	1,280	0,503	0,52
		0,690	0,977	0,856				
	Oblicua al avance	0,474	1,889	0,823	0,842	1,331	0,799	0,49
		1,686	1,267					

Se hizo un análisis de la superficie al microscopio (figura 4.1) y por la huella obtenida, se llegó a la conclusión de que el valor medido dependía mucho de donde se pusiera el palpador, por lo que se optó por desechar dichos resultados.

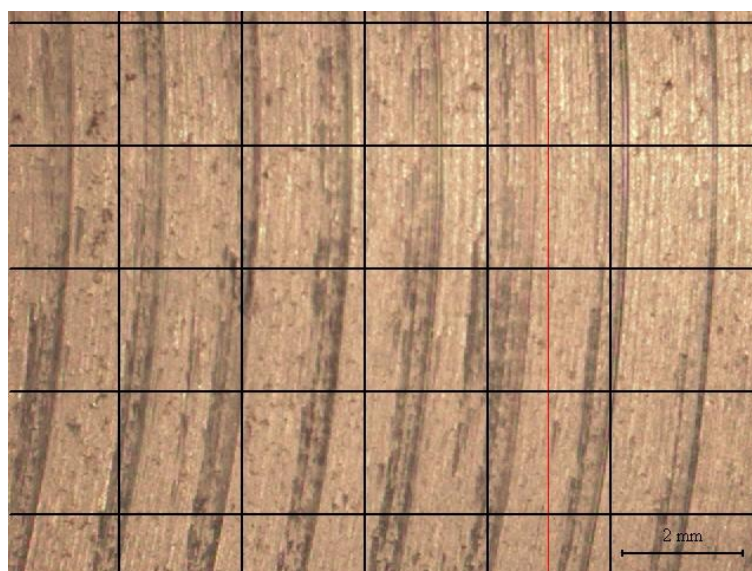


Figura 4.1 Huella de las plaquitas en el fresado frontal

A continuación se analizarán los resultados obtenidos en función de las variables experimentales empleadas.

### 4.1.1 Influencia del avance

Se han representado gráficamente los datos de las tablas de la I.1 a la I.3 mostrando el comportamiento de los materiales estudiados, para los diferentes valores de velocidad de corte y avance. Esto puede apreciarse en las figuras de la 4.2 a la 4.5.

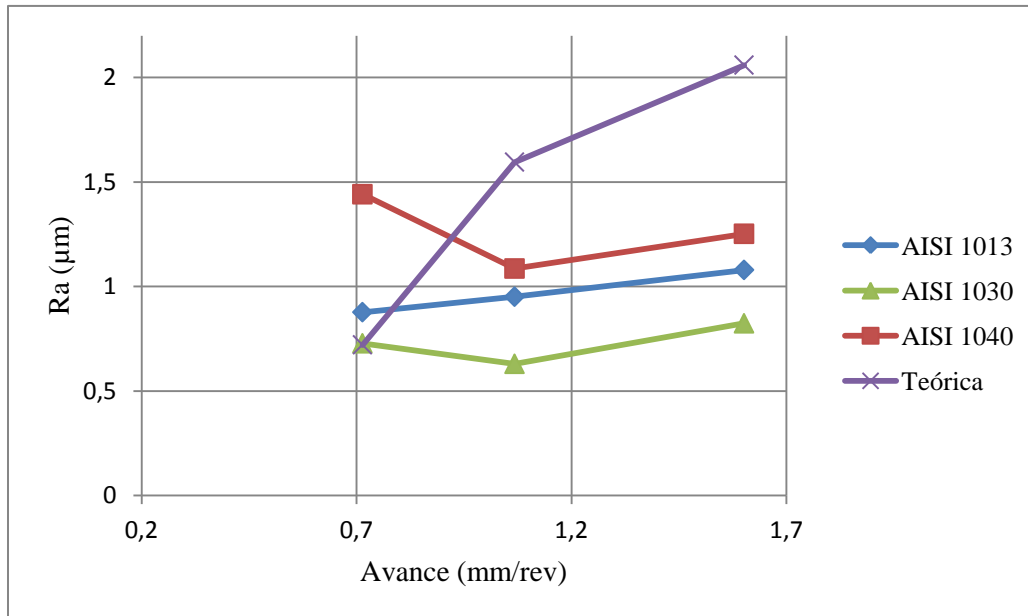


Figura 4.2 Medida de rugosidad en fresado frontal con  $V_c = 98$  m/min

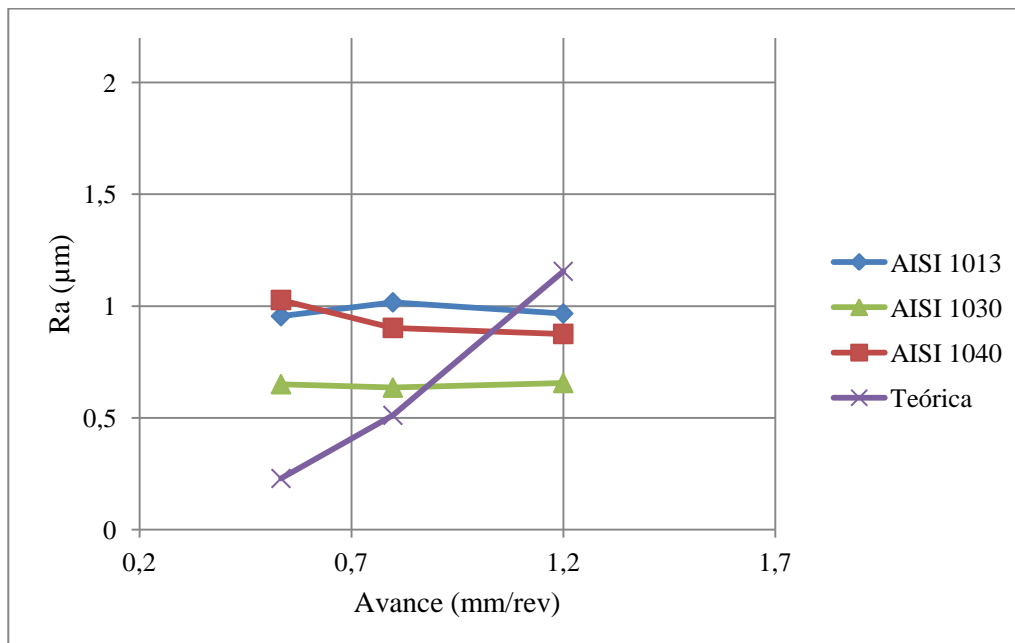
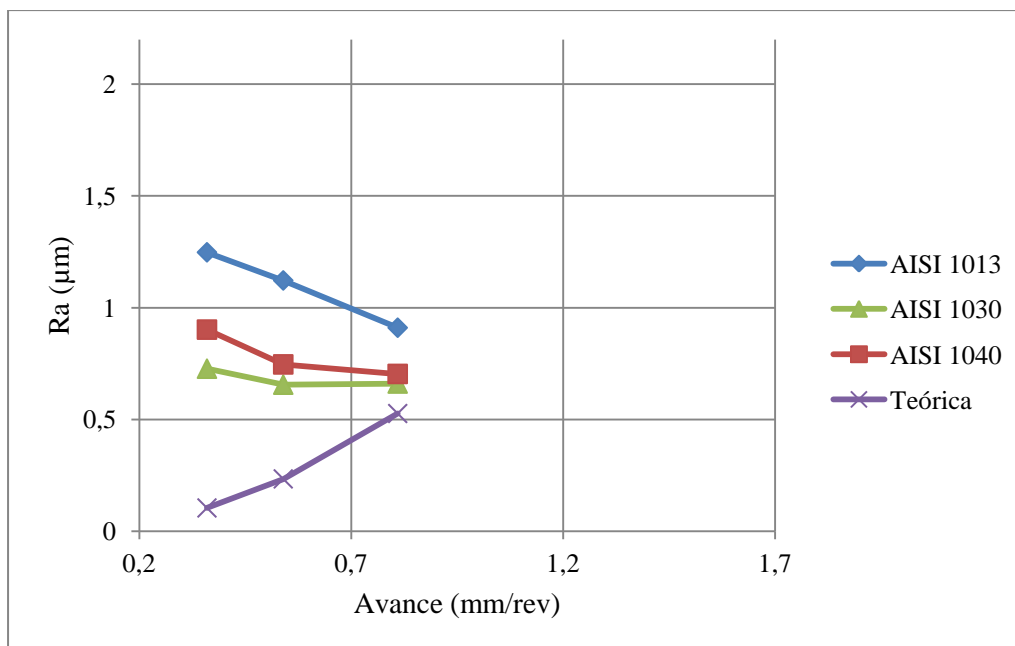
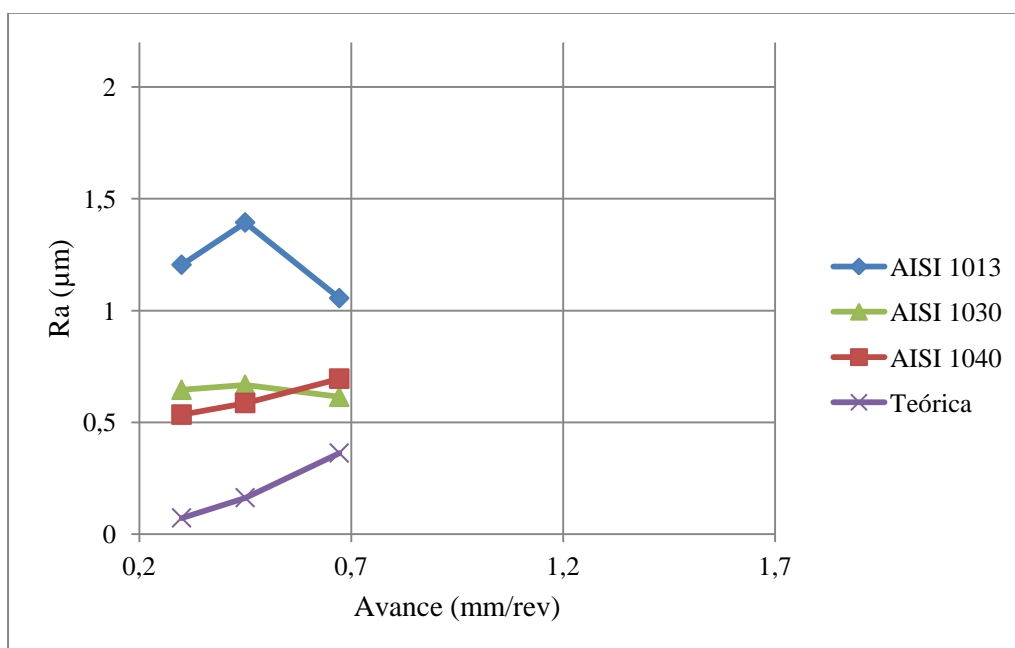


Figura 4.3 Medidas de rugosidad en fresado frontal con  $V_c = 131$  m/min

Figura 4.4 Medidas de rugosidad en fresado frontal con  $V_c = 194$  m/minFigura 4.5 Medidas de rugosidad en fresado frontal con  $V_c = 234$  m/min

La tendencia general es que los valores teóricos son menores que los valores experimentales, excepto para las velocidades más bajas y avances más pequeños, donde es a la inversa.

A la vista de los resultados se puede apreciar que a medida que aumenta la velocidad de corte los valores experimentales se aproximan más a los teóricos cuando los avances son más altos.

Los valores experimentales difieren en su gran mayoría del comportamiento teórico (ecuación 1.1) [2]. Esto es que, mientras se conoce que el valor de Ra debe ser mayor en la medida en que aumenta el avance, los valores experimentales muestran el comportamiento opuesto. Excepciones de esto son el acero AISI 1013 para la velocidad más baja y el acero AISI 1040 en la velocidad más alta.

### 4.1.2 Influencia de la velocidad de corte

En las gráficas de las figuras de la 4.6 a la 4.8 se representa la variación de la rugosidad según aumenta la velocidad de corte en los materiales estudiados. Para la representación gráfica se han tomado como referencia los valores del desplazamiento longitudinal de la mesa  $f_m$  por ser valores constantes. Como se puede apreciar en la tabla 4.1, en la medida en que varía la velocidad de corte, también varía el avance por diente, por lo que no es viable la representación en función de este parámetro.

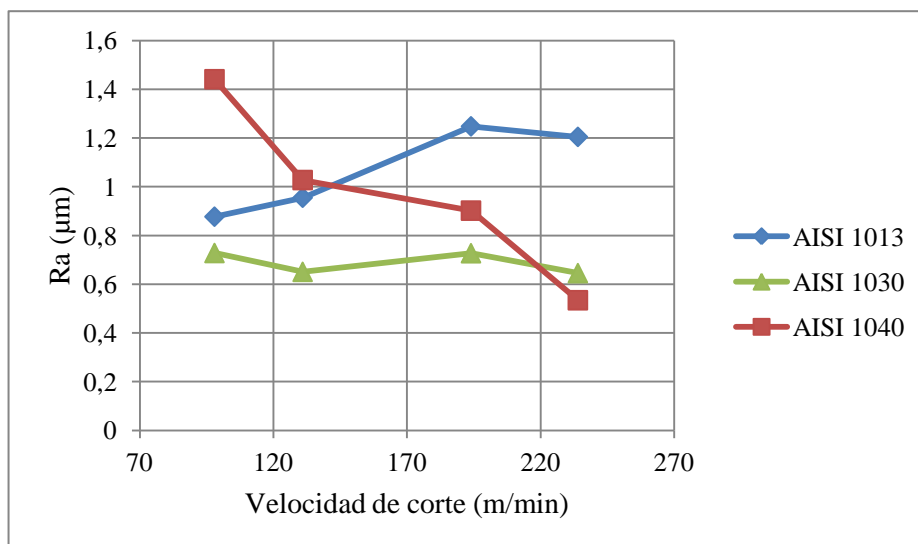


Figura 4.6 Medidas de rugosidad en fresado frontal con  $f_m = 279$  mm/min

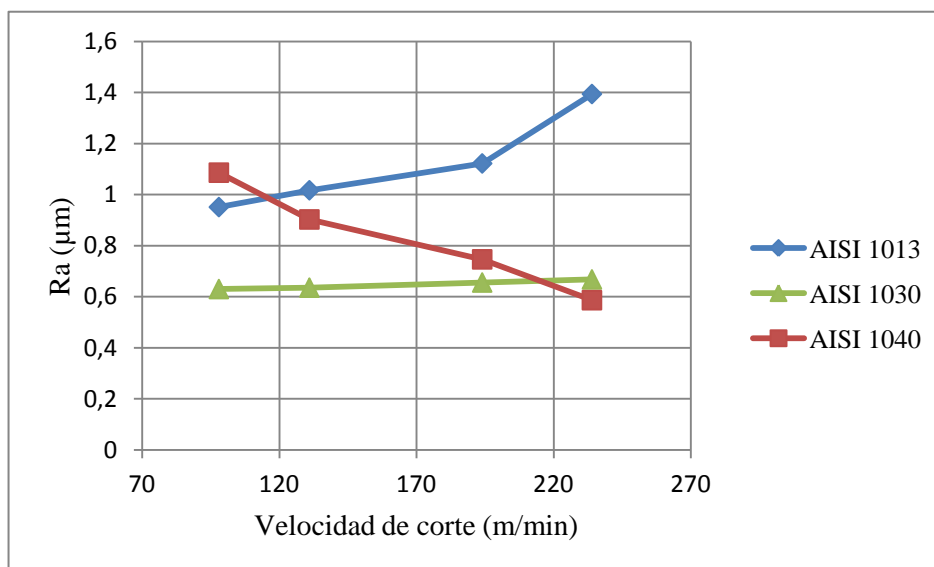


Figura 4.7 Medidas de rugosidad en fresado frontal con  $f_m = 416$  mm/min



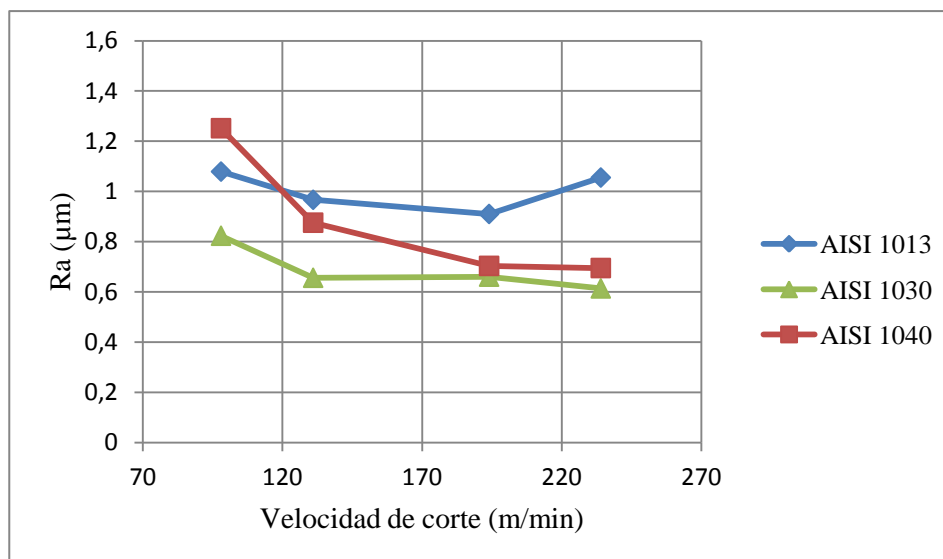


Figura 4.8 Medidas de rugosidad en fresado frontal con  $f_m = 625$  mm/min

El comportamiento de los valores experimentales se aproxima más al comportamiento esperado, es decir, que a medida que aumenta la velocidad de corte mejor es el acabado superficial bajo un mismo avance.

#### 4.1.3 Influencia del material

Para determinar la influencia del material se analizan las figuras de la 4.2 a la 4.8. De acuerdo a los valores de Ra experimentales y disponiendo de los materiales caracterizados se puede comprobar que el comportamiento teórico [23], es decir, que el material más duro sea el de mejor acabado superficial, no se cumple en general salvo a velocidades de corte altas y avances bajos.

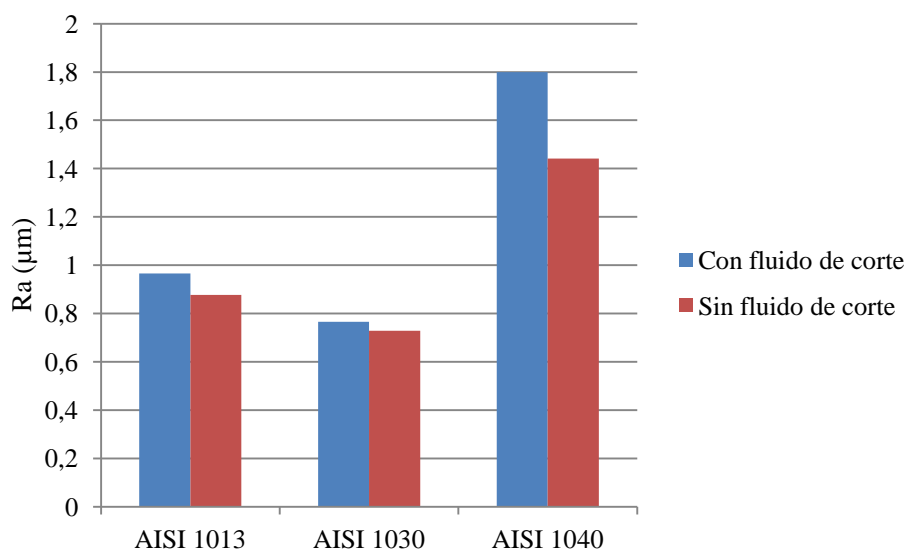
#### 4.1.4 Influencia de los fluidos de corte

Para estudiar la influencia que tiene sobre el acabado superficial el empleo de fluidos de corte, se realizaron tres ensayos en las mismas condiciones que los ensayos 1, 13 y 25 de la tabla 4.1, pero empleando taladrina. Una comparativa de ambos casos se muestra en la tabla 4.4. En ella se recogen directamente los valores promedios de Ra y se le ha asignado la letra F a los ensayos donde se empleó fluido de corte.

Tabla 4.4 Valores de rugosidad medidos con y sin fluido de corte

Ensayo	Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Ra teórico ( $\mu\text{m}$ )
1	0,877	0,721
1F	0,966	
13	0,728	
13F	0,766	
25	1,441	
25F	1,800	

En la figura 4.9 se muestra gráficamente la comparativa en el comportamiento cuando se usa y cuando no, fluido de corte. Se aprecia mejora en el acabado superficial los aceros cuando se emplea el fluido de corte, más bien el efecto contrario.



4.9 Influencia del fluido de corte en los ensayos 1,13 y 25 de fresado frontal

### 4.1.5 Incidencia

En el ensayo 15, al mecanizar con velocidad de corte de 98 m/min, valor que está por debajo de las recomendaciones del fabricante y de las especificaciones de la norma, se produjo la rotura del filo como se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10 Rotura de filo

Una vez sustituida la plaquita por una nueva, se siguieron realizando ensayos. Pasado un tiempo se empezaron a obtener acabados superficiales no deseados, incluso con marcas en la superficie de la pieza. Esto se puede apreciar en la figura 4.11.



Figura 4.11 Marcas presentes en la superficie mecanizada

Se revisaron todas las plaquitas y ninguna presentaba síntomas de desgaste o rotura. Se procedió entonces a desmontar la herramienta y se apreció la rotura de la plaquita base según se muestra en la figura 4.12. Como consecuencia de este daño la plaquita no poseía una sujeción correcta y generaba las marcas que se aprecian en la figura 4.12.

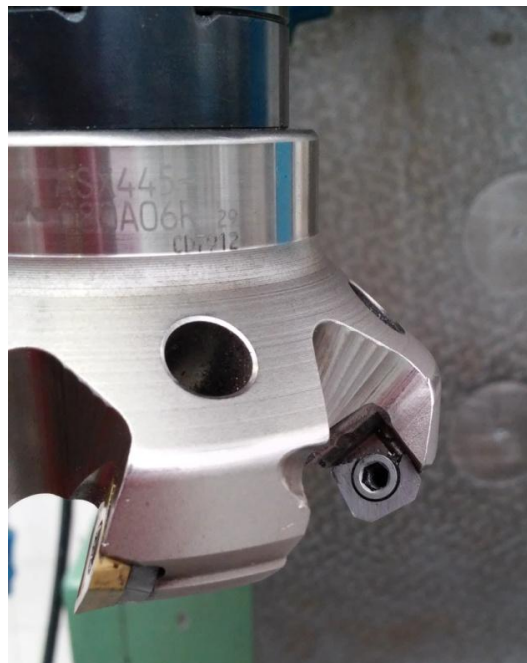


Figura 4.12 Rotura de la plaquita base

## 4.2. Fresado combinado

Los valores de rugosidad medidos se muestran en las tablas de la I.4 a la I.9 del Anexo I. Se han realizado una media de 9 medidas por probetas, siempre en la dirección del avance.

En el anexo II se muestran perfiles de rugosidad medidos para algunos de los ensayos, así como las

correspondientes fotografías de la superficie mecanizada obtenida.

A continuación se analizarán los resultados obtenidos en función de las variables experimentales

### 4.2.1 Influencia del avance

Tomando como referencia los valores de rugosidad obtenidos en las tablas antes mencionadas, se han representado gráficamente el comportamiento de los materiales estudiados para los diferentes valores de velocidad de corte y avance. Esto puede apreciarse en las figuras de la 4.13 a la 4.24.

