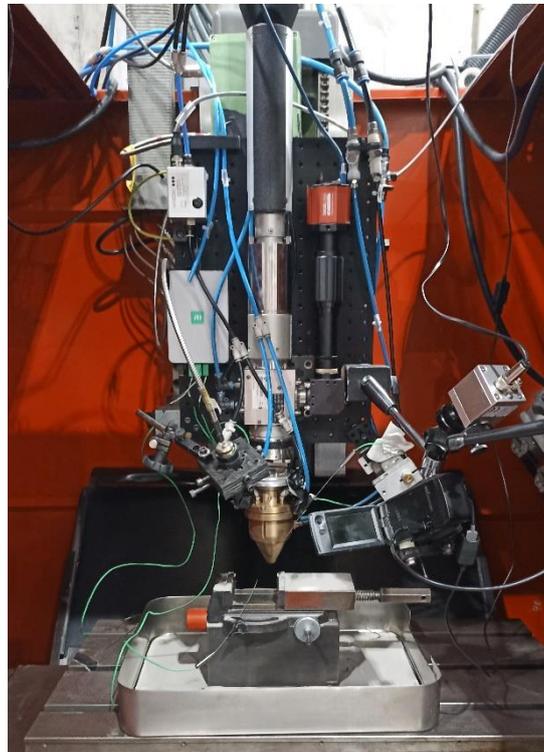


GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

MONITORIZACIÓN Y ANÁLISIS DE DEFECTOS EN FABRICACIÓN ADITIVA (DED)



Estudiante: Solas Zarraga, Jaime

Director/Directora: Aitzol Lamikiz Mentxaka

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
LABURPENA	3
1. MEMORIA	4
1.1. INTRODUCCIÓN	4
1.2. CONTEXTO	5
1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	7
1.4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	8
1.5. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	9
1.5.1. <i>Direct Energy Deposition (DED)</i>	9
1.5.2. <i>Pirómetro</i>	13
1.6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	15
1.6.1. <i>Alternativa 1: No monitorizar.</i>	15
1.6.2. <i>Alternativa 2: Empleo de termopares.</i>	15
1.6.3. <i>Alternativa 3: Extensión con análisis acústico.</i>	15
1.7. ANÁLISIS DE RIESGOS.....	16
2. METODOLOGÍA	18
2.1. EQUIPO Y MATERIAL EMPLEADO	18
2.2. DESCRIPCIÓN DE TAREAS	23
2.3. DIAGRAMA GANTT.....	25
2.4. ASPECTOS ECONÓMICOS	26
2.5. PLAN DE PROYECTO Y PLANIFICACIÓN	27
2.6. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS	30
2.6.1. <i>Defecto de ranuras</i>	32
2.6.2. <i>Defecto de rugosidad</i>	35
2.6.3. <i>Defecto de viruta</i>	37
2.6.4. <i>Defecto de polvo metálico sobre el sustrato</i>	39
2.6.5. <i>Defecto de aceite</i>	42
2.6.6. <i>Variación de altura</i>	45
2.6.7. <i>Defecto de variación de potencia</i>	48
2.6.8. <i>Defecto de variación de velocidad de avance</i>	53
2.6.9. <i>Defecto de variación de caudal</i>	58
2.6.10. <i>Defecto de inclinación</i>	62
3. CONCLUSIONES	64
4. BIBLIOGRAFÍA	65
5. ANEXO I: TEMPERATURA DEL MELT POOL	66