En la figura 4.13, para la velocidad de corte de 29,03 m/min, solo se han representado dos avances que cumplen las especificaciones de la norma. Como los puntos representados coinciden en algunos casos, siendo difícil apreciar el valor, se han graficado dichos valores en las gráficas de las figuras 4. 14 y 4.15, según criterio de dureza de los materiales.

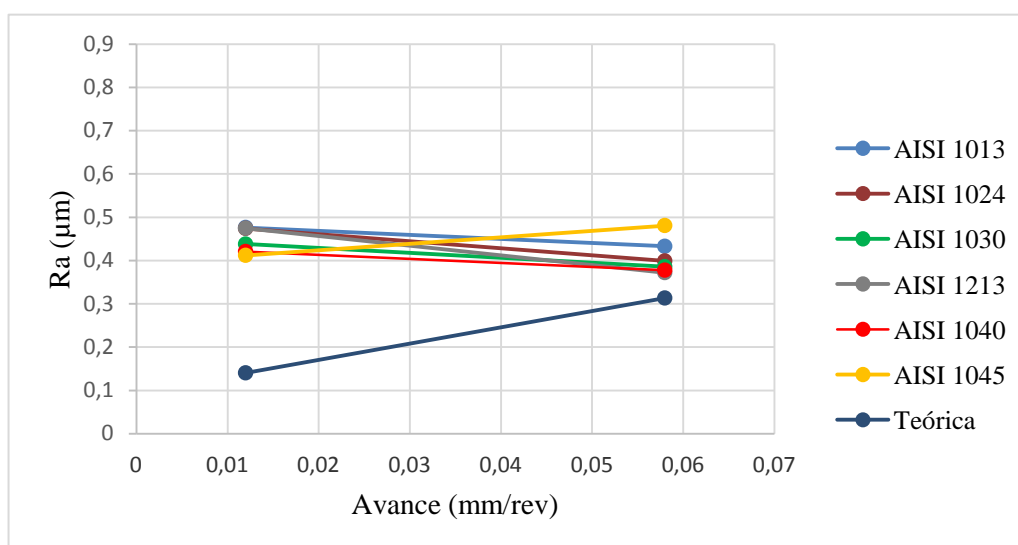


Figura 4.13 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $V_c = 29,03$  m/min (según norma)

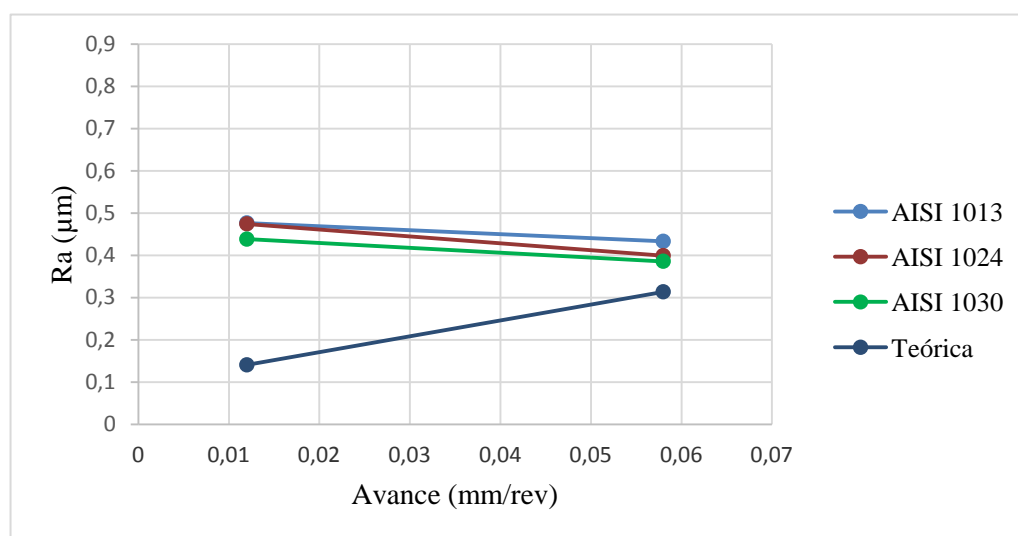


Figura 4.14 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $V_c = 29,03$  m/min (según norma) en los aceros más blandos

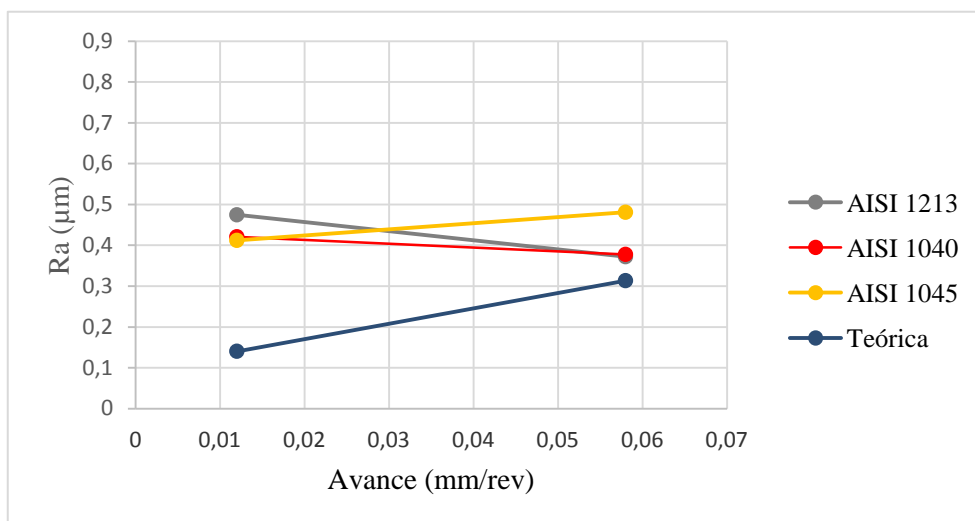


Figura 4.15 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $V_c = 29,03$  m/min (según norma) en los aceros más duros

Sin embargo, como se aprecia en la tabla 4.2, para esta velocidad de corte se ensayaron otros avances que aparecen en la figura 4.16.

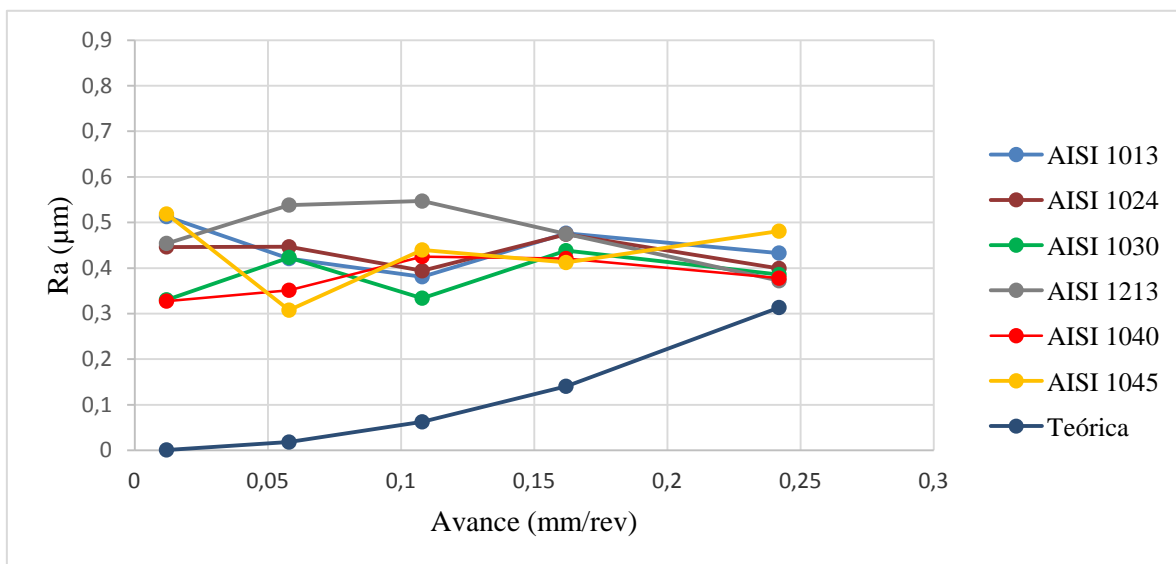


Figura 4.16 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $V_c = 29,03$  m/min

En las figuras 4.17 y 4.18 se representan los valores para el resto de las velocidades de corte.

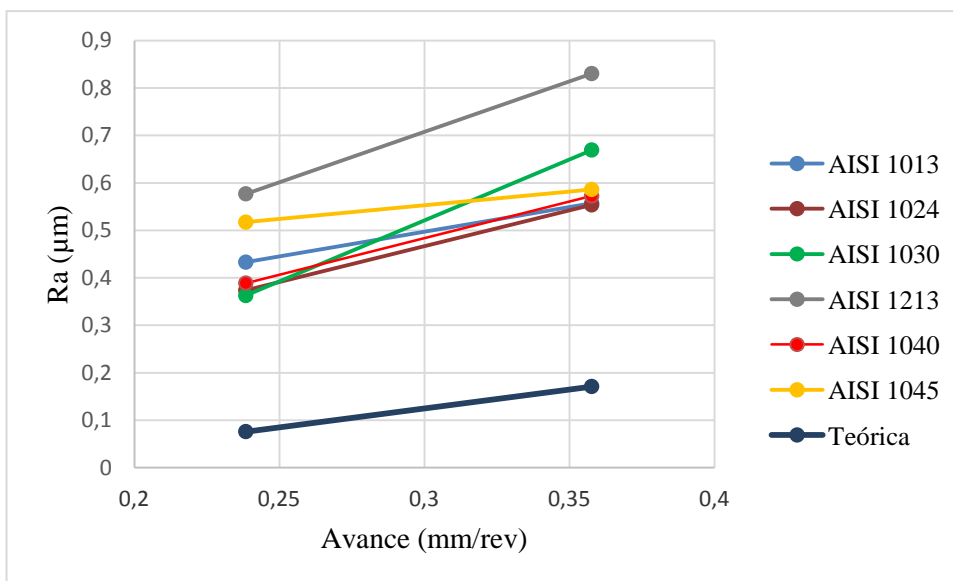


Figura 4.17 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $V_c = 19,60$  m/min

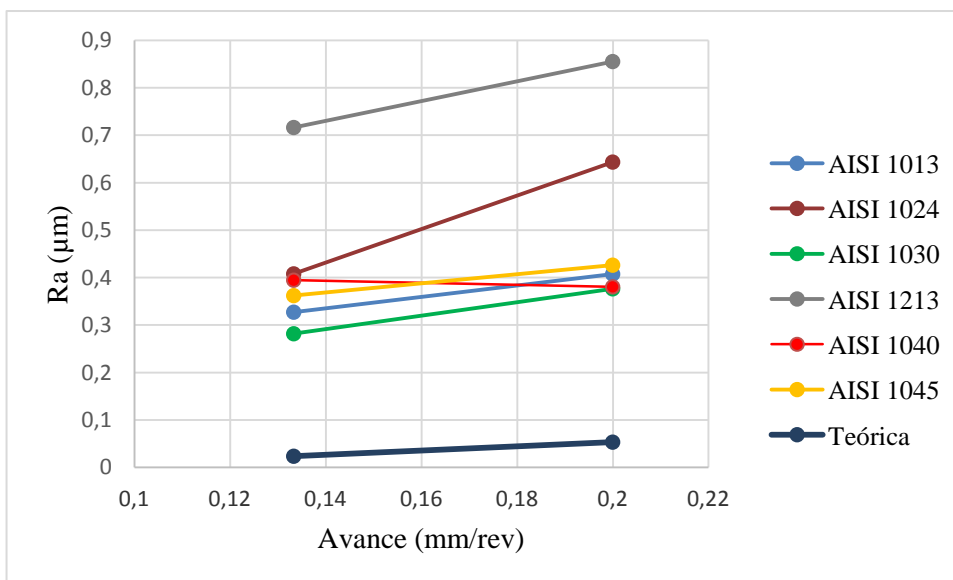


Figura 4.18 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $V_c = 35,06$  m/min

Se puede destacar que en los diferentes ensayos se comprueba que los valores experimentales generan gráficos cercanos entre sí, llegándose a cruzar y sin dejar claro un único material que destaque entre los demás.

La tendencia de los valores experimentales en las velocidades de corte extremas (la más baja y la más alta) presenta un comportamiento similar al de la curva teórica (ecuación 1.1) [2], en la cual conforme va aumentando el avance, aumenta el valor de Ra obtenido.

La totalidad de los valores experimentales de Ra obtenidos en todos los ensayos se encuentran por encima de los valores que la curva teórica describe.

#### 4.2.2 Influencia de la velocidad de corte

En las gráficas de las figuras de la 4.19 a la 4.20 se representa la variación de la rugosidad según

aumenta la velocidad de corte en los materiales estudiados. Para la representación gráfica, al igual que en el fresado frontal, se han tomado como referencia los valores del desplazamiento longitudinal de la mesa  $f_m$  por ser valores constantes.

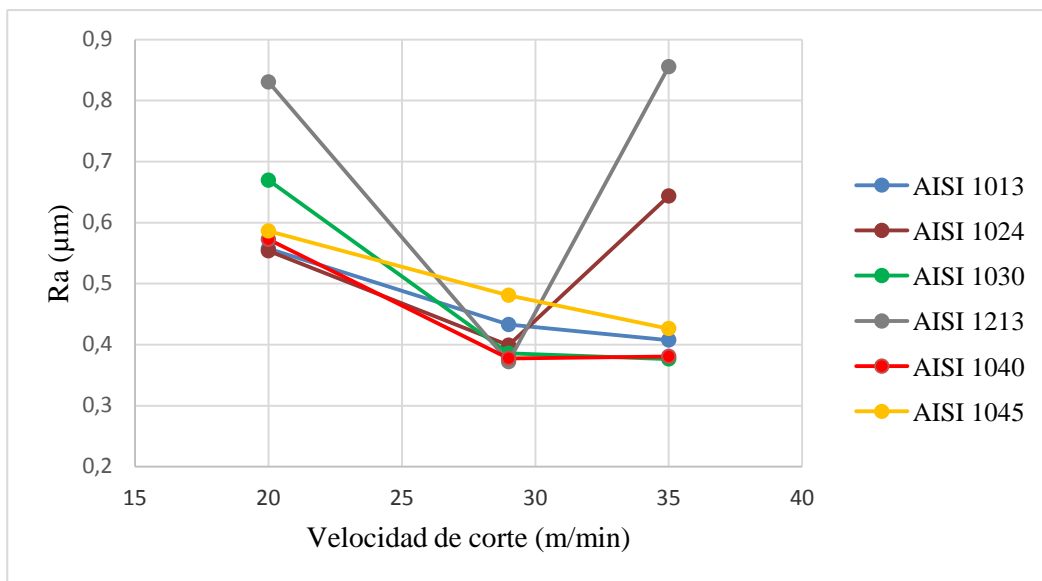


Figura 4.19 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $f_m = 124$  mm/min

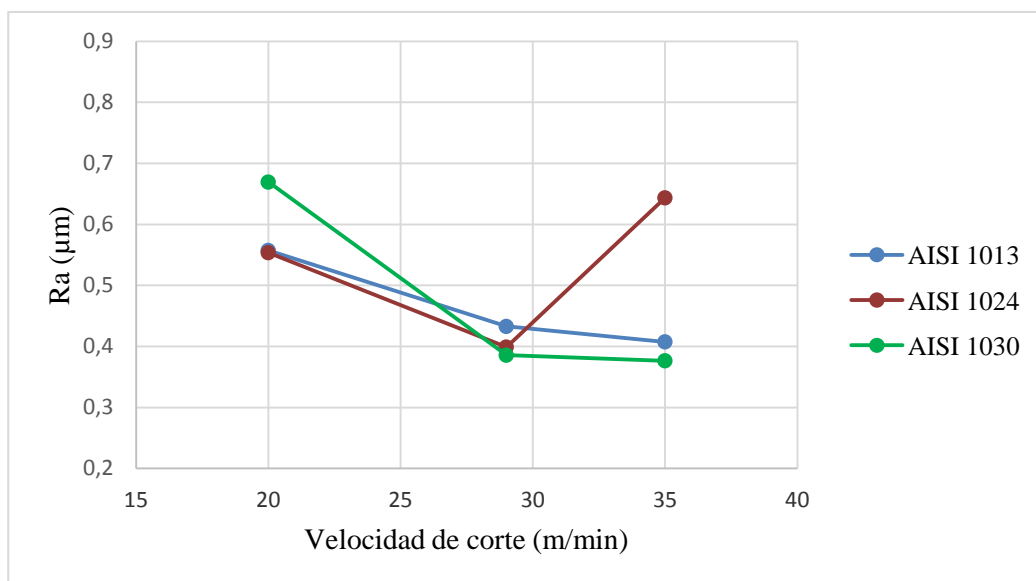


Figura 4.20 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $f_m = 124$  mm/min (materiales más blandos)

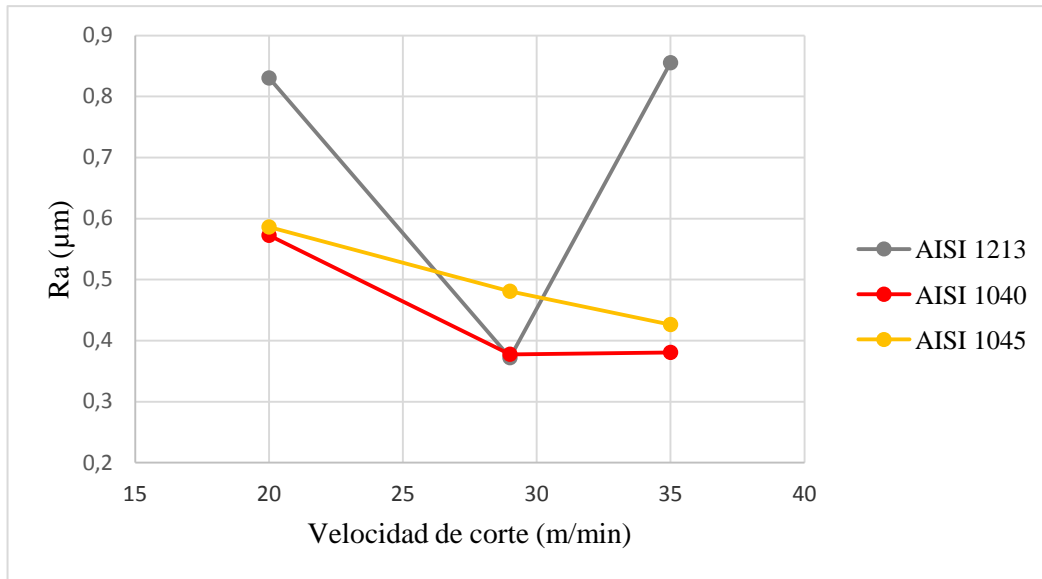


Figura 4.21 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $f_m = 124$  mm/min (materiales más duros)

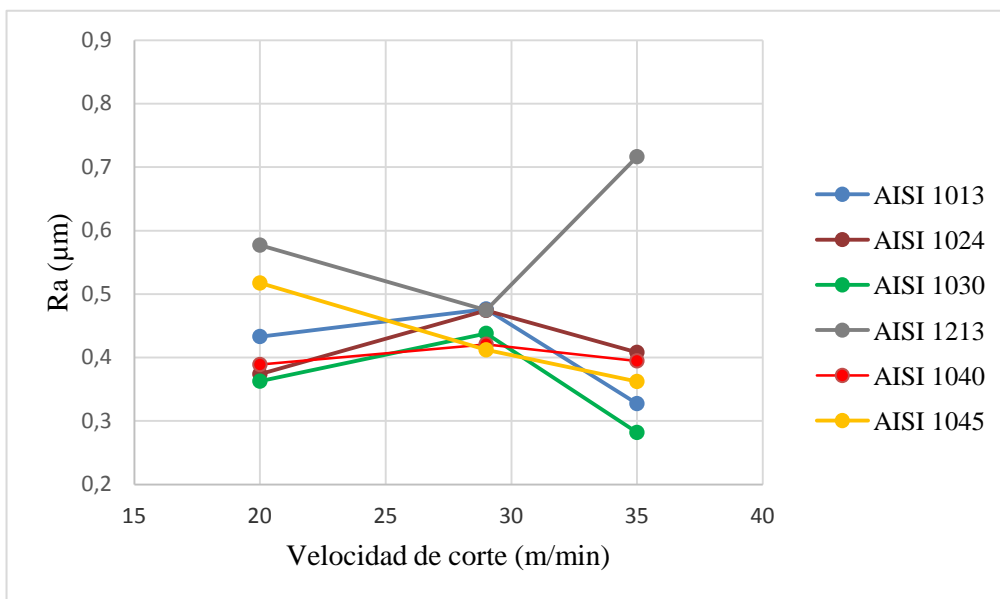


Figura 4.22 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $f_m = 186$  mm/min



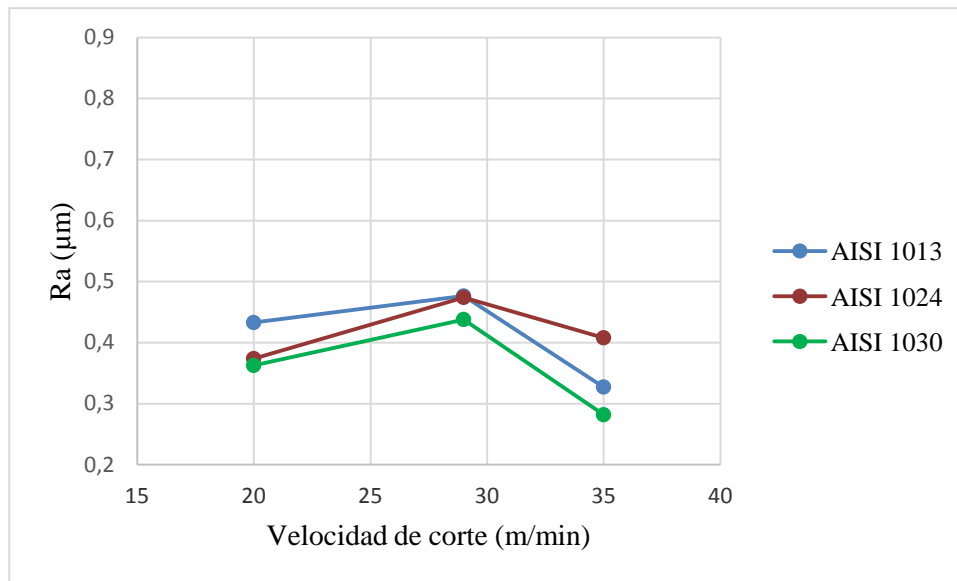


Figura 4.23 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $f_m = 186$  mm/min (materiales más blandos)

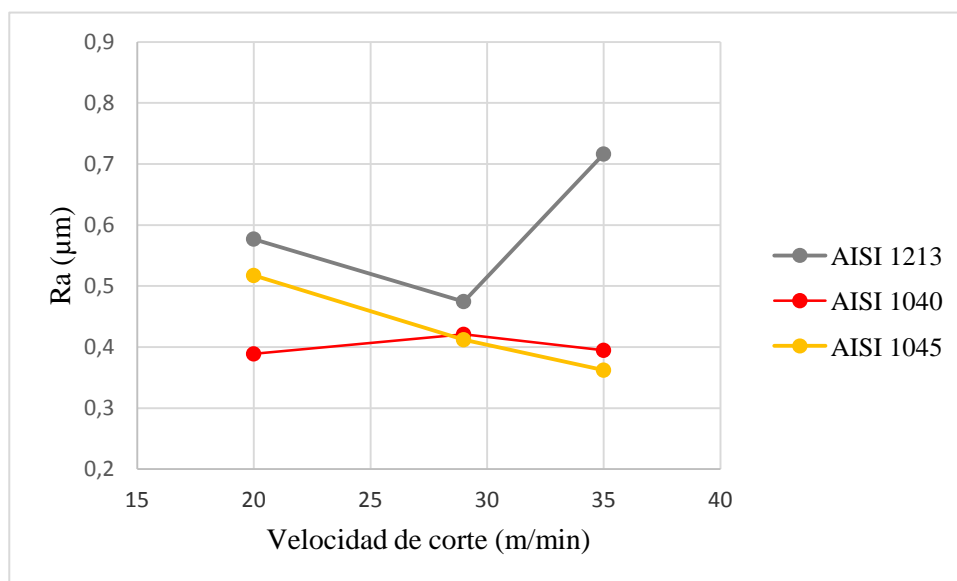


Figura 4.24 Medidas de rugosidad en fresado combinado con  $f_m = 186$  mm/min (materiales más duros)

Los resultados en general muestran que los aceros cumplen con el comportamiento esperado [2], es decir, al aumentar la velocidad de corte el valor de Ra desciende, salvo varias excepciones.

### 4.2.3 Influencia del material

A la vista de los resultados observados en los apartados anteriores cuando se valora la influencia del avance y la velocidad de corte, se puede decir que, en general, los materiales de mayor dureza tienen mayor similitud con el comportamiento teórico.

#### 4.2.4 Influencia de los fluidos de corte

En el caso del fresado combinado no se puede establecer una comparación entre mecanizar con o sin fluido de corte ya que se ha empleado en todos los casos. Según se menciona en el apartado ----, al trabajar con herramientas de acero rápido se emplea fluido de corte para garantizar condiciones de trabajo óptimas.

No obstante, sí se puede ver la influencia que tiene el trabajar con un caudal de taladrina inferior al recomendado. En la figura 4.25a se muestra una imagen de la superficie mecanizada empleando un caudal de 3,125 l/min, valor superior y cercano al recomendado por la norma. En la 4.x25b se aprecia una superficie del mismo material, mecanizado en las mismas condiciones pero con un caudal de taladrina bastante inferior dado un fallo en la máquina. Ambas figuras son imágenes tomadas con el microscopio óptico.

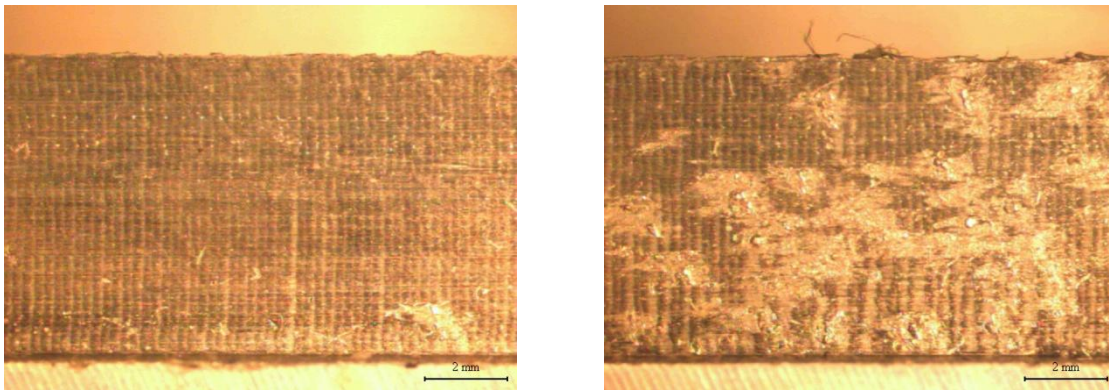


Figura 4.25 Mecanizado en fresado combinado empleando fluido de corte

- a) Caudal de 3,125 l/min (recomendado)
- b) Caudal considerablemente menor por fallo de la máquina

## 5 CONCLUSIONES

A la vista de los resultados se han llegado a una serie de conclusiones que serán detalladas a continuación respecto a cada uno de los ensayos de fresado frontal y de fresado combinado.

En cuanto a la obtención de los mejores acabados superficiales era de esperar, por los conocimientos recopilados a cerca de esta materia, que los menores valores de Ra fuesen alcanzados por los aceros más duros pero queda reflejado en los datos expuestos que no ocurre este hecho.

El acero AISI 1030 que no es el acero más duro, es el que presenta mejores acabados superficiales. El origen de este hecho radica en que no sólo la dureza proporciona una predisposición a un acero a obtener una mejor superficie mecanizada sino que también influye la presencia de elementos aleantes dentro del acero que hacen variar las propiedades de los dichos aceros y por consiguiente los resultados obtenidos de Ra. En este caso que nos ocupa del acero AISI 1030 hay que destacar que al poseer mucho más porcentaje en su composición química de Cr y Ni le proporcionan una resistencia al desgaste que origina esa mejora en el acabado superficial y esa baja variación de Ra en los ensayos realizados.

Teniendo en cuenta las gráficas donde se representan los parámetros estudiados, el más influyente sobre el acabado superficial ha sido la velocidad de corte, con la cual se han conseguido las mayores variaciones. Este hecho se debe a que medida que aumentamos la velocidad de corte, el tiempo que es dejado al material para que presente un comportamiento plástico es menor.[23]

Los aceros más duros (figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.19 y 4.21) presentan un comportamiento similar al que se muestra en la figura 5.1.

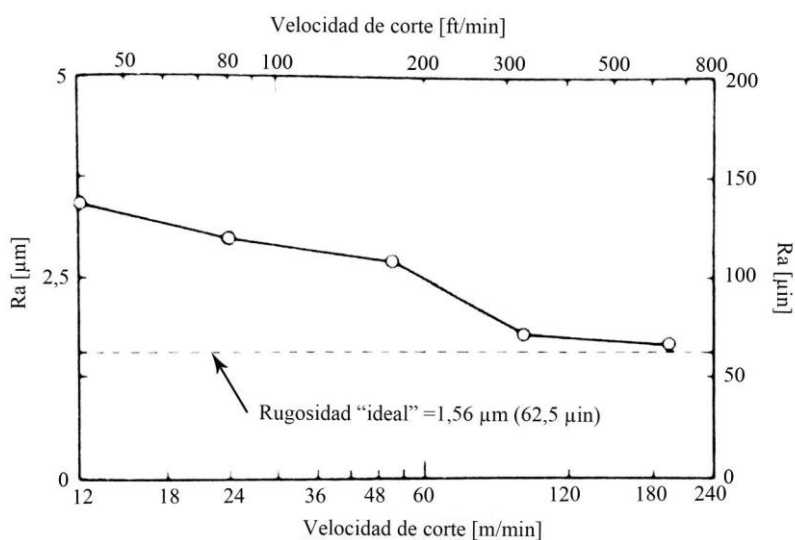


Figura 5.1 Efecto de la velocidad de corte en el acabado superficial en el torneado de piezas de acero suave. Boothroyd (2013) [2]

En el intervalo de velocidades de corte que se trabaja con el fresado combinado la variación de Ra esperada se cumple salvo las excepciones de los aceros AISI 1213 y AISI 1024.

En las gráficas de las figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.16 se pueden apreciar comportamientos no esperados en

los cuales el valor de Ra, al aumentar el avance disminuía su valor. Esto se debe a que se mecanizó en condiciones no recomendadas por la norma y por el fabricante de la herramienta. También puede ocurrir, como en el caso del acero AISI 1213, que las recomendaciones de mecanizado determinan valores superiores a los empleados en su ensayo.

Cuando se trabaja en condiciones recomendadas por el fabricante se puede apreciar como los aceros AISI 1040 y AISI 1045 presentan un comportamiento similar al teórico.

Ha quedado comprobado que la influencia del fluido de corte en operaciones de fresado frontal utilizando plaquitas no es necesario para mejorar el acabado superficial. Por lo contrario en las operaciones de fresado combinado es fundamental ya que entre muchas mejoras que proporciona, aquellas asociadas a la influencia en el acabado superficial son que permite trabajar a velocidades de corte superiores y que el mismo fluido de corte con un caudal adecuado ayuda a extraer la viruta que se genera.

## 6 TRABAJOS FUTUROS

---

Como ampliación a conocimientos y a extracción de información sobre la temática del acabado superficial en operaciones de fresado se propone:

- Habiéndose realizado ensayos con diferentes materiales y pudiéndose comprobar lo determinante que son algunos aspectos de las características del material en los resultados finales se cree oportuno ampliar el rango de materiales a estudio.
- Con el fin de poder entender la influencia que puede tener una herramienta en un proceso de mecanizado sobre los materiales a ensayar con materiales herramientales y diferentes geometría de herramientas, como pueden ser radio de las plaquitas o número de filos.
- Viendo la influencia de los parámetros de corte sobre el acabado superficial se ve adecuado abarcar más parámetros con el fin de tener un estudio completo del que poder guiarse en cuanto algún proceso donde se realizarán ensayos de fresado en otras condiciones (concordancia, parámetros de corte....)



## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] P.G. Benardos, y G.-C. Vosniakos. (2002). Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(2003), 833-844.
- [2] Boothroyd, G.(2013), *Fundamentals of Machining and Machine Tools*.(3ª ed.)India: CRC Press.
- [3] <http://www.emcotest.com/>
- [4] Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. (3ª ed.) México: McGraw-Hill
- [5] Isakov, E. (2009). *Cutting Data for Turning of Steel*. United Stated; Industrial Press Inc.
- [6] International Standard (1993). *Tool life testing in milling. ISO 8688:1989*
- [7] Kalpakjian, S., y Schmid, S.R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. (5ª ed.)México:Pearson Educación.
- [8] I. Korkut, y M.A. Donertas. The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling. *Materials and Design*, 28(2007), 308-312.
- [9] Dr. Mike S. Lou, Dr. Joseph C., y Dr. Caleb M. Li. Surface Roughness Prediction Technique For CNC End-Milling. (1998). *Journal of Industrial Technology*, 1(15), 1-6.
- [10] <http://www.mahr.com/es/Home/>
- [11] <http://www.mitsubishicarbide.net/>
- [12] Mohammed T. Hayajneh, Montasser S. Tahat, y Joachim Bluhm. (2001). A study of the Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness in the End-Milling Process. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1(1), 1-5.
- [13] Neely, J. (1999). *Metalurgia y metales industriales* . México: Limusa
- [14] [http://www.nikon.es/es\\_ES/](http://www.nikon.es/es_ES/)
- [15] Oğuz Çolak, Cahit Krbanoğlu, y M. Cengiz Kayacan. (2005). Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. *Material and Design*, 28 (2007), 657-666.
- [16] A.R. Rodrigues, H. Matsumoto, W.J. Yamakami, R.G.P. Paulo, C.L.F. Assis. (2010). Effects of Milling Condition on the Surface Integrity of Hot Forged Steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38(1), 37-43.
- [17] SAE. (2004). *Metals & Alloys in the Unified Numbering System*. ( 10ª ed. )United States
- [18] K. Saï, y W. Bouzid. (2004). Roughness modeling in up-face milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 26 (2005), 324-329.
- [19] J. Sun, y Y.B. Guo. (2008). A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2009), 4036-4042.
- [20] Unceta. (2000/2001). Herramientas de calidad.
- [21] UNE (1998). *Especificación geométrica de productos (GPS)*. 4288
- [22]J.M. Vieira, A.R. Machado, y E.O. Ezugwu. (2001). Performance of cutting fluids during face milling of steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(2001), 244-251.
- [23] Wuyi Chen. (1997). Cutting forces and surface finish when machining médium hardness steel using CBN tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40 (2000), 455-466.





# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pie de figura</b>	<b>Página</b>
1.1	Perfil de rugosidad .....	1
2.1	Fresado frontal .....	5
2.2	Fresado combinado ( $a_a > a_r$ ) .....	6
2.3	Fresado combinado ( $a_a < a_r$ ) .....	7
3.1	Fresadora CM-60 .....	9
3.2	Rugosímetro M1 .....	10
3.3	Microscopio óptico SMZ 800 .....	10
3.4	Durómetro M4U-025 .....	11
3.5	Portaplaquitas .....	11
3.6	Plaquita SEMT13T3AGSN-JM .....	12
3.7	Fresa STD A9 9040 .....	12
3.8	Probetas para frontal .....	13
3.9	Probetas para combinado .....	14
3.10	Preparación de probetas .....	17
3.11	Ensayos Brinell frontal .....	17
3.12	Fijación de parámetros de corte .....	17
3.13	Ensayo fresado frontal .....	18
3.14	Sectores y sentidos de medida de Ra .....	18
3.15	Medición de rugosidad en probetas de fresado frontal .....	18
3.16	Vista de la huella dejada durante el mecanizado .....	19
3.17	Planeado para preparación de una probeta .....	19
3.18	Proceso de fresado frontal .....	20
3.19	Medición de rugosidad en probetas de fresado combinado .....	20
3.20	Superficie mecanizada por fresado combinado vista al microscopio óptico .....	21
4.1	Huella de las plaquitas en el fresado frontal .....	25
4.2	Medida de rugosidad en fresado frontal con $V_c = 98$ m/min .....	26
4.3	Medidas de rugosidad en fresado frontal con $V_c = 131$ m/min .....	26
4.4	Medidas de rugosidad en fresado frontal con $V_c = 194$ m/min .....	27
4.5	Medidas de rugosidad en fresado frontal con $V_c = 234$ m/min .....	27
4.6	Medidas de rugosidad en fresado frontal con $f_m = 279$ mm/min .....	28
4.7	Medidas de rugosidad en fresado frontal con $f_m = 416$ mm/min .....	28
4.8	Medidas de rugosidad en fresado frontal con $f_m = 625$ mm/min .....	29
4.9	Influencia del fluido de corte en los ensayos 1,13 y 25 de fresado frontal .....	30
4.10	Rotura de filo .....	30
4.11	Marcas presentes en la superficie mecanizada .....	31
4.12	Rotura de la plaquita base .....	31
4.13	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $V_c = 29,03$ m/min (según norma) .....	32
4.14	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $V_c = 29,03$ m/min (según norma) en los aceros más blandos .....	32
4.15	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $V_c = 29,03$ m/min (según norma) en los aceros más duros .....	33
4.16	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $V_c = 29,03$ m/min .....	33
4.17	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $V_c = 19,60$ m/min .....	34
4.18	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $V_c = 35,06$ m/min .....	34
4.19	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $f_m = 124$ mm/min .....	35
4.20	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $f_m = 124$ mm/min (materiales más blandos) .....	35

<b>Figura</b>	<b>Pie de figura</b>	<b>Página</b>
4.21	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $f_m = 124$ mm/min (materiales más duros) .....	36
4.22	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $f_m = 186$ mm/min .....	36
4.23	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $f_m = 186$ mm/min (materiales más blandos) .....	37
4.24	Medidas de rugosidad en fresado combinado con $f_m = 186$ mm/min (materiales más duros) .....	37
4.25	Mecanizado en fresado combinado empleando fluido de corte .....	38
5.1	Efecto de la velocidad de corte en el acabado superficial en el torneado de piezas de acero suave .....	39

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Pie de tabla</b>	<b>Página</b>
2.1	Condiciones de corte fresado frontal .....	6
2.2	Condiciones de corte fresado combinado .....	7
2.3	Longitudes básicas de muestreo .....	8
3.1	Especificaciones técnica de la fresadora CM-60 .....	9
3.2	Especificaciones técnicas rugosímetro M1 .....	10
3.3	Especificaciones técnicas microscopio óptico SMZ800 .....	10
3.4	Composición química y dureza de los aceros empleados frontal .....	13
3.5	Dimensiones de las probetas para el fresado frontal .....	13
3.6	Composición química y dureza de los aceros empleados .....	13
3.7	Dimensiones de las probetas para el fresado combinado .....	14
3.8	Comparación de valores recomendados y experimentales para fresado frontal ....	15
3.9	Valores de velocidades de corte y avances experimentales para fresado frontal ..	15
3.10	Comparación de valores recomendados y experimentales para fresado combinado	16
3.11	Valores de velocidades de corte y avances experimentales para fresado combinado	16
4.1	Referencia de ensayos realizados en fresado frontal .....	23
4.2	Referencia de ensayos realizados en fresado combinado .....	24
4.3	Valores de rugosidad medidos en direcciones diferentes a la del avance .....	25
4.4	Valores de rugosidad medidos con y sin fluido de corte .....	29



# ANEXO I. MEDIDAS DE RUGOSIDAD

Tabla I.1 Fresado frontal AISI 1013

Ensayo	Medidas ( $\mu\text{m}$ )						Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Desviación típica	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
1	0,745	0,788	0,761	0,825	0,754	0,731	0,877	0,139	0,721
	0,928	0,968	1,060	1,109					
2	0,986	0,925	0,873	0,983	0,813	1,012	0,951	0,083	1,595
	1,077	0,876	1,046	0,940					
3	1,063	1,108	1,017	1,093	1,065	1,096	1,080	0,031	2,059
	1,095								
4	1,333	1,245	1,013	0,923	0,804	0,738	0,955	0,211	0,229
	0,946	0,837	0,755						
5	0,941	0,832	0,986	1,028	1,145	1,141	1,017	0,103	0,511
	1,087	0,939	1,052						
6	0,937	1,155	0,985	0,876	0,874	0,949	0,967	0,090	1,156
	1,062	0,934							
7	1,082	1,180	1,141	1,113	1,273	1,352	1,248	0,119	0,104
	1,377	1,358	1,354						
8	1,134	1,309	1,030	1,298	1,158	1,175	1,122	0,125	0,234
	1,011	0,973	1,009						
9	0,851	0,989	1,032	0,924	0,922	1,045	0,910	0,097	0,527
	0,839	0,776	0,815						
10	0,887	1,035	0,969	1,269	1,344	1,325	1,205	0,189	0,072
	1,287	1,415	1,310						
11	1,061	1,446	1,457	1,372	1,371	1,543	1,393	0,156	0,163
	1,277	1,592	1,425						
12	1,078	1,057	1,226	1,145	1,197	1,269	1,055	0,175	0,362
	0,816	0,813	0,897						

Tabla I.2 Fresado frontal AISI 1030

Ensayo	Medidas ( $\mu\text{m}$ )						Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Desviación típica ( $\mu\text{m}$ )	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
13	0,882	0,797	0,580	0,859	0,653	0,582	0,728	0,113	0,721
	0,737	0,550	0,638	0,848	0,665	0,848			
	0,750	0,140							
14	0,692	0,561	0,589	0,630	0,682	0,551	0,630	0,087	1,595
	0,704	0,743	0,519	0,550	0,772				
15	0,824	0,756	0,725	0,826	0,753	0,751	0,824	0,084	2,059
	0,913	0,911	0,954						
16	0,709	0,756	0,573	0,650	0,781	0,501	0,650	0,095	0,229
	0,669	0,674	0,543						
17	0,553	0,694	0,695	0,596	0,632	0,638	0,635	0,046	0,511
	0,622	0,667	0,622						
18	0,603	0,677	0,653	0,534	0,576	0,532	0,656	0,107	1,156
	0,717	0,777	0,887						
19	0,761	0,696	0,724	0,696	0,680	0,680	0,727	0,063	0,104
	0,710	0,716	0,881						
20	0,746	0,653	0,546	0,578	0,692	0,604	0,656	0,101	0,234
	0,705	0,840	0,536						
21	0,572	0,576	0,691	0,602	0,705	0,760	0,661	0,075	0,527
	0,596	0,693	0,752						
22	0,632	0,681	0,630	0,601	0,690	0,581	0,645	0,064	0,072
	0,721	0,664							
23	0,820	0,606	0,755	0,646	0,579	0,738	0,667	0,088	0,163
	0,638	0,554	0,673						
24	0,717	0,605	0,555	0,620	0,691	0,549	0,614	0,058	0,362
	0,607	0,621	0,560						

Tabla I.3 Fresado frontal AISI 1040

Ensayo	Medidas ( $\mu\text{m}$ )						Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Desviación típica ( $\mu\text{m}$ )	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
25	1,193	1,663	1,478	1,629	1,500	1,246	1,439	0,188	0,721
	1,476	1,426	1,581	1,655	1,133	1,682			
	1,227	1,562							
26	0,855	1,014	1,360	1,017	0,913	1,397	1,085	0,191	1,595
	1,042	0,974	1,199						
27	1,173	1,135	1,476	1,294	1,020	1,182	1,251	0,153	2,059
	1,165	1,381	1,438						
28	0,850	1,082	1,209	0,913	1,041	0,998	1,027	0,127	0,229
	0,876	1,143	1,134						
29	0,800	0,794	0,939	0,771	0,858	1,021	0,902	0,102	0,511
	0,908	1,015	1,016						
30	0,638	0,957	0,929	0,716	0,899	0,947	0,876	0,130	1,156
	0,856	0,869	1,069						
31	0,748	0,877	0,941	0,684	0,904	0,828	0,902	0,118	0,104
	1,030	1,040	1,000	0,927					
32	0,655	0,782	0,618	0,750	0,669	0,632	0,746	0,129	0,234
	0,875	1,012	0,723						
33	0,892	0,596	0,614	0,617	0,761	0,825	0,704	0,117	0,527
	0,592	0,629	0,806						
34	0,473	0,566	0,446	0,549	0,544	0,650	0,902	0,067	0,072
	0,562								
35	0,672	0,534	0,575	0,655	0,487	0,604	0,586	0,078	0,163
	0,654	0,459	0,637						
36	0,820	0,621	0,691	0,601	0,692	0,685	0,695	0,077	0,362
	0,659	0,668	0,818						

Tabla I.4 Fresado combinado AISI 1013

Ensayo	Medidas ( $\mu\text{m}$ )						Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Desviación típica ( $\mu\text{m}$ )	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
1C	0,489	0,516	0,510	0,515	0,530	0,517	0,513	0,013	0,001
2C	0,454	0,431	0,414	0,487	0,340	0,398	0,421	0,050	0,018
3C	0,349	0,406	0,367	0,398	0,394	0,371	0,380	0,022	0,060
4C	0,553	0,448	0,420	0,510	0,370	0,558	0,476	0,076	0,140
5C	0,416	0,428	0,439	0,434	0,462	0,418	0,433	0,017	0,313
6C	0,412	0,514	0,402	0,378	0,475	0,417	0,433	0,051	0,076
7C	0,545	0,530	0,566	0,562	0,527	0,614	0,557	0,032	0,171
8C	0,297	0,326	0,350	0,287	0,386	0,318	0,327	0,036	0,024
9C	0,347	0,399	0,414	0,423	0,470	0,392	0,408	0,040	0,054

Tabla I.5 Fresado combinado AISI 1024

Ensayo	Medidas ( $\mu\text{m}$ )						Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Desviación típica ( $\mu\text{m}$ )	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
10C	0,430	0,471	0,526	0,371	0,430	0,450	0,446	0,051	0,001
11C	0,453	0,450	0,494	0,482	0,389	0,411	0,447	0,040	0,018
12C	0,440	0,383	0,384	0,453	0,368	0,335	0,394	0,045	0,060
13C	0,514	0,437	0,476	0,413	0,535	0,470	0,474	0,046	0,140
14C	0,361	0,415	0,409	0,452	0,372	0,385	0,399	0,033	0,313
15C	0,397	0,338	0,343	0,317	0,435	0,413	0,374	0,047	0,076
16C	0,618	0,531	0,569	0,500	0,586	0,518	0,553	0,045	0,171
17C	0,388	0,451	0,442	0,399	0,369	0,399	0,408	0,032	0,024
18C	0,636	0,656	0,652	0,677	0,658	0,582	0,644	0,033	0,054