5.1.	REFERENCIA.....	66
5.2.	DEFECTO RANURAS.....	67
5.3.	DEFECTO RUGOSIDAD	68
5.4.	DEFECTO DE VIRUTA	69
5.5.	DEFECTO DE POLVO METÁLICO SOBRE SUSTRATO.....	70
5.6.	DEFECTO DE ACEITE.....	71
5.7.	DEFECTO DE ALTURA	72
5.8.	DEFECTO DE VARIACIÓN DE POTENCIA.....	74
5.9.	DEFECTO DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE AVANCE.....	76
5.10.	DEFECTO DE VARIACIÓN DE CAUDAL	78
5.11.	DEFECTO DE INCLINACIÓN	80
6.	ANEXO II: ANCHURA DEL MELT POOL.	81
6.1.	REFERENCIA.....	81
6.2.	DEFECTO RANURAS.....	82
6.3.	DEFECTO RUGOSIDAD	83
6.4.	DEFECTO DE VIRUTA	84
6.5.	DEFECTO DE POLVO METÁLICO SOBRE SUSTRATO.....	85
6.6.	DEFECTO DE ACEITE.....	86
6.7.	DEFECTO DE ALTURA	87
6.8.	DEFECTO DE VARIACIÓN DE POTENCIA.....	88
6.9.	DEFECTO DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE AVANCE.....	90
6.10.	DEFECTO DE VARIACIÓN DE CAUDAL	92
6.11.	DEFECTO DE INCLINACIÓN	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Taller Máquina-Herramienta de la Escuela de Ingenieros Bilbao.....	6
Ilustración 2. Procesos DED en función del tipo de fuente de calor y forma del material de aporte.	9
Ilustración 3. Elementos principales del aporte.....	10
Ilustración 4. Tecnologías y parámetros seleccionables en láser-DED.....	11
Ilustración 5. Fabricación mediante Láser-DED	12
Ilustración 6. Pirómetro	13
Ilustración 7. Centro de fabricación aditiva.	18
Ilustración 8. Generador láser.....	18
Ilustración 9. Refrigerador láser.	19
Ilustración 10. Refrigerador boquilla.....	19
Ilustración 11. Termopar.	20
Ilustración 12. Centro de adquisición de datos.....	20
Ilustración 13. Pirómetro.	20
Ilustración 14. Cámara coaxial.	21
Ilustración 15. Flow watch.	21
Ilustración 16. Centro de mecanizado.	22
Ilustración 17. Rectificadora plana.	22
Ilustración 18. Fresado de una ranura.....	28
Ilustración 19. Elementos de medida de temperatura.....	29
Ilustración 20. Sustrato ranurado.....	32
Ilustración 21. Cordones sobre el sustrato ranurado.....	34
Ilustración 22. Sustrato con viruta.....	37
Ilustración 23. Sustrato de viruta con cordón.	38
Ilustración 24. Sustrato con polvo tras el aporte.	39
Ilustración 25. Irregularidades en los cordones.	41
Ilustración 26. Sustrato con aceite tras el aporte.	44
Ilustración 27. Distancias focales con la variación de altura.....	45
Ilustración 28. Diferencia entre diámetro del melt pool en el caudal máximo vs caudal mínimo.....	59
Ilustración 29. Sustrato con 3 cordones con caudal máximo y 3 con caudal mínimo....	61
Ilustración 30. Colocación del sustrato para el ensayo.....	62

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Temperatura Referencia	31
Gráfico 2. Diámetro melt pool Referencia.	31
Gráfico 3. Temperatura Ranuras.	33
Gráfico 4. Diámetro melt pool Ranuras.	34
Gráfico 5. Temperatura Rugosidad.	35
Gráfico 6. Diámetro melt pool Rugosidad.	36
Gráfico 7. Temperatura Viruta.	37
Gráfico 8. Diámetro melt pool Viruta.	38
Gráfico 9. Temperatura Polvo (mucho polvo).....	39
Gráfico 10. Diámetro melt pool Polvo (poco polvo).....	40
Gráfico 11. Diámetro melt pool Polvo (mucho polvo).....	40
Gráfico 12. Diámetro melt pool Polvo (poco polvo).....	41
Gráfico 13. Temperatura Aceite.	42
Gráfico 14. Diámetro melt pool Aceite.	43
Gráfico 15. Variaciones de la circularidad de la referencia.	43
Gráfico 16. Variaciones de la circularidad del Aceite.....	44
Gráfico 17. Temperatura Altura negativa.	46
Gráfico 18. Temperatura Altura positiva.....	46
Gráfico 19. Diámetro melt pool Altura negativa.	47
Gráfico 20. Diámetro melt pool Altura positiva.....	47
Gráfico 21. Temperatura Potencia 10% menor a la referencia.....	48
Gráfico 22. Temperatura Potencia 10% menor a la referencia.....	49
Gráfico 23. Diámetro melt pool Potencia 20% menor a la referencia.....	49
Gráfico 24. Diámetro Potencia 20% menor a la referencia.	50
Gráfico 25. Temperatura Potencia 10% mayor a la referencia.....	50
Gráfico 26. Temperatura Potencia 20% mayor a la referencia.....	51
Gráfico 27. Temperatura Potencia 10% mayor a la referencia.....	51
Gráfico 28. Temperatura Potencia 20% mayor a la referencia.....	52
Gráfico 29. Dinámica de la Velocidad de avance negativa.	53
Gráfico 30. Temperatura Velocidad de avance a 420 mm/min.....	54
Gráfico 31. Temperatura Velocidad de avance a 365 mm/min.....	54

Gráfico 32. Diámetro melt pool Velocidad de avance a 420 mm/min.	55
Gráfico 33. Diámetro melt pool Velocidad de avance a 365 mm/min.	55
Gráfico 34. Temperatura Velocidad de avance a 630 mm/min.	56
Gráfico 35. Temperatura Velocidad de avance a 685 mm/min.	56
Gráfico 36. Diámetro melt pool Velocidad de avance a 630 mm/min.	57
Gráfico 37. Diámetro melt pool Velocidad de avance a 685 mm/min.	57
Gráfico 38. Temperatura y Caudal para Caudal mínimo.	58
Gráfico 39. Diámetro melt pool y Caudal para Caudal mínimo.	59
Gráfico 40. Temperatura y Caudal para Caudal máximo.	60
Gráfico 41. Diámetro melt pool y Caudal para Caudal máximo.	61
Gráfico 42. Temperatura Inclinación.	62
Gráfico 43. Diámetro melt pool Inclinación.	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de riesgos.	16
Tabla 2. Especificaciones del centro de fabricación aditiva.....	18
Tabla 3. Especificaciones láser.....	18
Tabla 4. Descripción de tareas.....	23
Tabla 5. Diagrama Gantt.	25
Tabla 6. Presupuesto.....	26
Tabla 7. Parámetros de referencia.	30
Tabla 8. Rugosidades medias del sustrato.	35

Resumen

El objetivo de este trabajo supone el abordaje de la monitorización de Aporte Metálico por Láser introduciendo defectos puntuales que se evaluarán a fin de obtener una serie de relaciones entre defecto y señal. La adopción de esta tecnología dentro del mundo de la máquina-herramienta está en auge siendo ideal para geometrías complejas, reparación de piezas y ahorro de material. No obstante, no todo son ventajas respecto a procesos industriales más tradicionales ya que son procesos sumamente pulidos y muy controlados. Dado que nos encontramos ante una tecnología relativamente reciente existen todavía un sinnúmero de detalles que son necesarios investigar para poder afinar el empleo de estas técnicas. Con el objetivo de conocer más sobre este proceso se ha planteado monitorizar, mediante diversos parámetros controlados, el proceso a fin de conocer qué señales pueden ser directamente relacionadas con cada perturbación. Los resultados ayudarán a comprender en qué grado afecta a la calidad del aporte unos u otros defectos y cómo estos se pueden evitar.

Palabras clave: Láser DED, monitorización, defecto.

Abstract

The objective of this work involves monitoring Laser Metal Deposition by introducing specific defects that will be evaluated in order to obtain a series of relationships between defect and signal. The adoption of this technology within the machine tool industry is booming, being ideal for complex geometries, part repair, and material savings. However, not everything is advantageous compared to more traditional industrial processes, as these are highly refined and very controlled processes. Since we are dealing with a relatively recent technology, there are still a multitude of details that need to be investigated to fine-tune the use of these techniques. To learn more about this process, it has been proposed to monitor, through various controlled parameters, the process to understand which signals can be directly related to each disturbance. The results will help us understand to what extent the quality of the deposition is affected by different defects and how these can be avoided.

Keywords: Laser DED, monitoring, defect.2

Laburpena

Lan honen helburua da laser bidezko metalezko ekarpenaren monitorizazioari ekitea, akats puntualak sartuz. Akats horiek ebaluatu egingo dira, akatsaren eta seinalearen arteko erlazio batzuk lortzeko. Makina-erremintaren munduan teknologia hori erabiltzea oso egokia da geometria konplexuetarako, piezak konpontzeko eta materiala aurrezteko. Hala ere, dena ez da onuragarria industria-prozesu tradizionalagoekin alderatuta, oso prozesu leunduak eta oso kontrolatuak baitira. Teknologia nahiko berri baten aurrean gaudenez, teknika horien erabilera doitzeko ikertu behar diren hainbat eta hainbat xehetasun daude oraindik. Prozesu horri buruz gehiago jakiteko, hainbat parametro kontrolaturen bidez prozesua monitorizatzea planteatu da, perturbazio bakoitzarekin zuzenean lotuta egon daitezkeen seinaleak ezagutzeko. Emaitzek ekarpenaren kalitateari zer mailatan eragiten dion eta akats batzuk edo besteak ulertzen lagunduko digute, baita akats horiek nola saihestu daitezkeen ulertzen ere.

Gako-hitzak: Laser DED, monitorizazioa, akatsa.

1. MEMORIA

1.1. Introducción

Mediante este documento se pretende estudiar la mejora y avance en la fabricación aditiva, concretamente en el proceso de *Laser Cladding* o Aporte Metálico por Láser. Para ello se emplearán diferentes técnicas de monitorización en las que se incluyen sensores, cámaras y programas. La sinergia de estos elementos concluirá con la evaluación y discusión de los datos obtenidos.

En primer lugar, se establecerá un contexto con el fin de situar el proyecto en una escala temporal y espacial. Seguidamente, se expondrán los objetivos y el alcance que, junto con el contexto, establecerá unas premisas sobre el porqué y a donde se quiere llegar con este trabajo.

A continuación, se abordará el estado del arte con el objetivo de describir la técnica de fabricación aditiva empleada y se presentarán los instrumentos empleados en la monitorización. Se hará hincapié en el uso de estos aparatos que son fundamentales para una correcta evaluación y seguimiento de lo que sucede al emplear estas máquinas.

Entrando en el grueso del asunto, se mostrará la hoja de ruta que se ha seguido, presentando la maquinaria, equipo empleado y técnicas utilizadas. La metodología empleada se ha basado en una planificación de los ensayos a realizar, el trabajo en máquina, la recopilación de datos y por último y más importante, la discusión de resultados.