Tabla I.6 Fresado combinado AISI 1030

Ensayo	Medidas ( $\mu\text{m}$ )						Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Desviación típica ( $\mu\text{m}$ )	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
19C	0,385	0,310	0,302	0,351	0,307	0,309	0,327	0,033	0,001
20C	0,383	0,305	0,350	0,313	0,365	0,391	0,351	0,036	0,018
21C	0,375	0,432	0,403	0,439	0,415	0,487	0,425	0,038	0,060
22C	0,468	0,399	0,440	0,407	0,476		0,438	0,035	0,140
23C	0,420	0,350	0,344	0,415	0,415	0,370	0,386	0,035	0,313
24C	0,362	0,362	0,356	0,391	0,316	0,389	0,363	0,027	0,076
25C	0,606	0,686	0,753	0,609	0,645	0,717	0,669	0,060	0,171
26C	0,281	0,226	0,296	0,278	0,281	0,329	0,281	0,033	0,024
27C	0,315	0,328	0,472	0,481	0,316	0,347	0,377	0,078	0,054

Tabla I.7 Fresado combinado AISI 1213

Ensayo	Medidas ( $\mu\text{m}$ )						Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Desviación típica ( $\mu\text{m}$ )	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
28C	0,476	0,471	0,526	0,371	0,430	0,450	0,454	0,051	0,001
29C	0,532	0,576	0,524	0,540	0,527	0,530	0,538	0,019	0,018
30C	0,559	0,565	0,551	0,600	0,437	0,569	0,547	0,056	0,060
31C	0,462	0,460	0,492	0,468	0,491		0,475	0,016	0,140
32C	0,392	0,413	0,354	0,346	0,342	0,385	0,372	0,029	0,313
33C	0,543	0,595	0,409	0,561	0,683	0,671	0,577	0,100	0,076
34C	0,738	0,677	0,787	0,999	0,893	0,888	0,830	0,118	0,171
35C	0,812	0,721	0,739	0,681	0,681	0,664	0,716	0,055	0,024
36C	0,820	0,879	0,918	0,817	0,872	0,826	0,855	0,040	0,054

Tabla I.8 Fresado combinado AISI 1040

Ensayo	Medidas ( $\mu\text{m}$ )						Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Desviación típica ( $\mu\text{m}$ )	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
37C	0,326	0,355	0,358	0,342	0,292	0,308	0,330	0,026	0,001
38C	0,396	0,404	0,400	0,459	0,416	0,464	0,423	0,030	0,018
39C	0,358	0,299	0,352	0,315	0,327	0,352	0,334	0,024	0,060
40C	0,458	0,414	0,399	0,398	0,461	0,395	0,421	0,031	0,140
41C	0,390	0,407	0,319	0,441	0,334	0,375	0,378	0,046	0,313
42C	0,365	0,416	0,371	0,408	0,392	0,381	0,389	0,020	0,076
43C	0,605	0,531	0,550	0,526	0,630	0,593	0,573	0,043	0,171
44C	0,400	0,416	0,371	0,408	0,392	0,381	0,394	0,017	0,024
45C	0,387	0,361	0,346	0,411	0,391	0,387	0,381	0,023	0,054

Tabla I.9 Fresado combinado AISI 1045

Ensayo	Medidas ( $\mu\text{m}$ )						Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Desviación típica ( $\mu\text{m}$ )	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
46C	0,535	0,510	0,589	0,519	0,462	0,496	0,519	0,042	0,001
47C	0,285	0,319	0,298	0,314	0,313	0,316	0,308	0,013	0,018
48C	0,496	0,351	0,396	0,455	0,449	0,491	0,440	0,056	0,060
49C	0,435	0,411	0,403	0,398	0,413		0,412	0,014	0,140
50C	0,532	0,563	0,437	0,483	0,412	0,458	0,481	0,058	0,313
51C	0,657	0,436	0,475	0,548	0,491	0,497	0,517	0,077	0,076
52C	0,557	0,532	0,541	0,741	0,559	0,587	0,586	0,078	0,171
53C	0,364	0,346	0,377	0,328	0,380	0,378	0,362	0,021	0,024
54C	0,389	0,393	0,450	0,491	0,406	0,429	0,426	0,039	0,054

## ANEXO II. PERFILES DE RUGOSIDAD

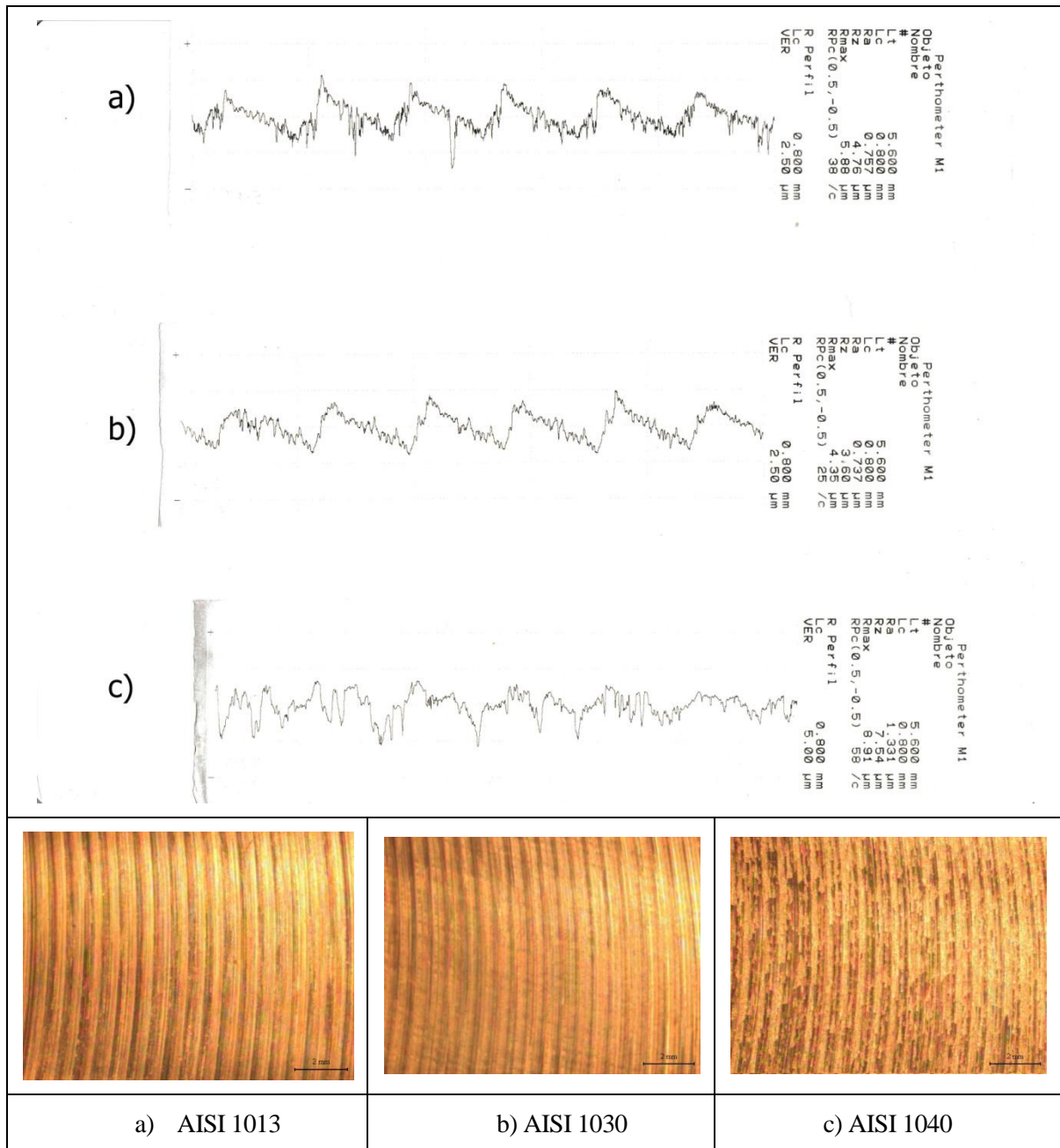


Figura II.1 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.

Fresado frontal ( $V_c = 98$  m/min  $f_z = 0,119$  mm/rev)

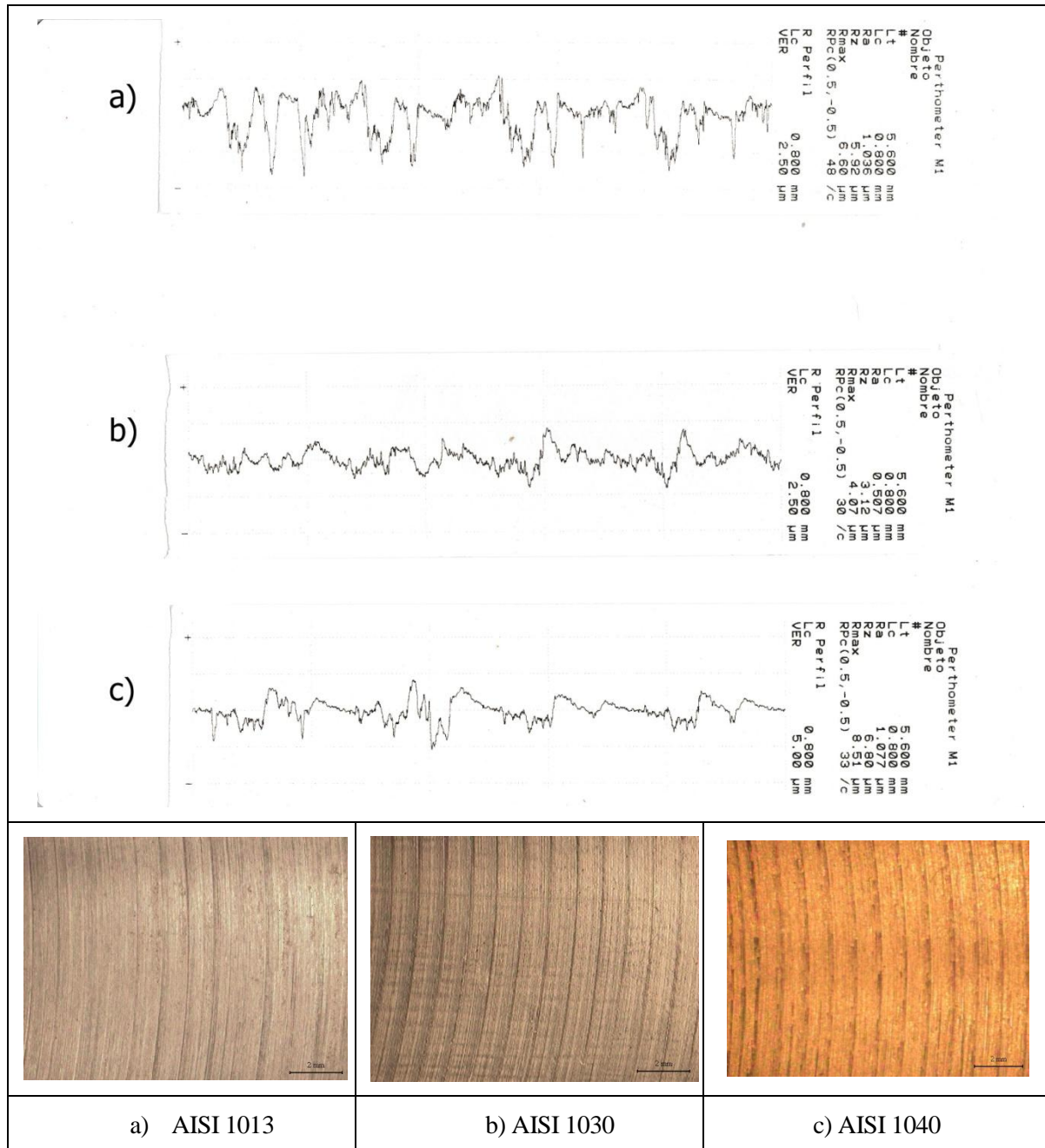


Figura II.2 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado frontal ( $V_c = 98,01$  m/min  $f_z = 0,178$  mm/rev)

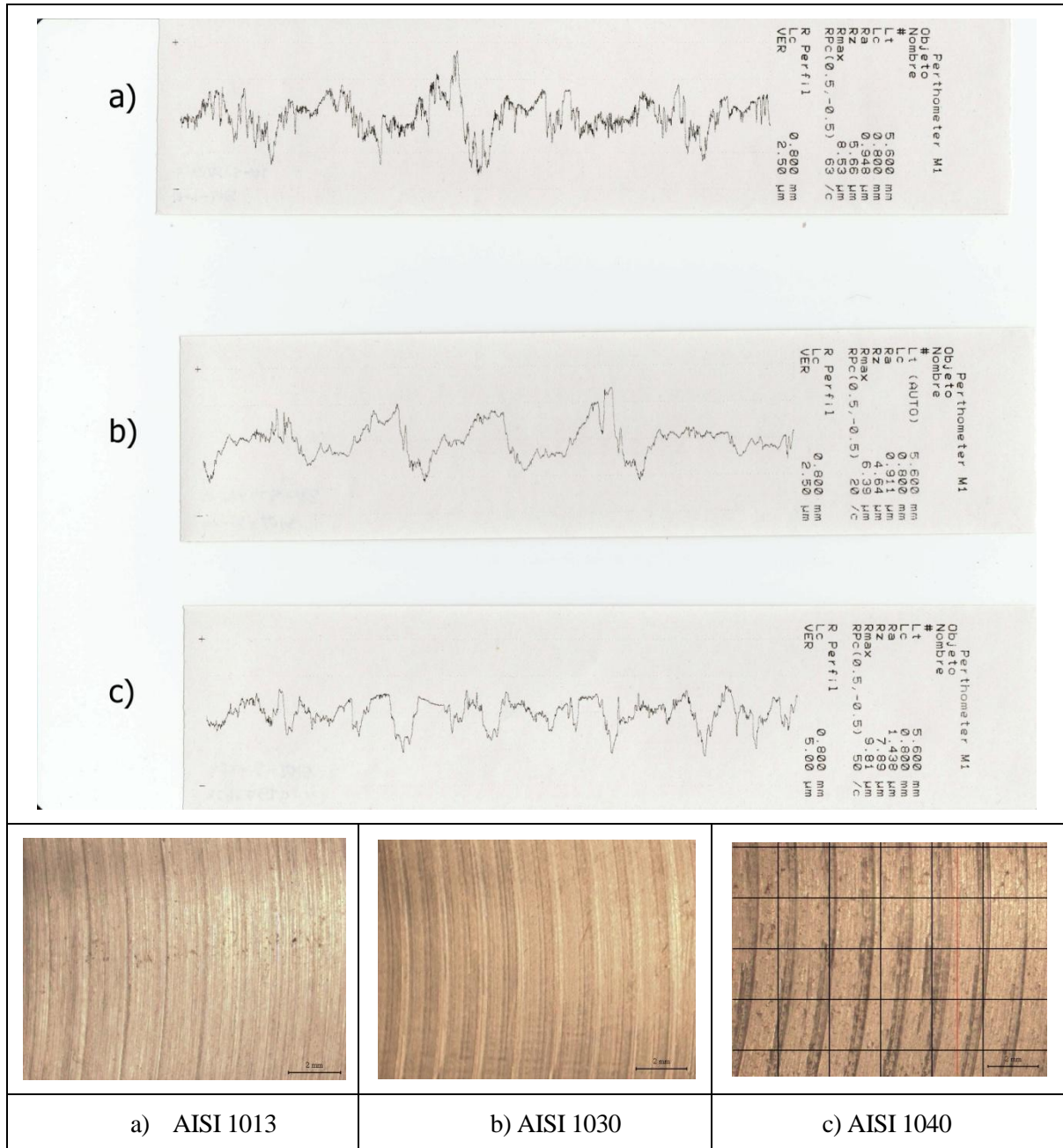


Figura II.3 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado frontal ( $V_c = 98,01$  m/min  $f_z = 0,267$  mm/rev)

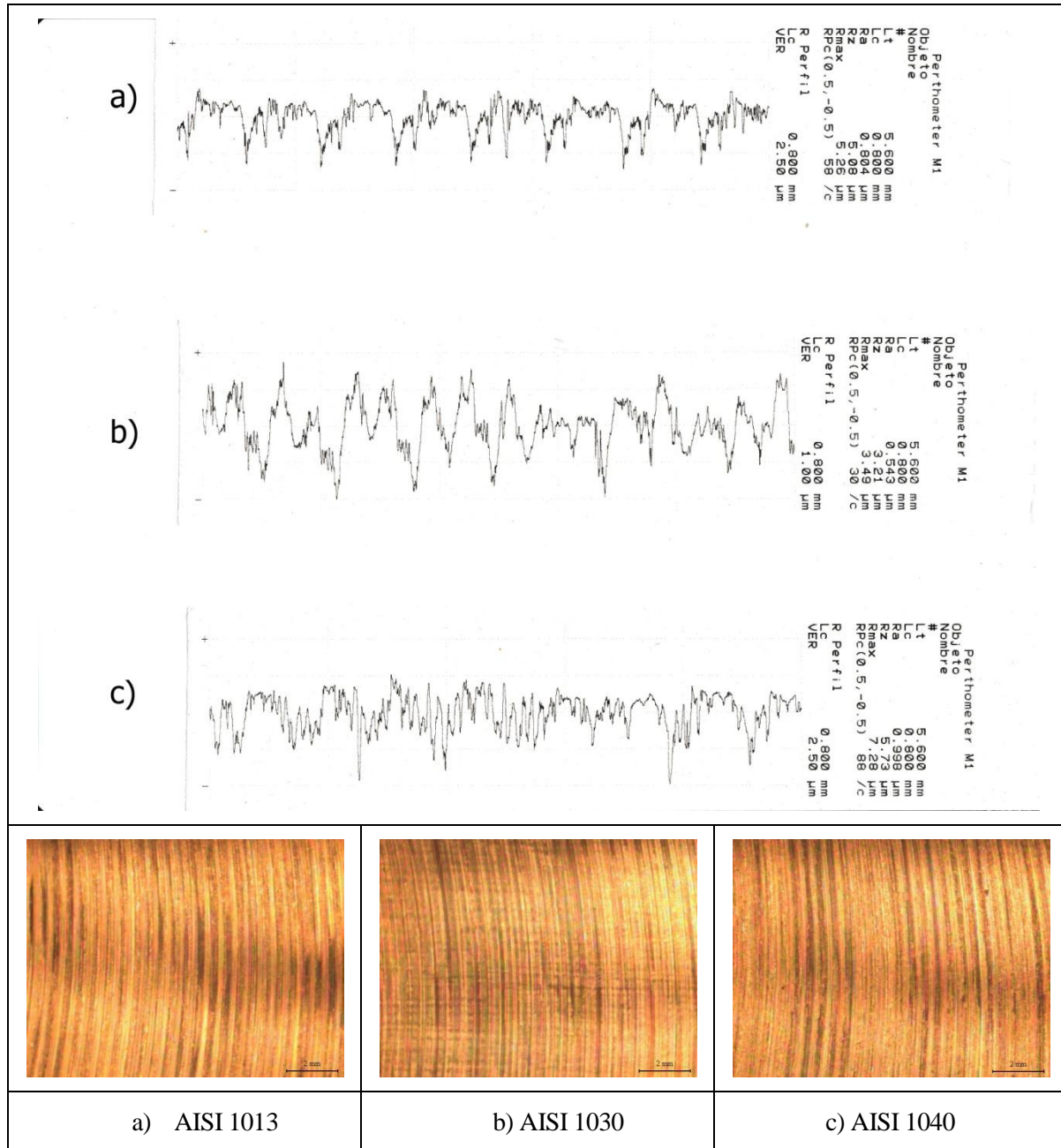


Figura II.4 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado frontal ( $V_c = 130,69$  m/min  $f_z = 0,119$  mm/rev)

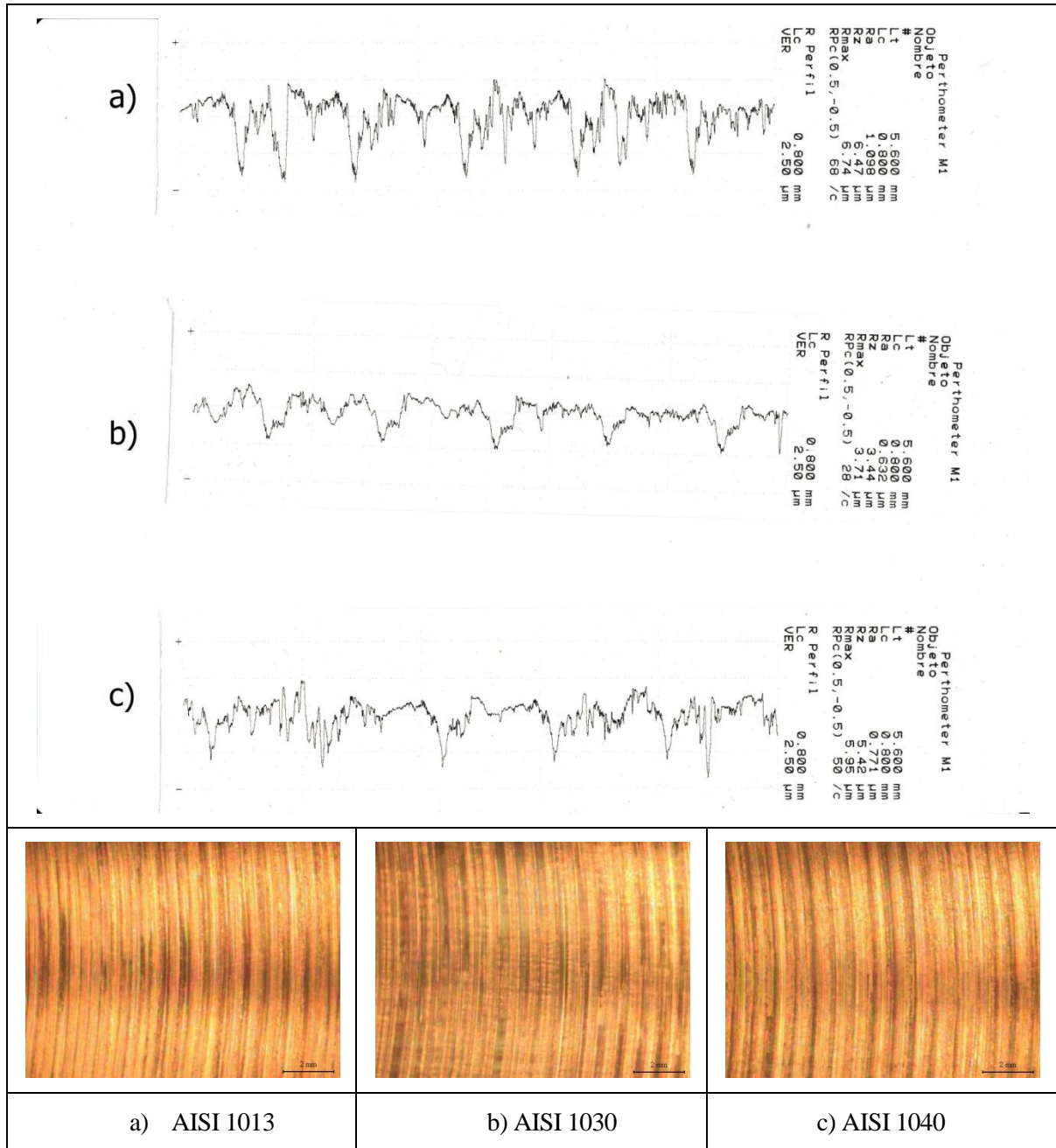


Figura II.5 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
Fresado frontal ( $V_c = 130,69$  m/min  $f_z = 0,178$  mm/rev)

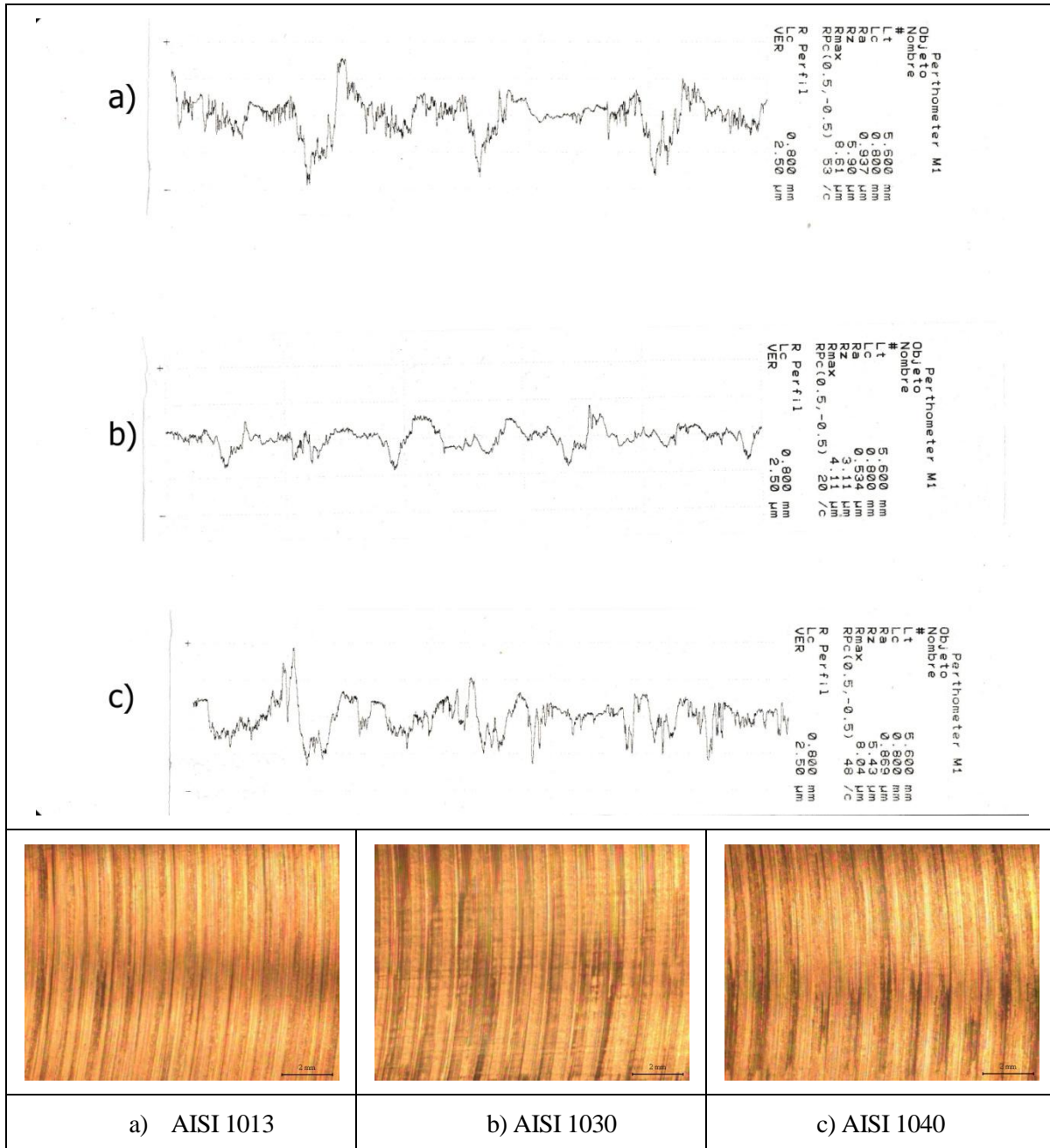


Figura II.6 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado frontal ( $V_c = 130,69$  m/min  $f_z = 0,267$  mm/rev)



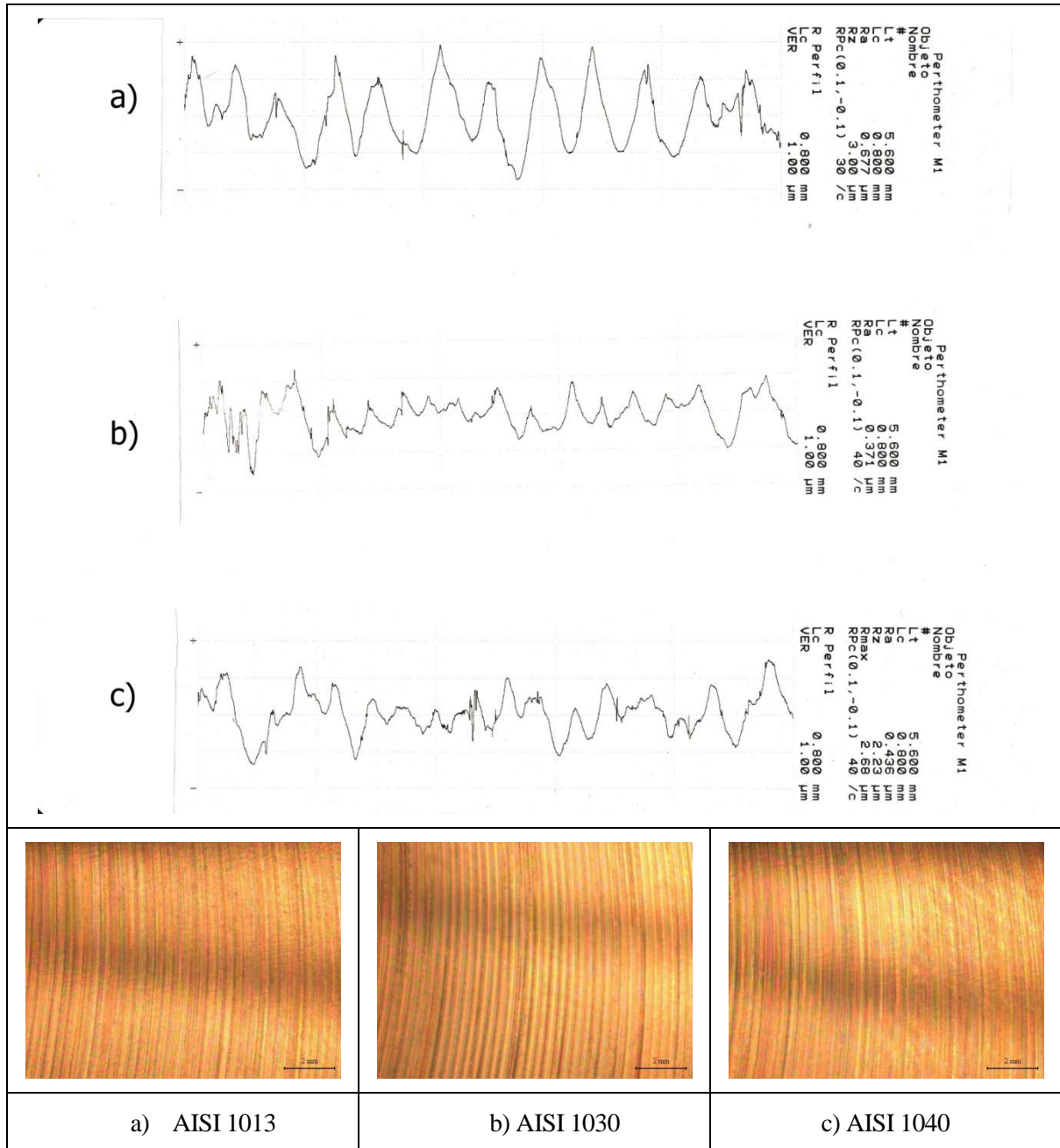


Figura II.7 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
Fresado frontal ( $V_c = 193,52$  m/min  $f_z = 0,119$  mm/rev)

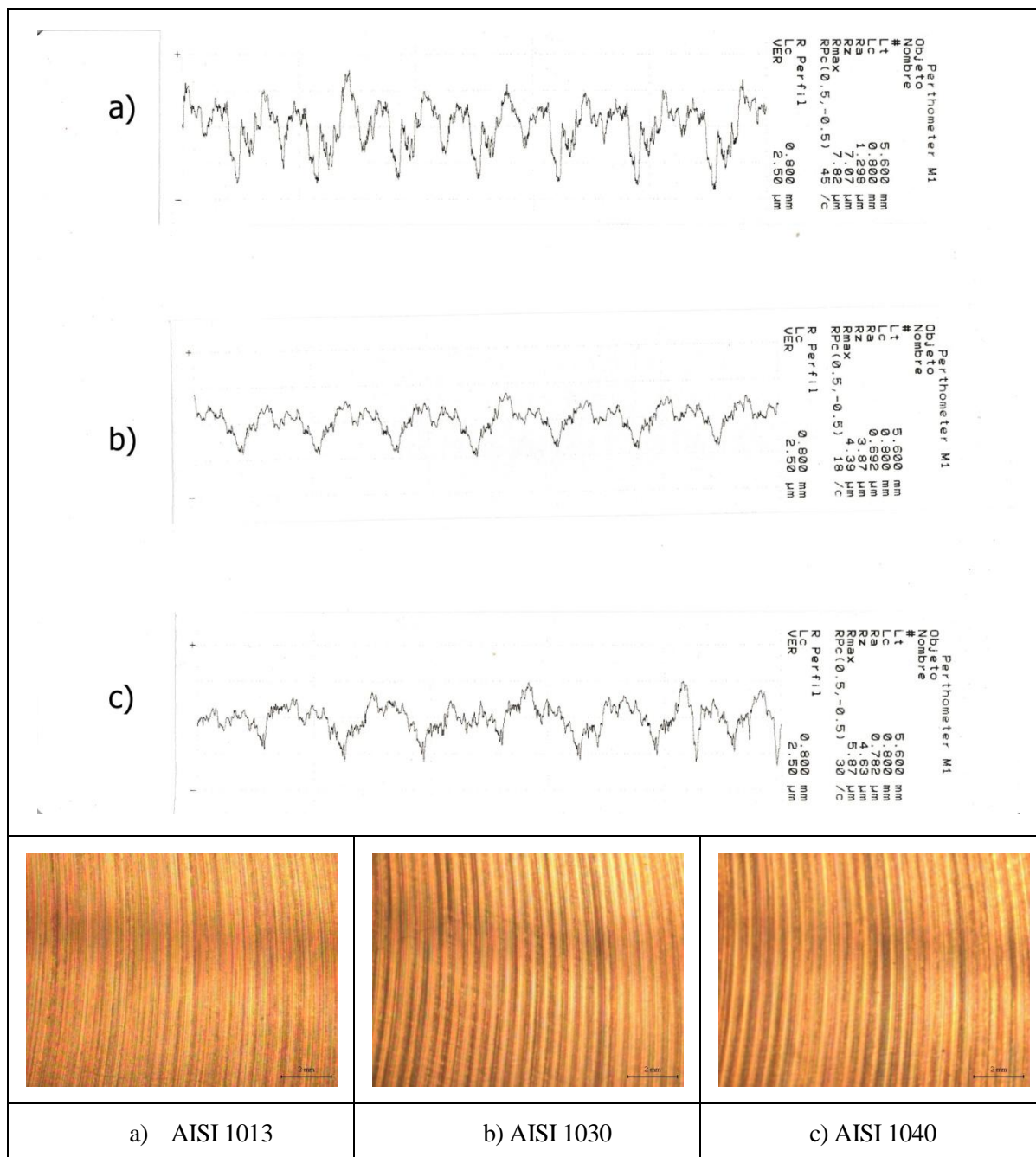


Figura II.8 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
Fresado frontal ( $V_c = 193,52$  m/min  $f_z = 0,178$  mm/rev)

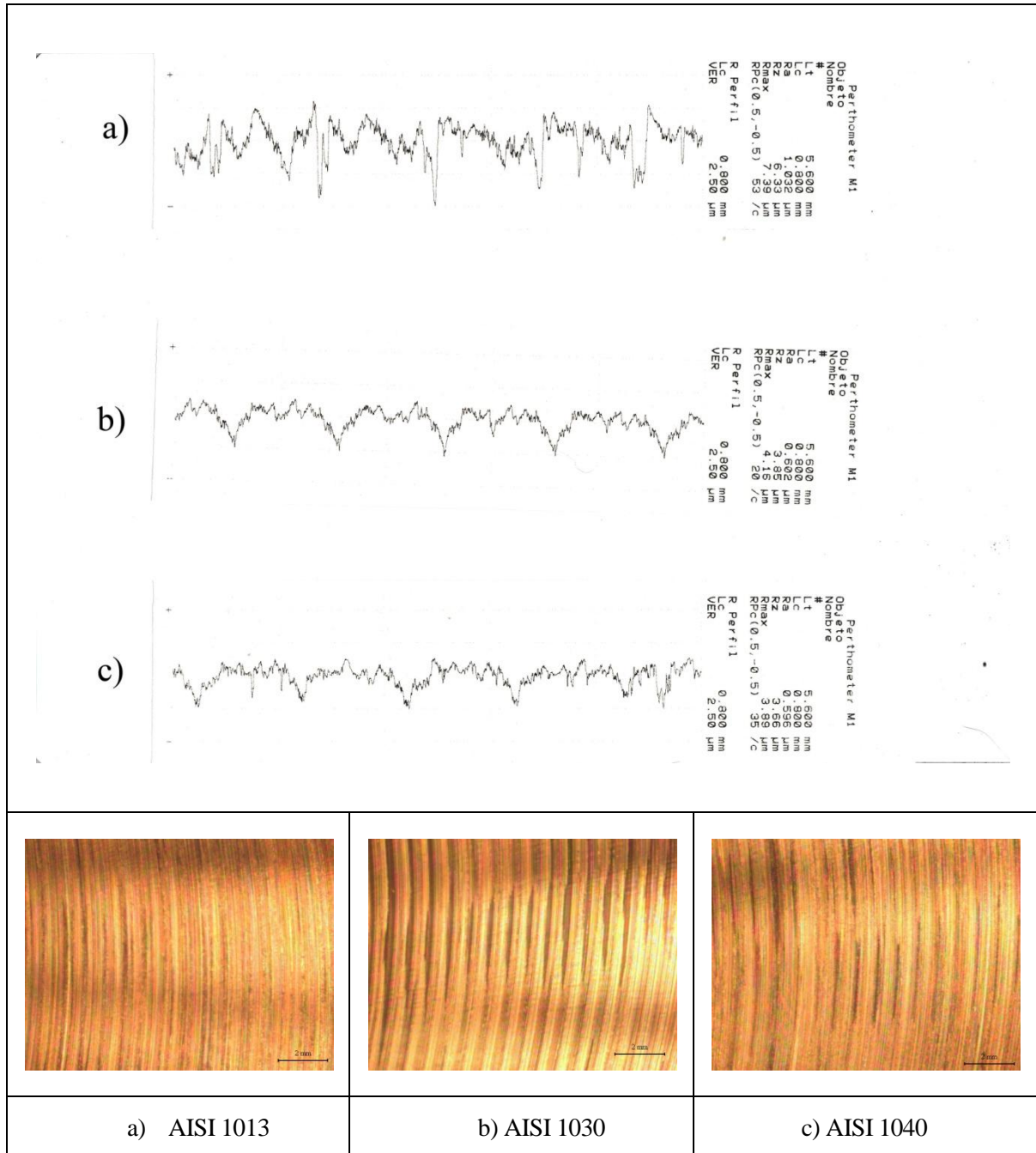


Figura II.9 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado frontal ( $V_c = 193,52 \text{ m/min}$   $f_z = 0,267 \text{ mm/rev}$ )

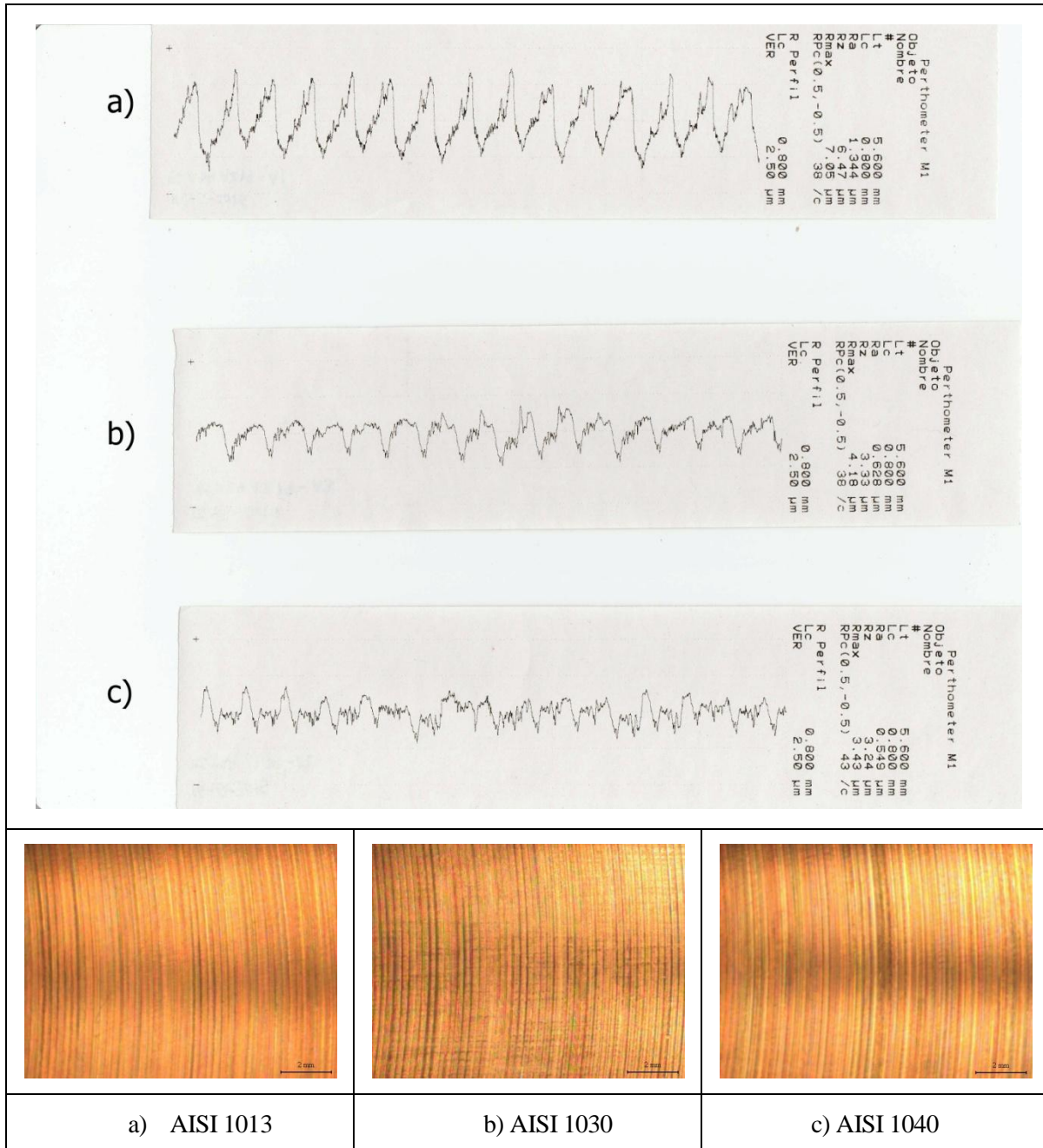


Figura II.10 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado frontal ( $V_c = 233,74$  m/min  $f_z = 0,119$  mm/rev)

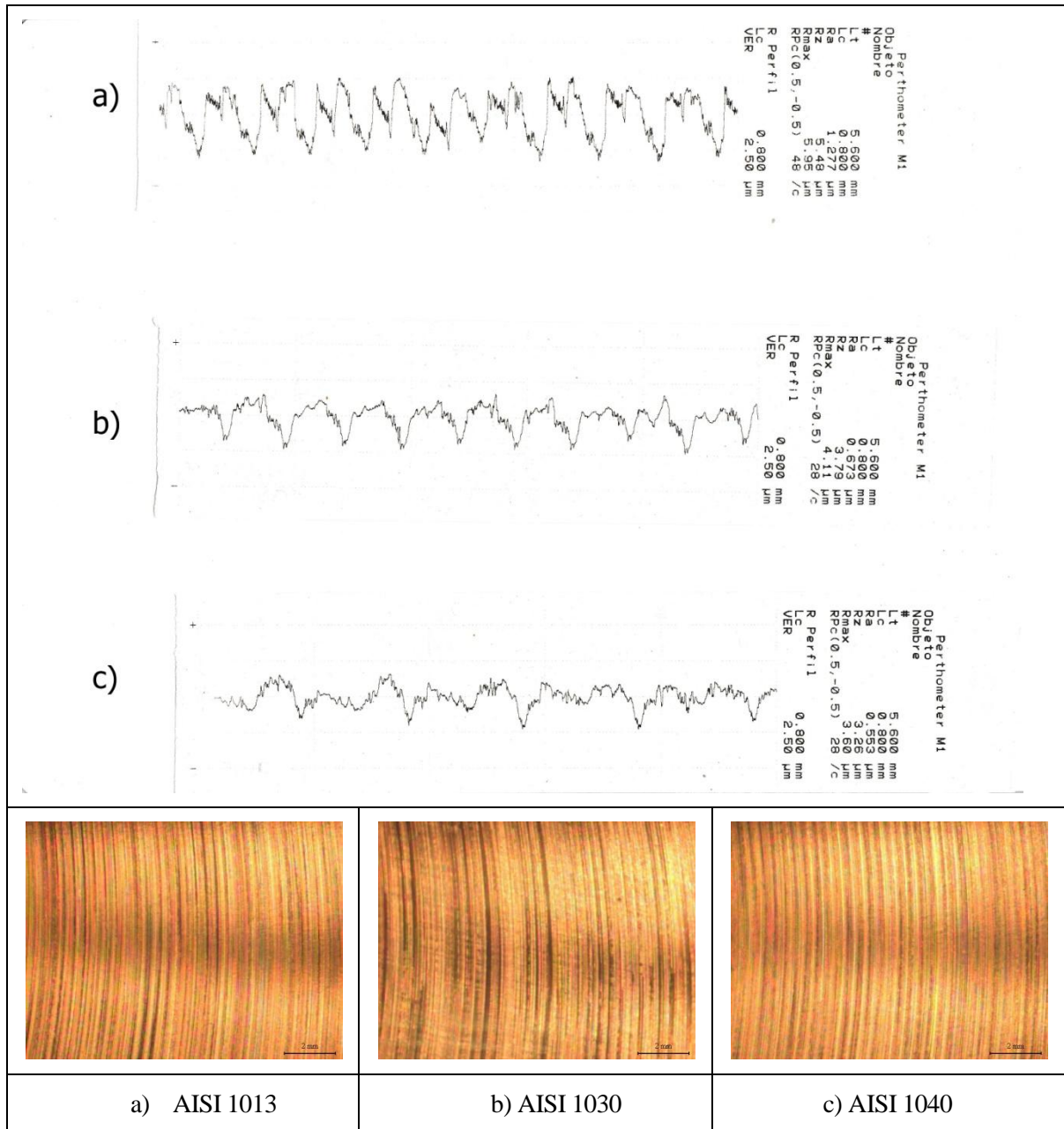


Figura II.11 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
Fresado frontal ( $V_c = 233,74$  m/min  $f_z = 0,178$  mm/rev)