Para finalizar, se evaluarán exhaustivamente los resultados con el fin de encontrar relaciones directas entre los defectos y las señales obtenidas y se detallarán las conclusiones obtenidas a través de este trabajo.

Por último, se proporcionarán los resultados completos del trabajo en los anexos.

1.2. Contexto

La Fabricación Aditiva, mejor conocida por *Additive Manufacturing (AM)*, es una tecnología muy reciente y en auge en el ámbito de fabricación o reparación de piezas. Una de las definiciones más acertadas es la que ofrece la norma ISO/ASTM que dice así: “La fabricación aditiva (AM) es un grupo de procesos de unión de materiales para fabricar piezas a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa sobre capa, a diferencia de las metodologías de fabricación sustractiva y fabricación formativa.” En contraste con las técnicas de fabricación industrial tradicionales, la fabricación aditiva reduce procesos intermedios como la producción de utillajes, por lo que permite obtener piezas a mayor velocidad. Por otro lado, al utilizar únicamente el material para la fabricación de la pieza no se generan residuos, los componentes tienen un coste más bajo y se produce de manera más respetuosa con el medio ambiente.

En sus comienzos, hay que remontarse a la década de los 80 donde el Dr. Kodama, del Instituto Municipal de Investigación Industrial de Nagoya, elaboró una técnica de prototipado rápido empleando la fabricación de un objeto capa a capa. No fue hasta el 1984 cuando se lanzó la primera patente por parte de unos investigadores franceses sin mucho éxito. Un par de años más tarde, el ingeniero Chuck Hull retomó la idea presentando una técnica llamada “Estereolitografía”. Este método utilizaba un láser ultravioleta para curar con precisión secciones transversales de fotopolímeros, convirtiéndolos de líquidos a sólidos.

Tras estos primeros pasos se fueron creando y sofisticando diferentes técnicas en torno a la fabricación aditiva. Este proceso presenta diversas ventajas:

- Complejidad geométrica: permite la creación de geometrías complejas y detalladas que serían imposibles o muy difíciles de lograr con métodos de fabricación convencionales, además de que facilita el diseño y la fabricación de estructuras ligeras y optimizadas.
- Reducción de material desperdiciado: al ser este un proceso en el que se fabrica capa por capa, solo se utiliza el material necesario para crear la pieza.
- Personalización y flexibilidad: permite la fabricación de piezas personalizadas y adaptadas a necesidades específicas sin la necesidad de costosos moldes o herramientas especiales. Además, facilita la producción de lotes pequeños o únicos de productos de manera económica.
- Reducción de tiempo de producción: la capacidad de producir piezas directamente a partir de un modelo digital reduce etapas intermedias obteniendo un producto casi final o final.
- Mejora en el rendimiento de las piezas: Permite la creación de piezas con propiedades mecánicas mejoradas debido a la capacidad de controlar la microestructura del material durante el proceso de impresión.
- Sostenibilidad y eficiencia energética: Al reducir el desperdicio de material y optimizar el uso de recursos, la fabricación aditiva puede ser más sostenible y eficiente desde el punto de vista energético.

No obstante, la fabricación aditiva conlleva algunos inconvenientes como la necesidad de crear sujeciones en zonas no apoyadas o posibles porosidades o encogimientos no deseados. Además, los acabados superficiales son bastante pobres lo que supone, en la mayoría de los casos, que se necesite un posterior acabado por mecanizado. A pesar de ello se puede apreciar que es una técnica con un inmenso potencial, planteando una forma innovadora y versátil de fabricar.

La fabricación aditiva metálica puede ser dividida en tres grandes grupos: procesos de lecho de polvo, mejor conocidos como *Powder bed Fusion (PBF)* caracterizado por partir de una cama de polvo y mediante un láser se va construyendo una geometría capa a capa; el *Bindder Jetting (BJ)* que va construyendo a base de capas con resina que seguidamente se cura y, finalmente, la técnica mediante la cual se va a elaborar este trabajo, deposición directa de energía, *Direct Energy Deposition (DED)*, en el que se funde un material base y se deposita un material de aporte en forma de polvo o hilo.

Este último método es en el que se va a centrar el proyecto, con el objetivo de conocer más el proceso y recopilar información de valor. A tal efecto se hará uso del centro de mecanizado adaptado a la fabricación aditiva, junto con los expertos en la materia que dispone la Escuela de Ingeniería de Bilbao de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU).



Ilustración 1. Taller Máquina-Herramienta de la Escuela de Ingenieros Bilbao.

1.3. Objetivos y alcance del trabajo

Este estudio se ha enfocado a extender y comprender mejor el proceso de fabricación aditiva, concretamente en el proceso Láser DED, observando cómo opera en distintas situaciones.