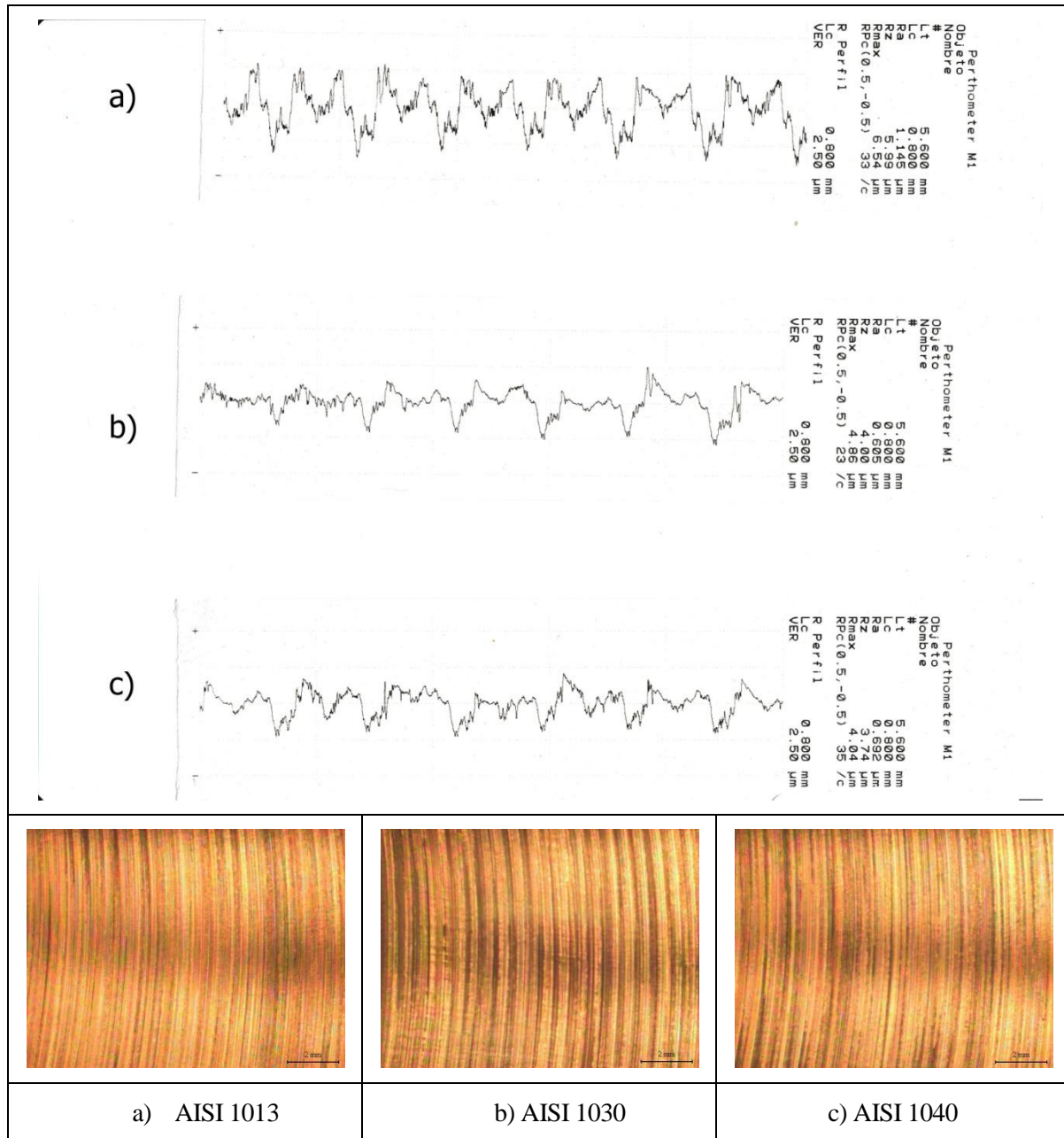


Figura II.12 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado frontal ( $V_c = 233,74$  m/min  $f_z = 0,267$  mm/rev)

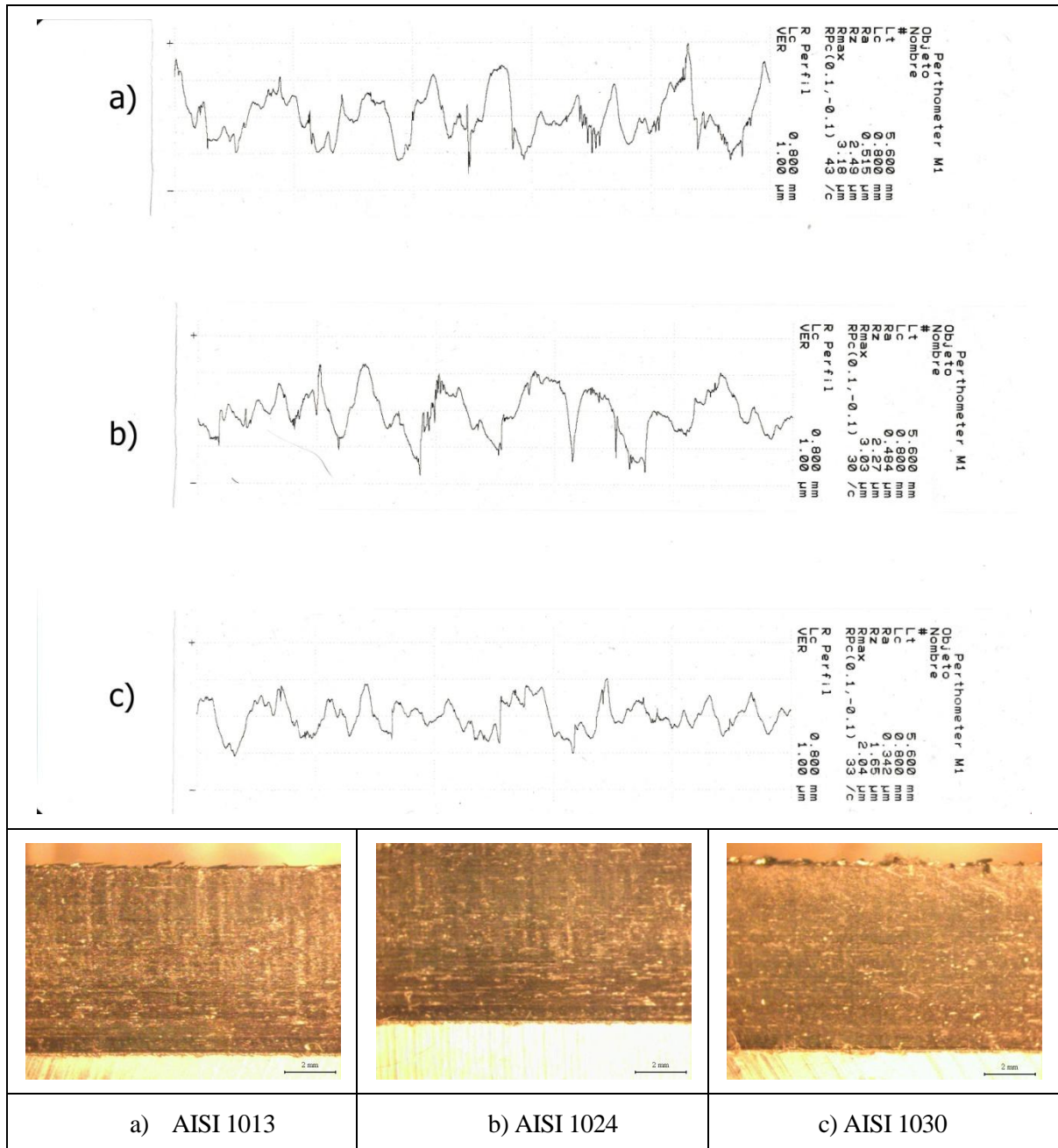


Figura II.13 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.

Fresado combinado ( $V_c = 29,03$  m/min  $f_z = 0,029$  mm/rev)

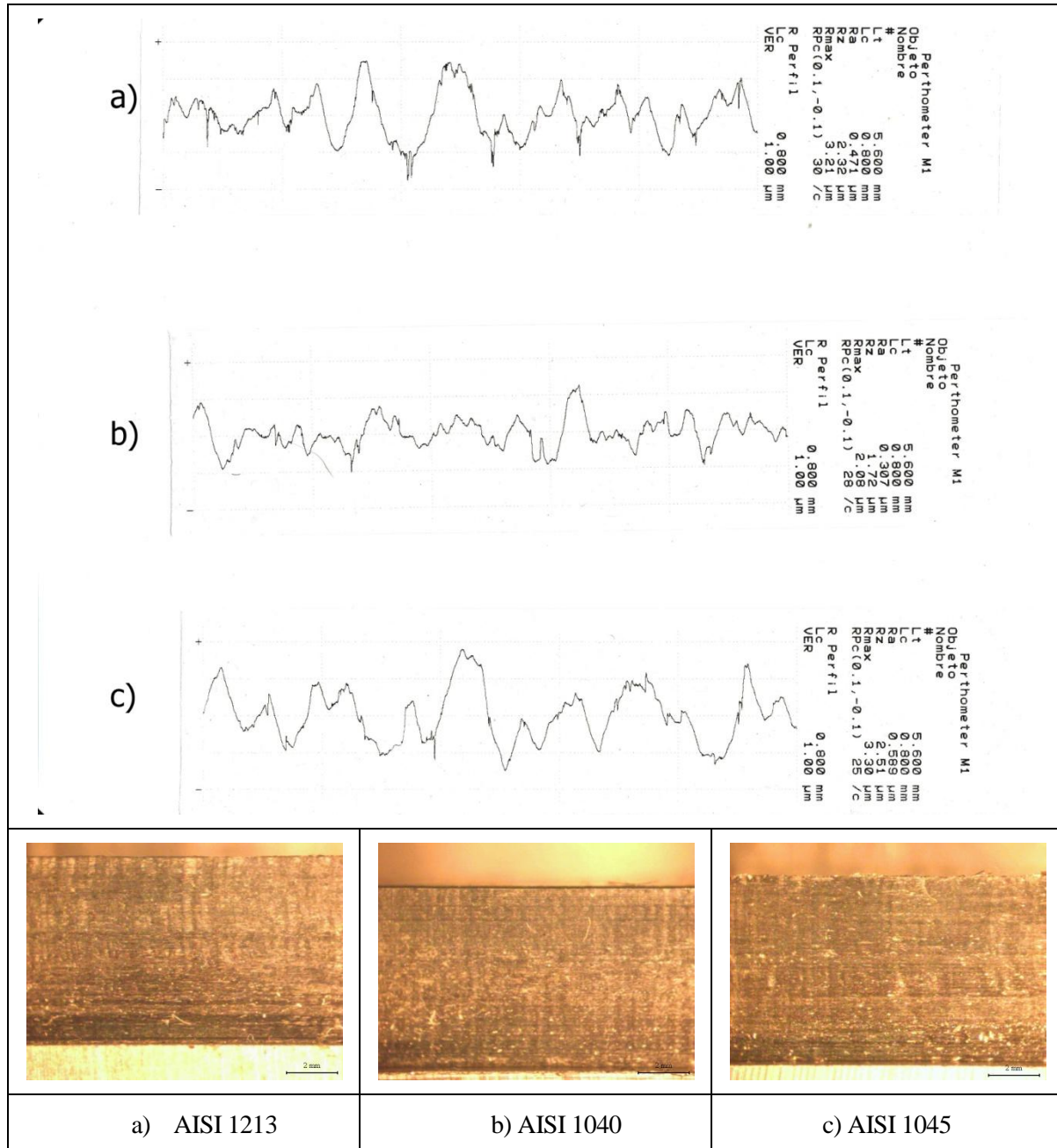


Figura II.14 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 29,03$  m/min  $f_z = 0,029$  mm/rev)



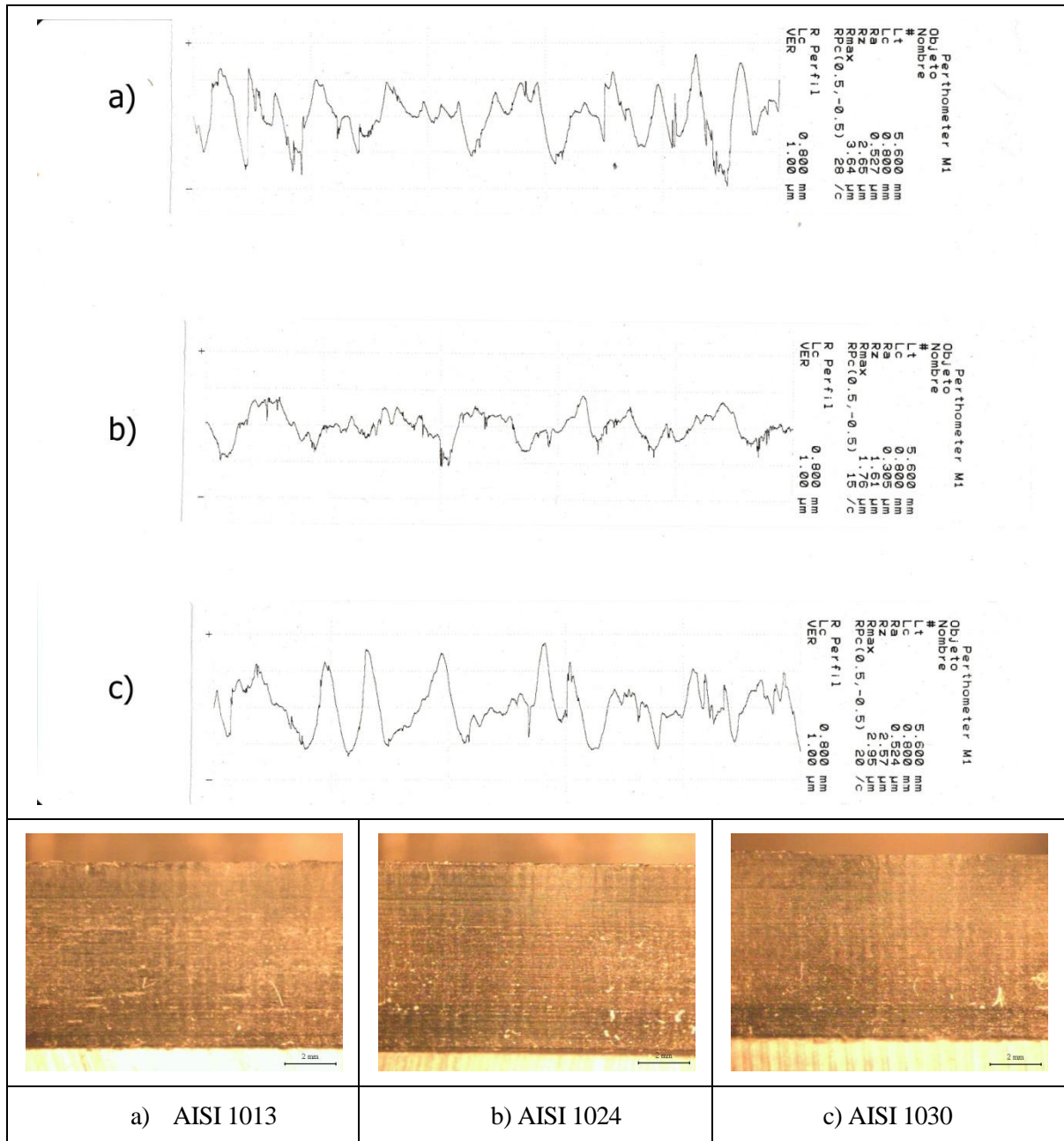


Figura II.15 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 29,03$  m/min  $f_z = 0,044$  mm/rev)

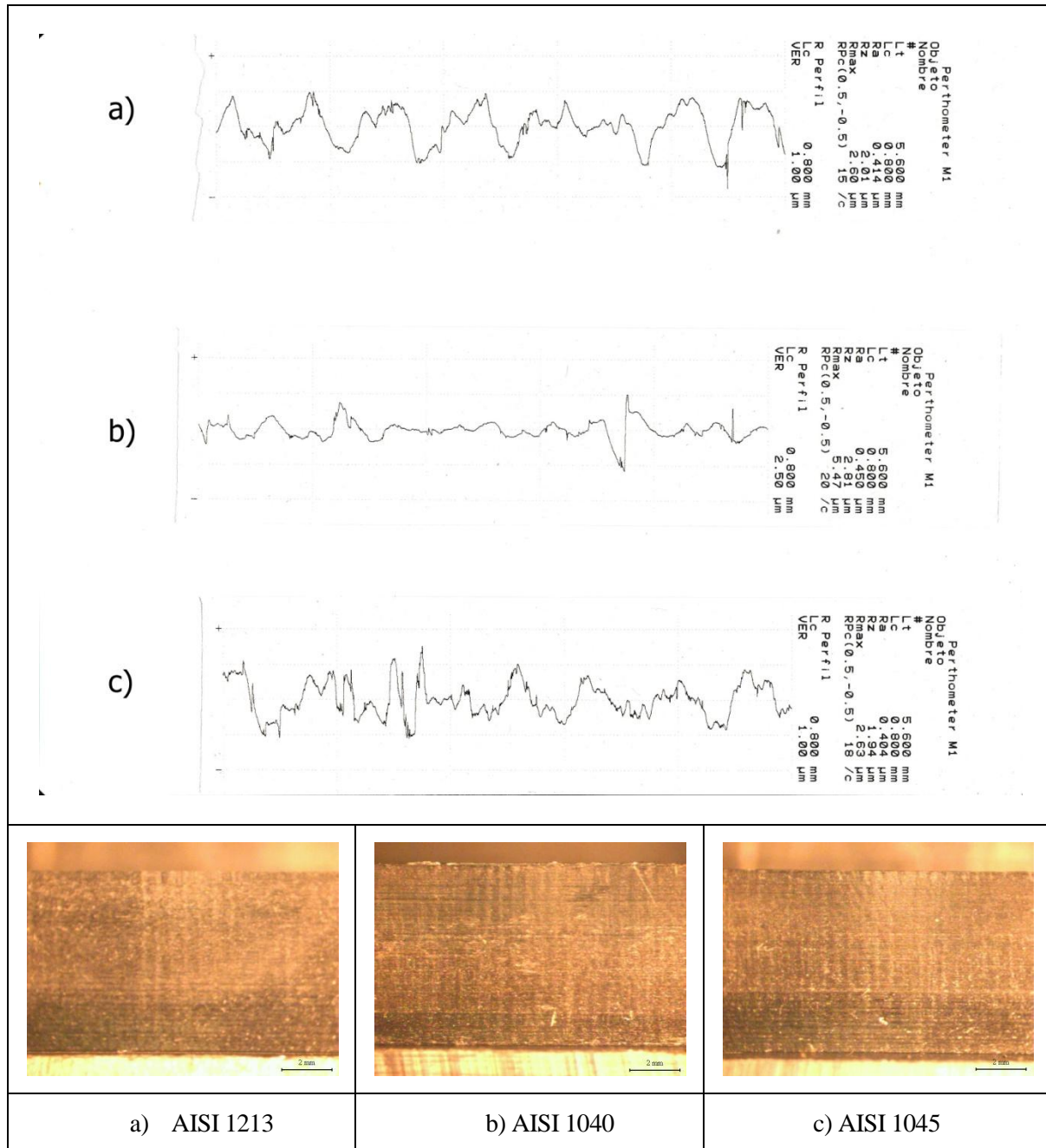


Figura II.16 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 29,03$  m/min  $f_z = 0,044$  mm/rev)

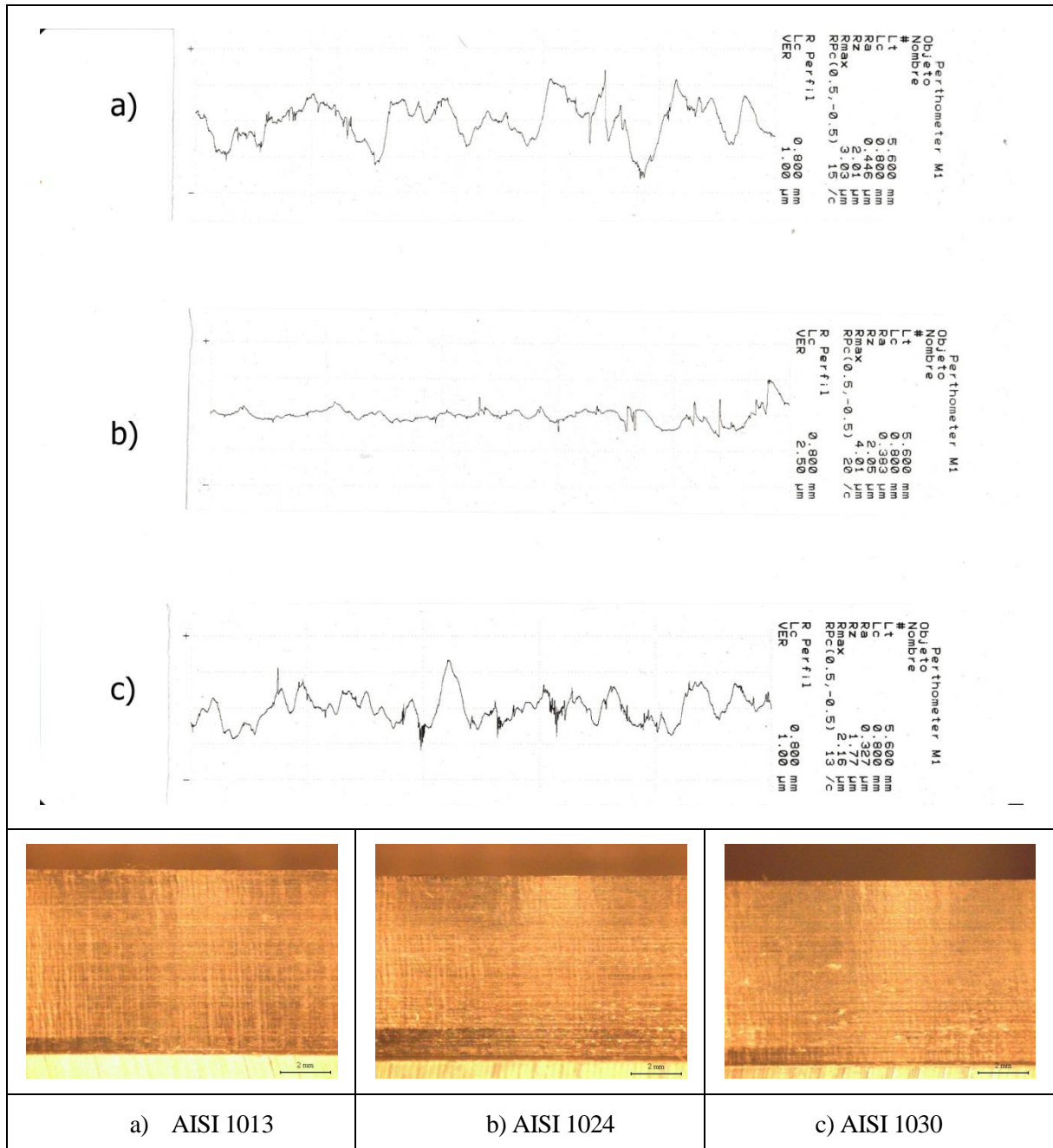


Figura II.17 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 29,03 \text{ m/min}$   $f_z = 0,054 \text{ mm/rev}$ )

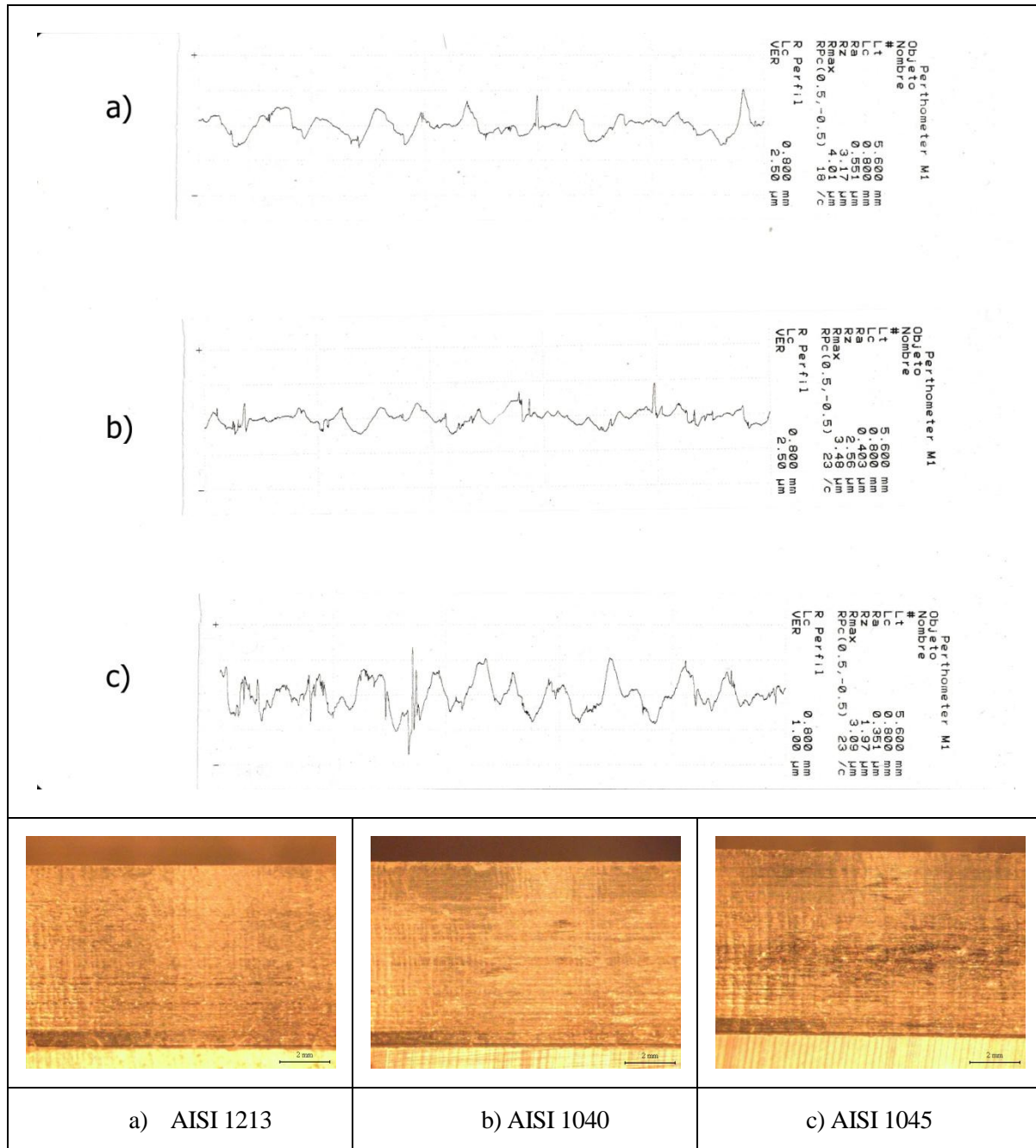


Figura II.18 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 29,03$  m/min  $f_z = 0,054$  mm/rev)

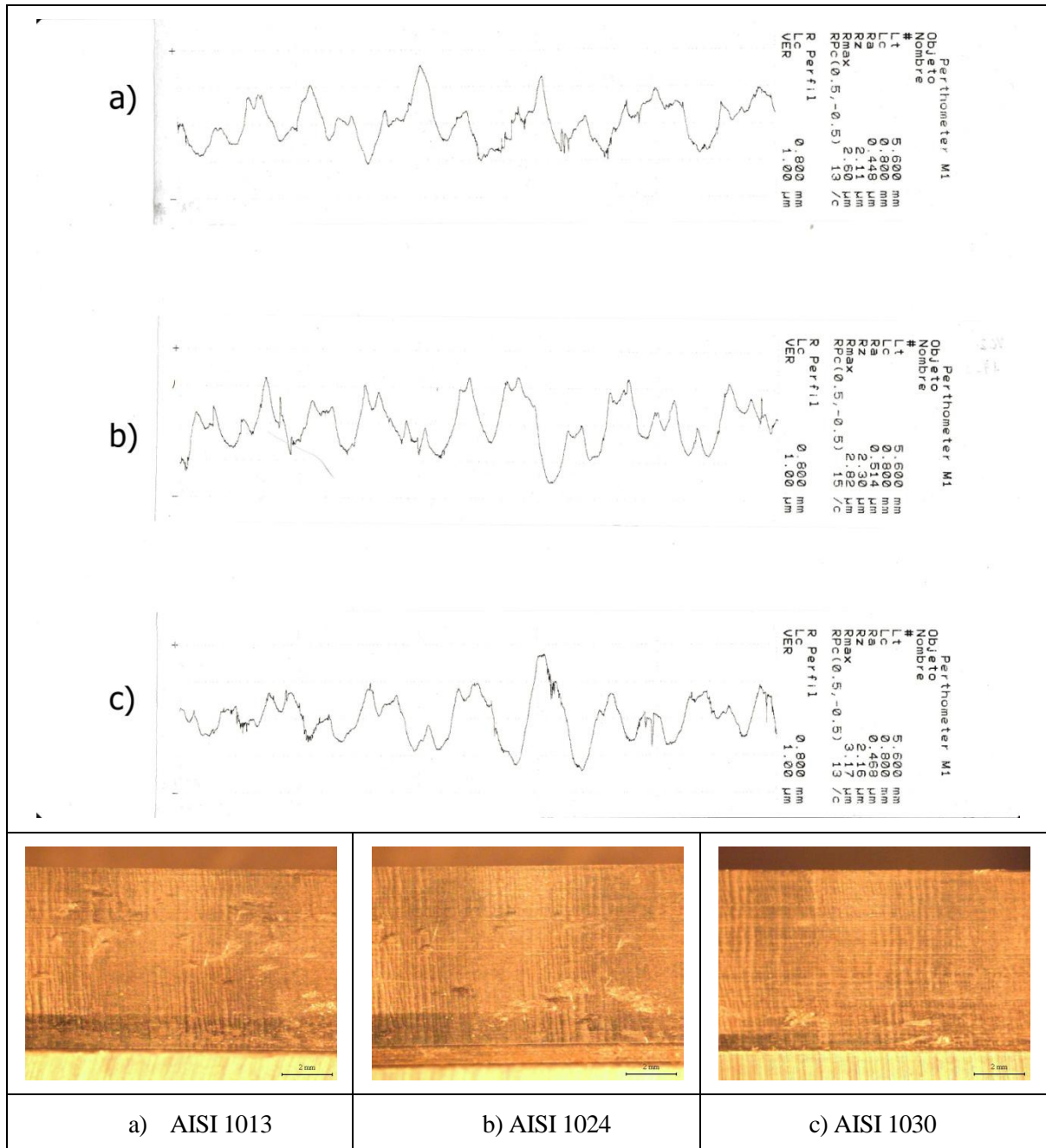


Figura II.19 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 29,03$  m/min  $f_z = 0,081$  mm/rev)



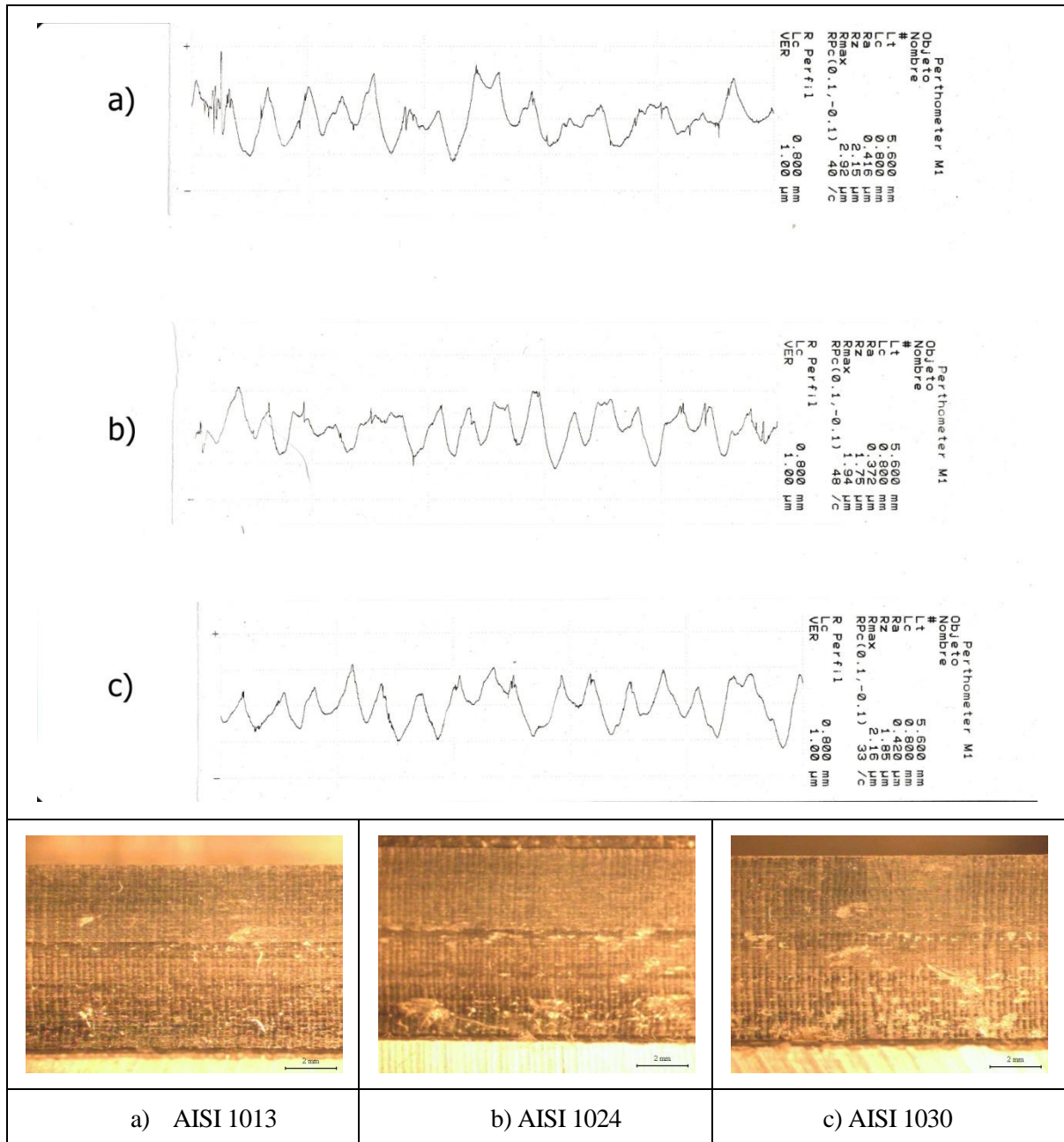


Figura II.21 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 29,03$  m/min  $f_z = 0,121$  mm/rev)

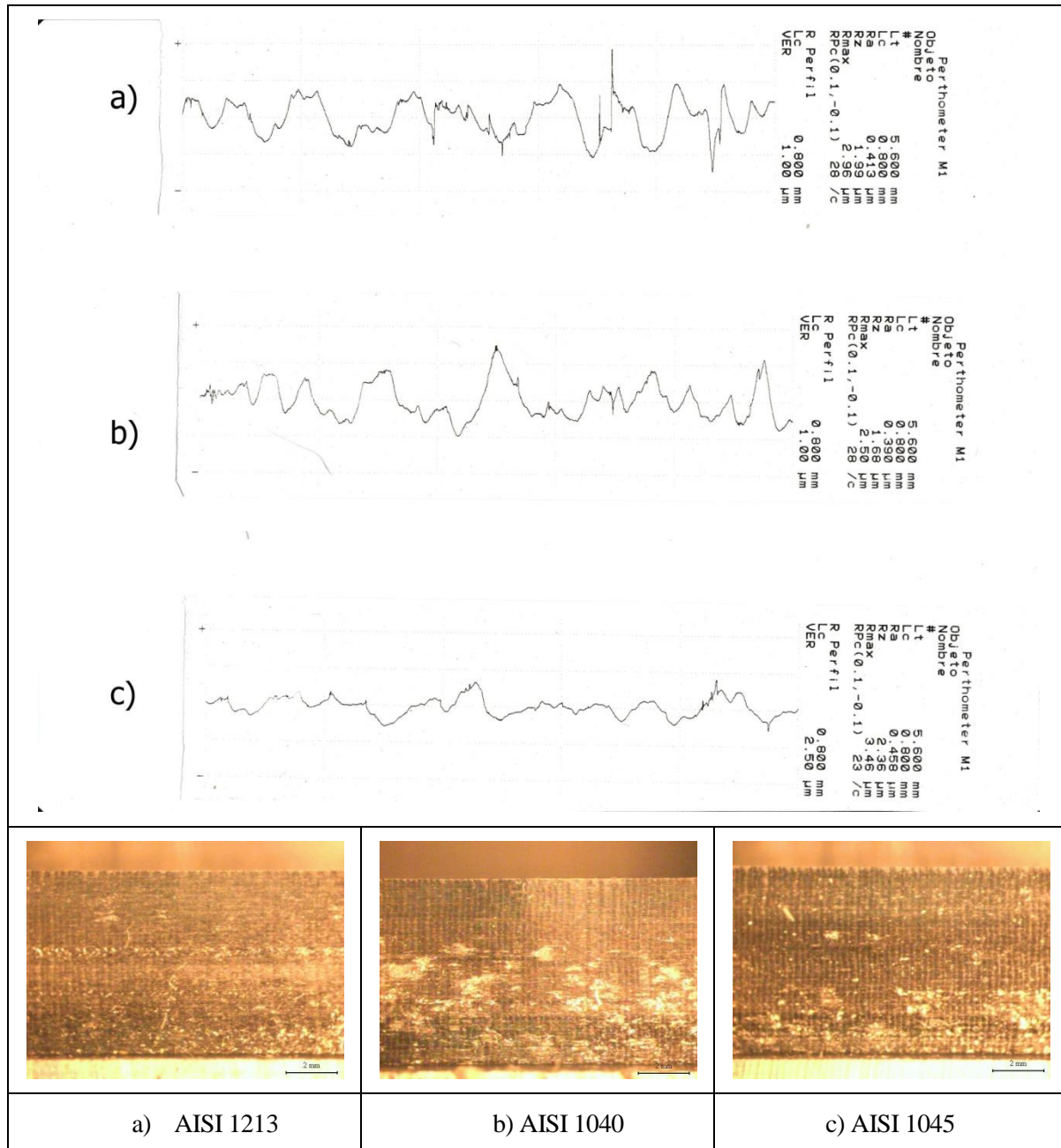


Figura II.22 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 29,03$  m/min  $f_z = 0,121$  mm/rev)



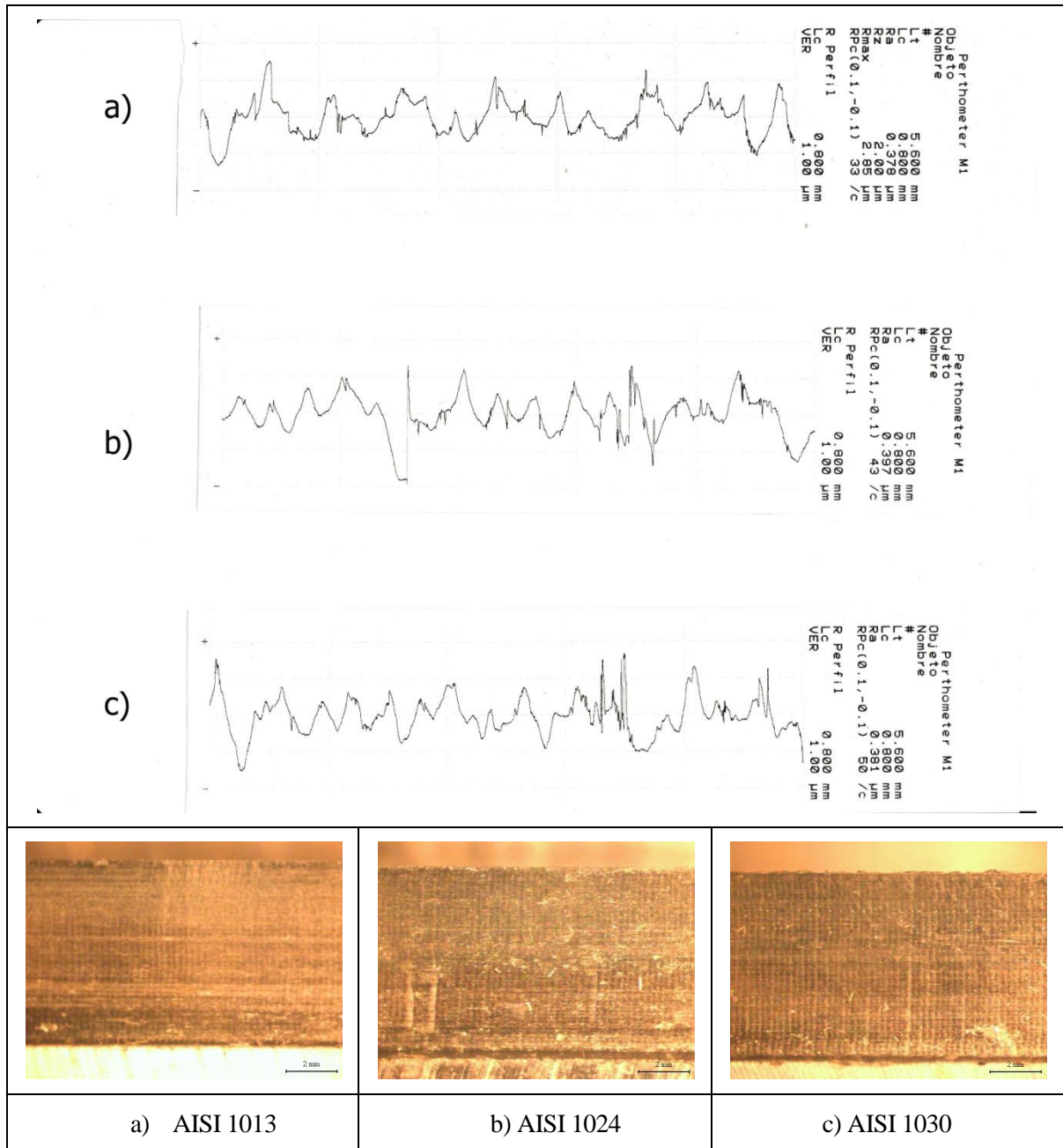


Figura II.23 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 19,60$  m/min  $f_z = 0,179$  mm/rev)

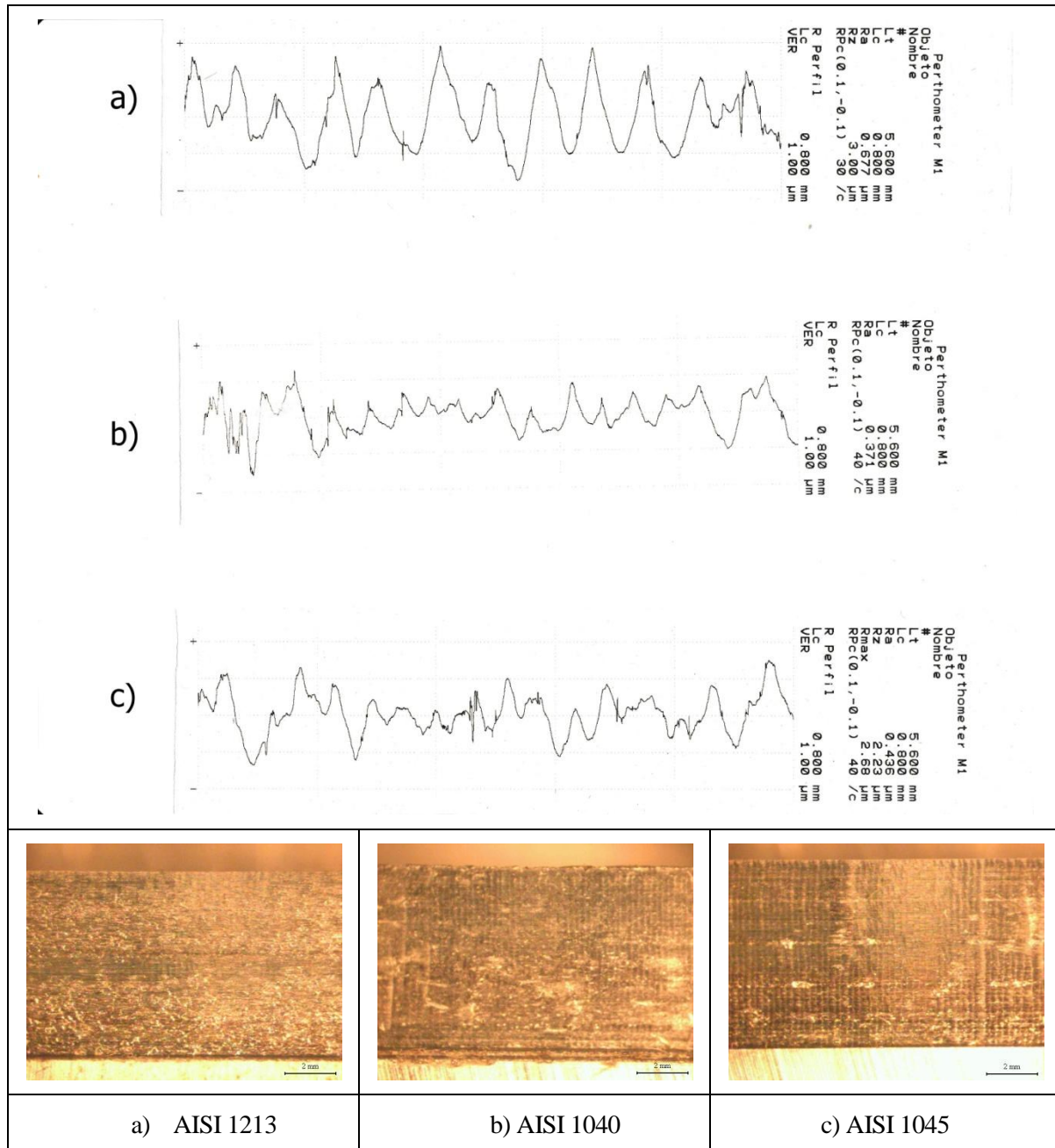


Figura II.24 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 19,60$  m/min  $f_z = 0,179$  mm/rev)