Concretamente, se han analizado los diferentes defectos y su relación con señales y parámetros que se pueden monitorizar, para establecer así una relación causa-efecto de estos defectos y abrir una puerta a su detección automática. De esta forma, el objetivo principal del trabajo es establecer la relación entre diferentes tipos de defectos y las señales monitorizadas para poder establecer así un sistema de detección y, si fuera posible, corrección de defectos en el proceso laser DED. De este objetivo principal se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Comprensión de la tecnología a emplear.
- Comprensión de la máquina y programas empleados.
- Identificación de los defectos más habituales en el proceso Laser DED.
- Monitorización de las señales de la máquina.
- Análisis de los datos obtenidos y de su relación con el defecto.

1.4. Beneficios que aporta el trabajo

Como ya se ha comentado, el aporte metálico está en auge y es un proceso cada vez más demandado por una gran cantidad de industrias como podría ser la aeroespacial o la automovilística. Junto a la necesidad de cada vez obtener mejores propiedades, acabados o incluso menores tiempos de producción se hace muy atractiva para el sector industrial. Y es por ello donde este trabajo cobra sentido aportando información y comparativas respecto a procesos industriales cotidianos.

Sin embargo, el proceso presenta algunas carencias y es por ello por lo que se ha realizado el estudio. Por lo tanto, se pueden extraer los beneficios que se pretenden obtener mediante la ejecución de los objetivos previamente determinados en este documento.

En primer lugar, se plantea la comprensión general del proceso. Esto permitirá poner el foco correcto en los parámetros a monitorizar y a partir de estos obtener una serie de conclusiones. Esto será de gran utilidad en la investigación y el desarrollo de esta tecnología que permitirán mejorar los próximos aportes. Además, se incrementará la calidad del aporte consiguiendo mejores piezas.

Por otro lado, este proceso presenta una serie de beneficios respecto al empleo de otros procesos como el mecanizado en el que solamente el 10% de la materia prima forma parte de la pieza final. Sin embargo, en los procesos DED estamos hablando de que cerca del 100% del material acaba en la pieza final. Esto se traduce en un ahorro y aprovechamiento significativo de la materia prima. Además, el ahorro de utillajes o amarres específicos hace que esta tecnología se sitúe en una posición ventajosa para bajas tiradas y producción flexible. También cabe recalcar que a diferencia de otros procesos FAM (fabricación aditiva metálica) no hay una restricción de volumen de fabricación y tienen una mayor tasa de aporte.

1.5. Análisis del estado del arte

1.5.1. Direct Energy Deposition (DED)

Se podría decir que es una de las tecnologías más novedosas del mercado y será el pilar central de este trabajo. Por ello a continuación se describirá la fabricación aditiva y concretamente se detallará el proceso de *Direct Energy Deposition (DED)* o deposición directa de energía en castellano.

En primer lugar, la fabricación aditiva metálica es un proceso empleado para crear objetos tridimensionales a partir de un archivo digital. Se denomina aditiva porque se construye cada estructura añadiendo una serie de finas capas metálicas sucesivas. Esta tecnología permite producir formas complejas que antes eran imposibles de lograr con métodos tradicionales como la fundición o el mecanizado.

A partir de aquí como se ha comentado existen diversos métodos. Este estudio se centrará en el *Direct Energy Deposition (DED)* pero se ha de distinguir las diferentes variantes que nos podemos encontrar. Por un lado, hay que diferenciar las distintas fuentes de calor que existen, que son el haz láser, el haz de electrones y el arco eléctrico. Por otro lado, existen 2 maneras de aportación del material, hilo o polvo. En este estudio se ha empleado la configuración de haz láser junto con polvo.

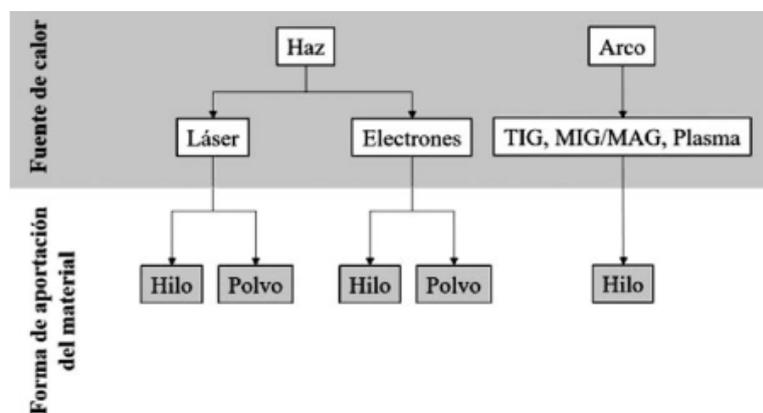


Ilustración 2. Procesos DED en función del tipo de fuente de calor y forma del material de aporte.

El proceso Láser-DED se basa en el principio de fusión selectiva del sustrato y la inyección simultánea de un material de aporte que como ya se ha comentado será en forma de polvo. La fusión se produce por el aporte de energía del láser en el sustrato en el seguidamente se aporta material. El resultado es la solidificación del material de aporte y del sustrato formando un cordón sobre la pieza. En función del láser empleado, la zona fundida por este presentará un distinto tamaño cambiando la tasa de aportación. Además del haz láser será necesario coordinar un movimiento del sistema de aporte con el fin de conseguir una geometría mediante la interpolación de los ejes de la máquina.

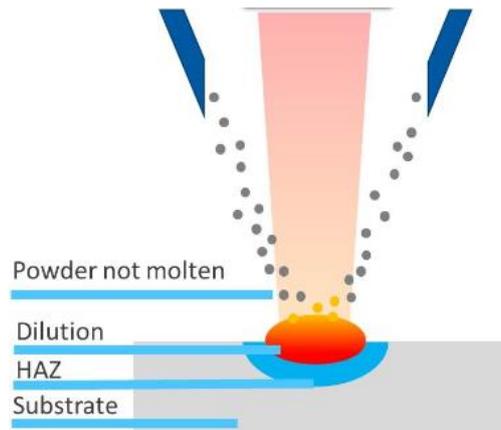


Ilustración 3. Elementos principales del aporte.

En cuanto a los materiales que se pueden emplear, esta técnica es uno de los procesos más versátiles. Se han empleado con éxito distintos tipos de aceros inoxidable, aleaciones base níquel, cobalto, titanio, aleaciones de aluminio o diferentes aceros. También se pueden realizar combinaciones de materiales y variarlos de forma gradual. Los materiales que se suelen emplear dependen fundamentalmente de la aplicación, de su disponibilidad en un formato (polvo o hilo) y de su soldabilidad con el sustrato.

La principal característica de este proceso DED es la calidad del aporte y la baja zona afectada térmicamente que se obtiene. Al tener una fuente de calor muy focalizada, se pueden obtener piezas con una definición superior a otros procesos DED, pero la tasa de aporte obtenida es menor.

Las principales ventajas de este proceso son las siguientes

- Posibilidad de combinar varios materiales en una misma capa.
- Reducción de aporte térmico a la pieza reduciendo tensiones residuales y deformaciones.
- Se pueden integrar en máquina-herramienta o robot industrial automatizando el proceso.
- Empleando parámetros correctos, se consigue una alta integridad metalúrgica.

En contrapartida, se presentan diversos inconvenientes:

- A pesar de que se obtienen mejores acabados y tolerancias, la pieza obtenida es una preforma y es necesario realizar alguna operación de acabado.
- Se tiene una tasa de aporte más reducida respecto a otras técnicas DED por lo que se limita a piezas pequeñas o medianas.
- A pesar de que el aporte térmico es menor que en otros procesos DED pueden ser suficientes para crear distorsiones geométricas o tensiones residuales.
- Es un proceso relativamente costoso y que implica una puesta a punto compleja.

En este caso se ha empleado el dispositivo en una máquina herramienta. El hecho de trabajar en máquina-herramienta y no en un robot hace que el volumen máximo de trabajo

esté limitado y menos grados de libertad. No obstante, para el trabajo que se va a realizar es suficiente.

Respecto al formato de aporte, el polvo presenta algunas ventajas. La alimentación se realiza mediante alimentadores de polvo que arrastran el material desde una tolva hasta una boquilla mediante un gas. El gas empleado es inerte que ayuda a generar una atmósfera protectora en la zona de aporte evitando la oxidación del metal. Además, se consigue una distribución de material homogénea alrededor del baño fundido. También, es relativamente sencillo inyectar el polvo en dirección coaxial al láser siendo esta manera la más ventajosa pese a existir distintas posibilidades en cuanto a la dirección del aporte se refiere. No obstante, la principal desventaja es su precio al necesitar más procesos que el hilo. Además, se pierde una parte importante del polvo empleado al no ser inyectada dentro de la zona fundida por el láser. La tasa de aporte tampoco es muy elevada lo que se traduce en un mayor tiempo de procesado.

En cuanto a las piezas producidas por este proceso, presentan una geometría cercana a la forma final, siendo necesario alguna etapa de acabado para cumplir con las tolerancias dimensionales y de rugosidad exigidas.

Como ya se ha comentado, es un proceso complejo a la hora de ajustar parámetros, ya que existen gran cantidad de factores y de distinta naturaleza. Los parámetros más relevantes se pueden clasificar en 3 grupos:

1. Los que hacen referencia al aporte de material por láser (tipo de láser, potencia, gas protector, régimen de láser...)
2. Los relacionados con el material empleado (material de aporte y sustrato, formato del material: polvo o hilo, tasa de aporte...)
3. Los derivados del sistema de aporte empleado.

En la siguiente imagen se mostrarán los parámetros más relevantes divididos en estos grupos.