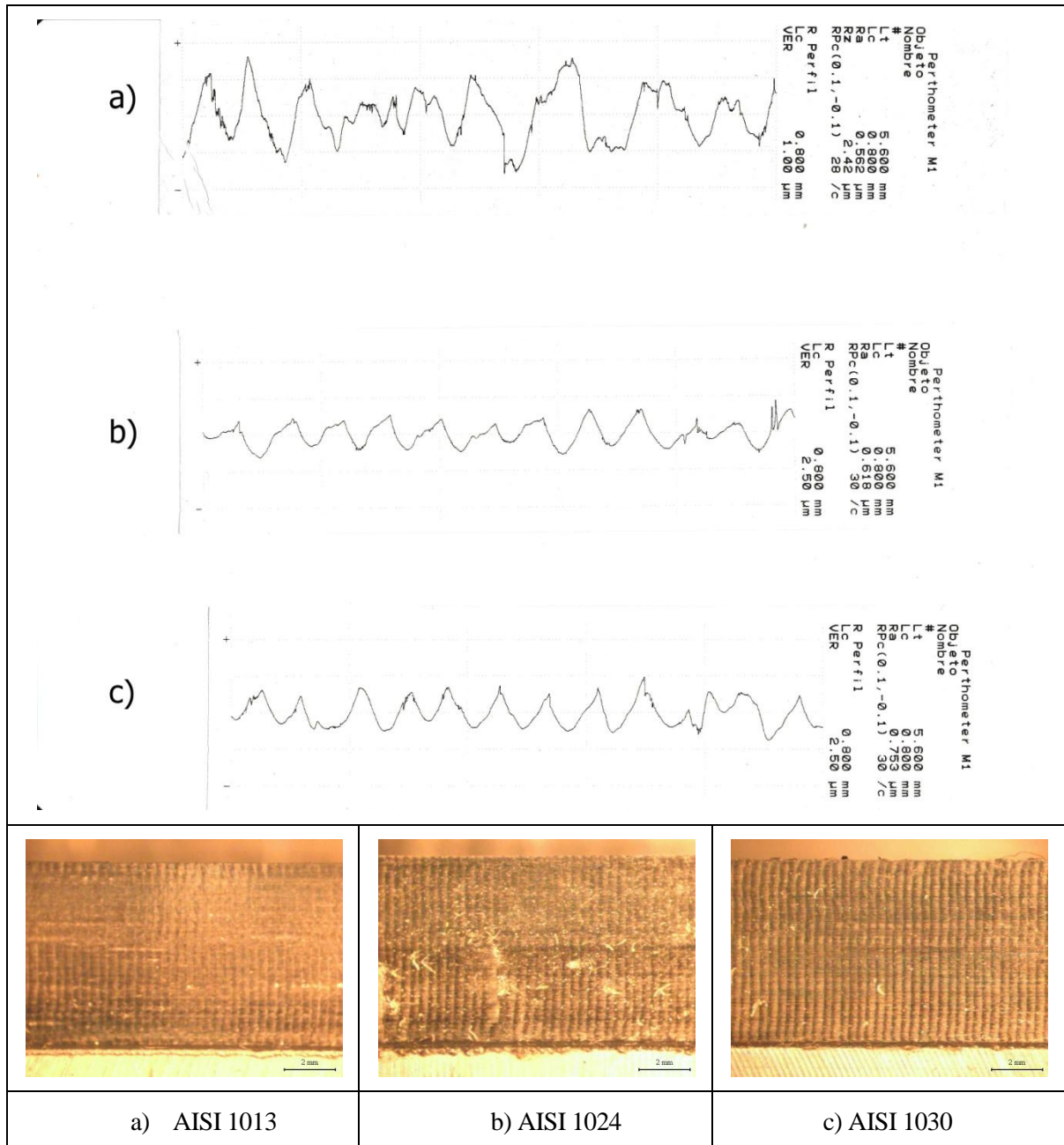


Figura II.25 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 19,60$  m/min  $f_z = 0,199$  mm/rev)

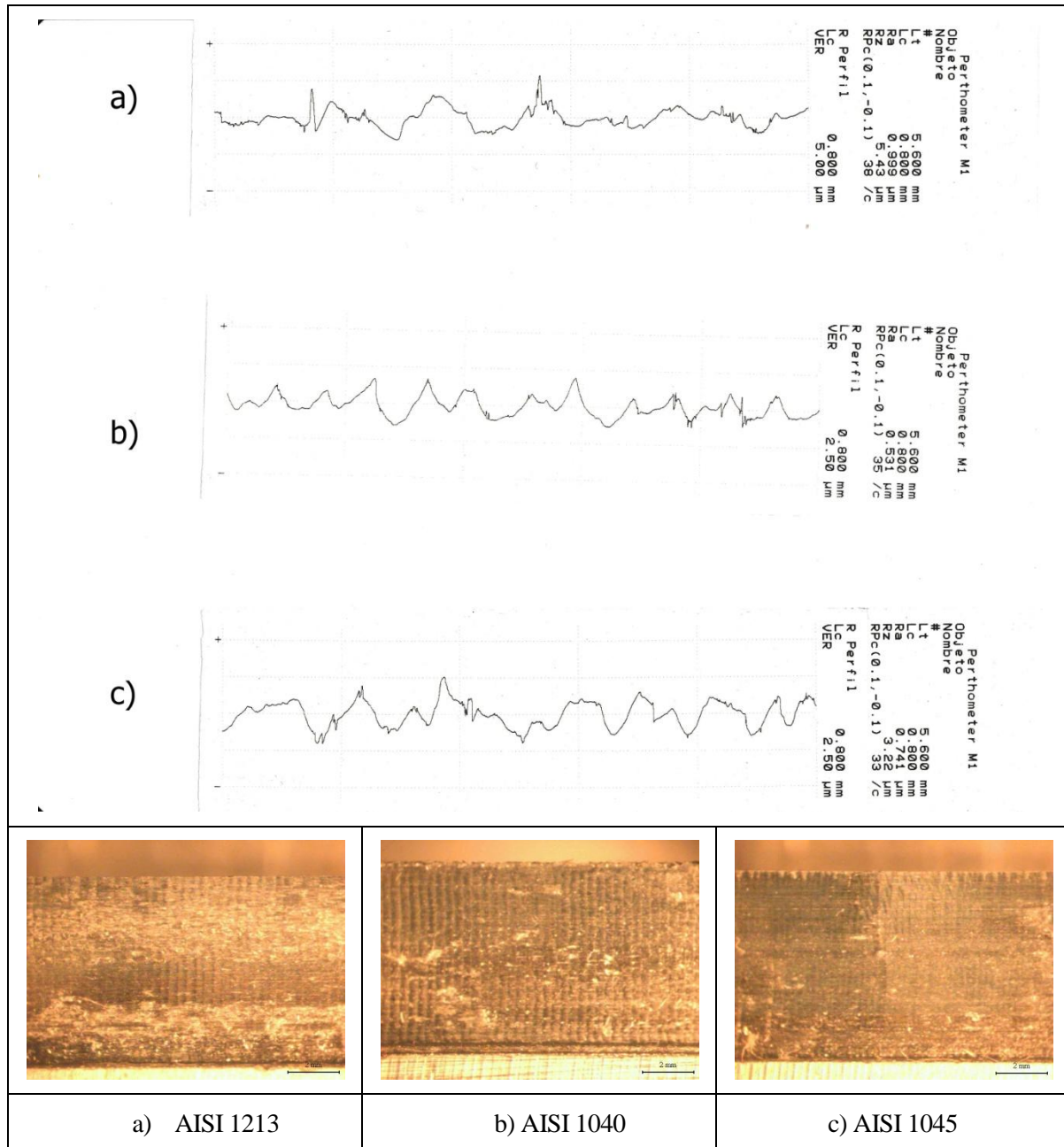


Figura II.26 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 19,60 \text{ m/min}$   $f_z = 0,199 \text{ mm/rev}$ )

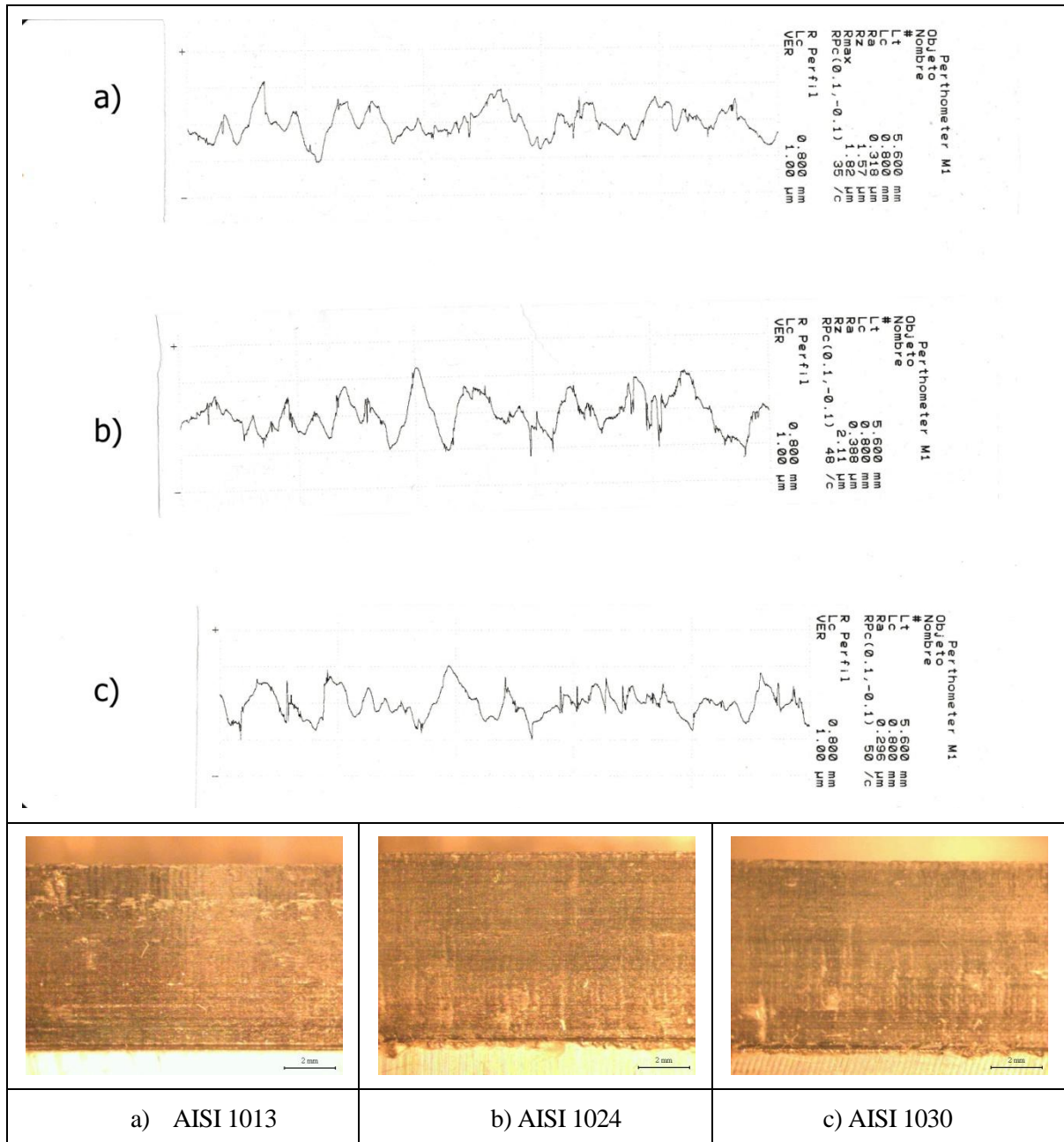


Figura II.27 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 35,06 \text{ m/min}$   $f_z = 0,067 \text{ mm/rev}$ )

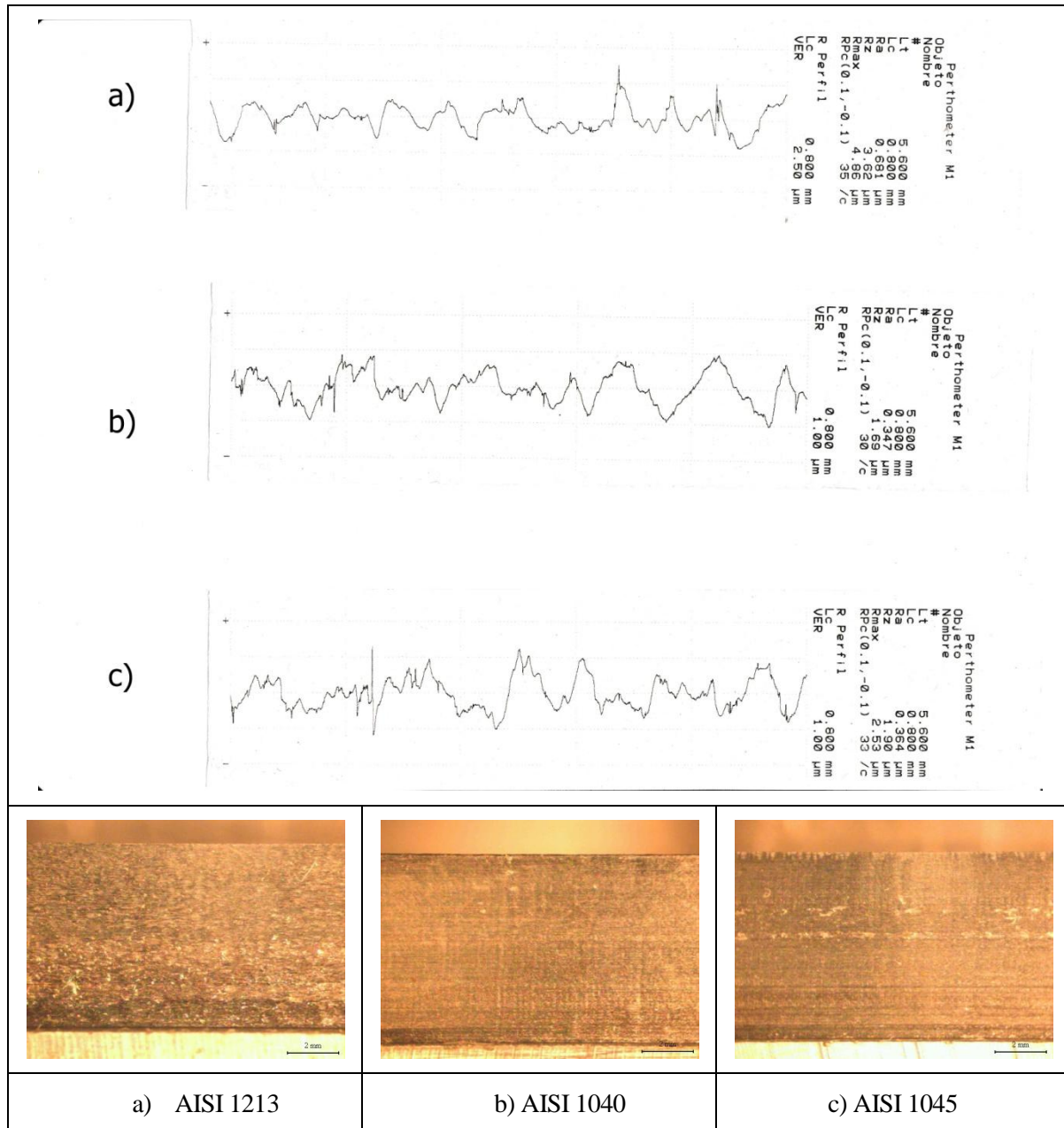


Figura II.28 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
Fresado combinado ( $V_c = 35,06$  m/min  $f_z = 0,067$  mm/rev)

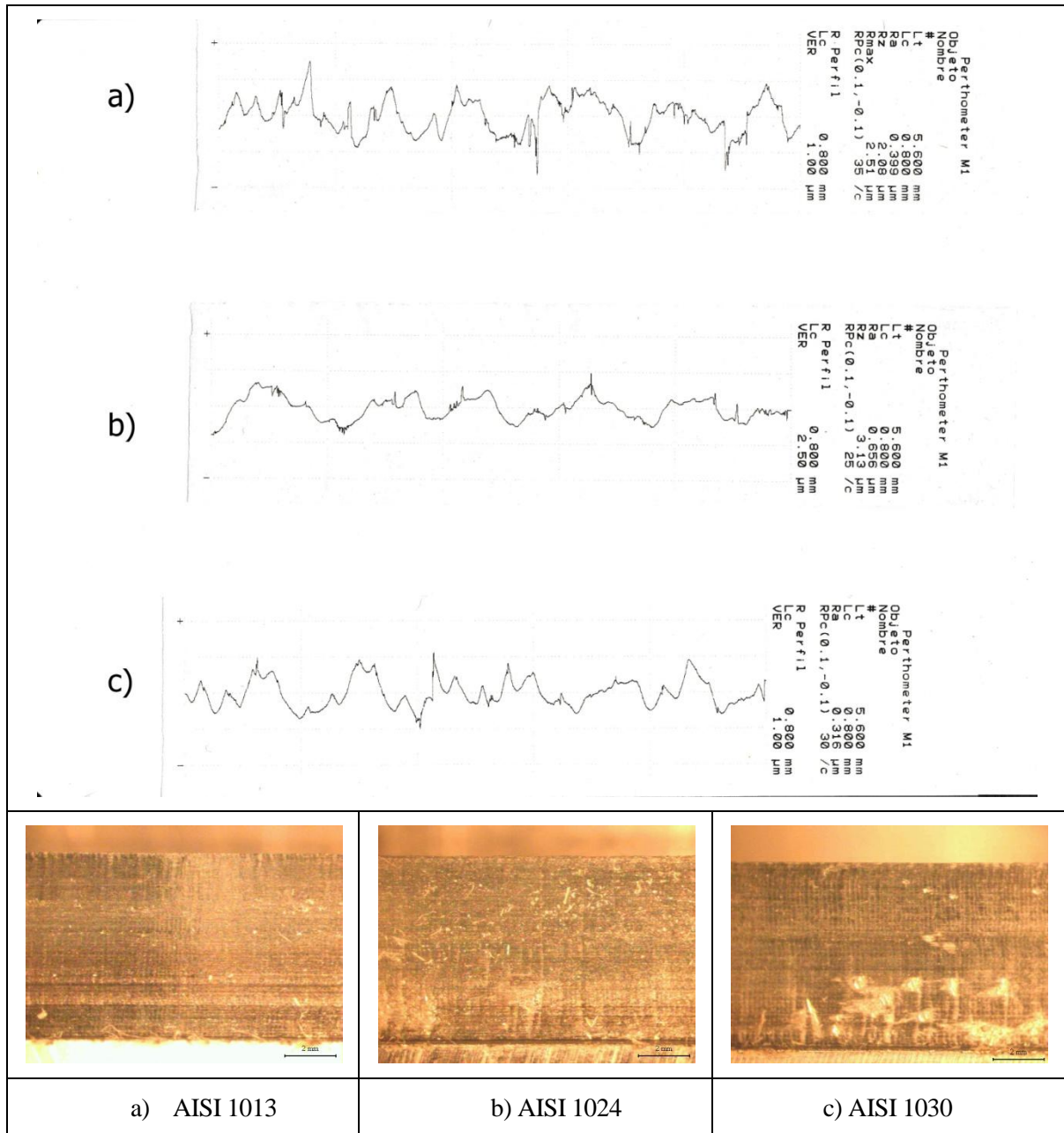


Figura II.29 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 35,06$  m/min  $f_z = 0,100$  mm/rev)

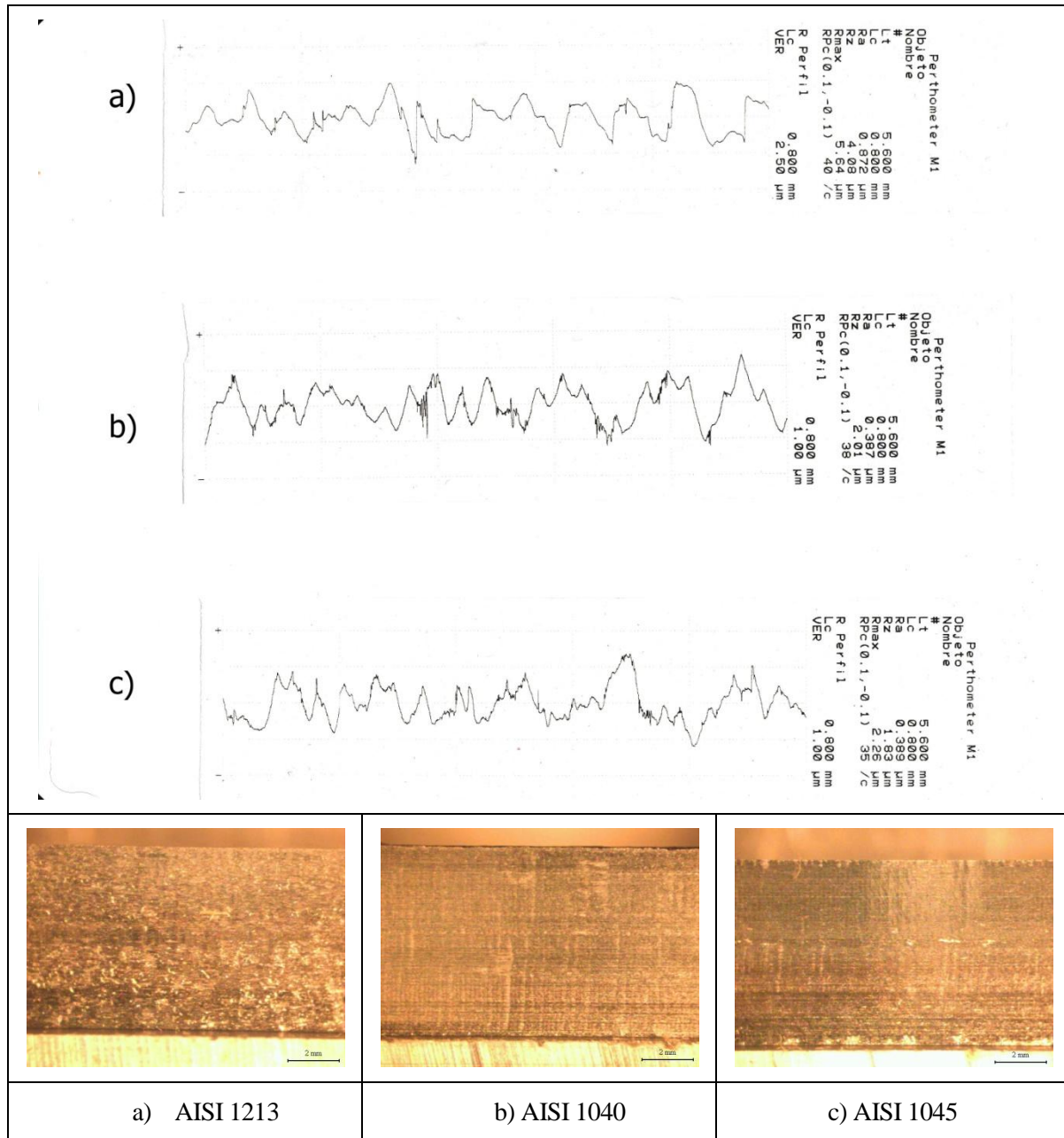


Figura II.30 Perfiles de rugosidad y huellas de mecanizado.  
 Fresado combinado ( $V_c = 35,06$  m/min  $f_z = 0,100$  mm/rev)