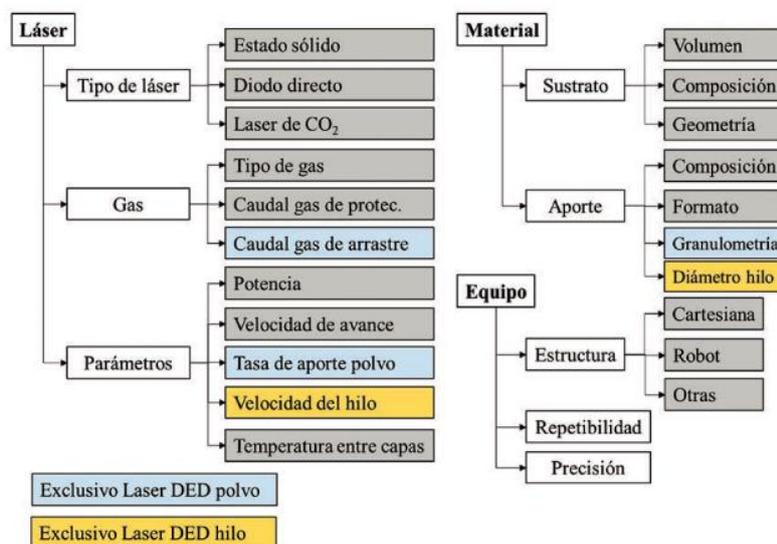


Ilustración 4. Tecnologías y parámetros seleccionables en láser-DED

En cuanto a la calidad del aporte en el láser-DED, se pueden conseguir calidades muy altas en términos de integridad metalúrgica del material. Los límites de este proceso son similares a los que puede haber en los procesos de soldadura láser.

En cuanto a las aplicaciones podemos dividirlos en 3 grupos:

1. Reparación de componentes de alto valor añadido que hayan podido sufrir un desgaste localizado.
2. Recubrimiento de componentes que requieran alguna característica especial.
3. Añadir material en una zona específica para construir una geometría determinada.

[7]

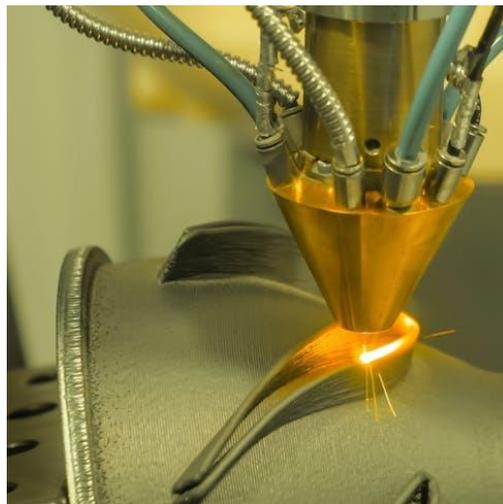


Ilustración 5. Fabricación mediante Láser-DED

1.5.2. Pirómetro

En el ámbito de la fabricación aditiva, la monitorización y el control preciso de la temperatura son fundamentales para asegurar la calidad y la integridad de los componentes fabricados. El pirómetro, un dispositivo de medición de temperatura no invasivo, se ha convertido en una herramienta esencial en este contexto.

Los pirómetros funcionan basándose en la detección de la radiación infrarroja emitida por objetos calientes. Existen dos tipos principales de pirómetros utilizados en la industria: los de radiación y los ópticos. Los pirómetros de radiación detectan la radiación térmica emitida por un objeto y la convierten en una señal eléctrica que puede ser interpretada como una temperatura. Su capacidad para medir temperaturas sin contacto físico es crucial en procesos de alta temperatura como la fabricación aditiva. Por otro lado, los pirómetros ópticos miden la intensidad de la radiación en una longitud de onda específica, lo que permite calcular la temperatura del objeto con alta precisión. Estos son particularmente útiles en aplicaciones donde es necesario monitorear temperaturas extremadamente altas y donde la reflectividad del material puede variar.

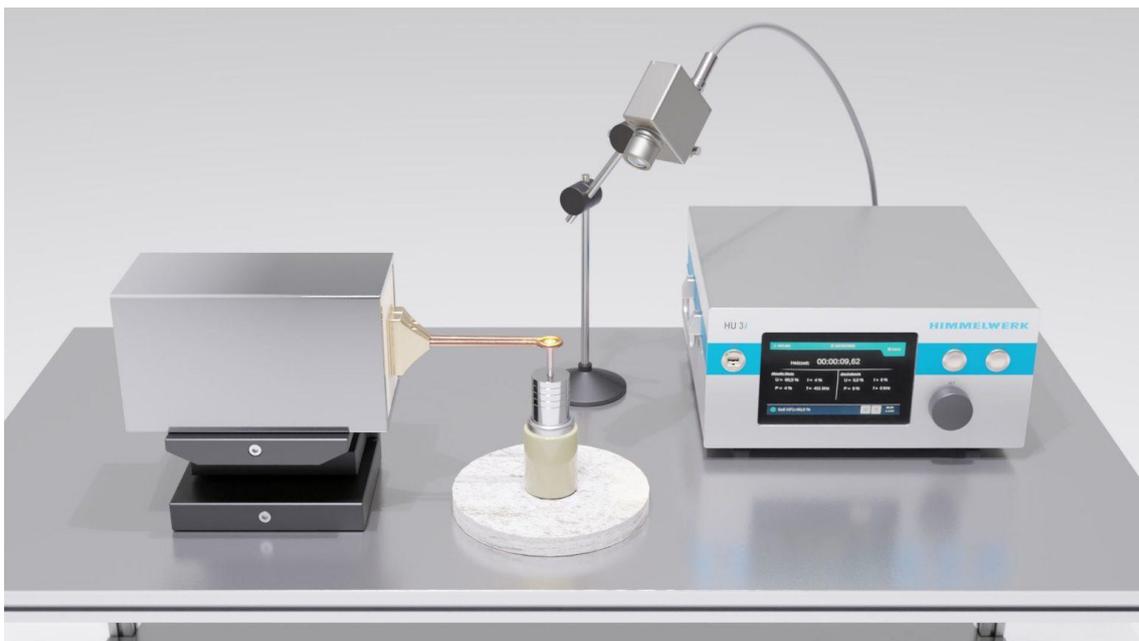


Ilustración 6. Pirómetro

En la fabricación aditiva, los pirómetros son utilizados para diversas funciones críticas. El monitoreo de la temperatura del material en el punto de deposición es esencial para asegurar una fusión adecuada y una solidificación controlada. La temperatura del baño de fusión afecta directamente la calidad de la unión entre capas, la formación de porosidades y la microestructura del material. Los pirómetros permiten realizar esta medición de manera precisa, contribuyendo a la consistencia y calidad del producto final. Además, los pirómetros pueden detectar variaciones térmicas en tiempo real, lo que permite identificar defectos en el proceso, como fluctuaciones en la potencia del láser o inconsistencias en el suministro de material. Esta capacidad de detección inmediata permite realizar ajustes

durante el proceso de deposición, manteniendo así la estabilidad y mejorando la calidad del componente final. Por último, los datos proporcionados por los pirómetros son fundamentales para la calibración y optimización de parámetros del proceso, como la potencia del láser y el flujo de material. Estos datos permiten maximizar la eficiencia del proceso, minimizando al mismo tiempo los costos operativos. La optimización basada en la temperatura garantiza que el proceso se realice bajo condiciones óptimas, mejorando tanto la productividad como la calidad del producto final.

A pesar de su importancia y utilidad, el uso de pirómetros en la fabricación aditiva presenta varios desafíos y limitaciones. Mantener una medición precisa y exacta en un entorno de alta temperatura y alta reflectividad es un desafío considerable. Las superficies metálicas y los entornos de alta energía pueden afectar la precisión de las mediciones. La precisión en la calibración asegura que las mediciones reflejen con exactitud la temperatura real del proceso, lo que es crucial para mantener la calidad del producto. Otro desafío importante es la interferencia óptica, ya que la presencia de humo, polvo y reflejos puede interferir con las mediciones de los pirómetros, afectando la fiabilidad de los datos obtenidos. Las interferencias ópticas pueden desviar las lecturas de temperatura, llevando a decisiones incorrectas sobre el ajuste del proceso. Para mitigar este problema, se pueden implementar sistemas de filtrado óptico y técnicas de compensación de interferencias. Estas soluciones ayudan a mantener la integridad de las mediciones garantizando que las decisiones de control del proceso se basen en datos precisos y confiables. Finalmente, la necesidad de mediciones rápidas y continuas es crucial para seguir el ritmo del proceso de deposición. Los procesos de fabricación aditiva son dinámicos y rápidos, requiriendo que los pirómetros tengan una alta velocidad de respuesta y capacidad de adquisición de datos en tiempo real. Los pirómetros con respuesta rápida permiten detectar y reaccionar ante cambios térmicos instantáneamente, asegurando que el proceso se mantenga dentro de los parámetros deseados y evitando la acumulación de defectos.

En conclusión, el uso de pirómetros en la fabricación aditiva es fundamental para el monitoreo y control del proceso de Deposición Directa de Energía. A pesar de los desafíos asociados con las mediciones precisas en entornos difíciles, las técnicas actuales y el desarrollo continuo de la tecnología de pirómetros han mejorado significativamente su funcionalidad y fiabilidad. La implementación adecuada de estos dispositivos permite una monitorización precisa y multifacética, lo que contribuye a una mejor calidad y eficiencia del proceso de fabricación aditiva.

1.6. Análisis de alternativas

1.6.1. Alternativa 1: No monitorizar.

La primera alternativa que se contempla sería la no realización de este trabajo. Con ello se conseguiría el ahorro del coste de investigación y el tiempo dedicado a esta. No obstante, no sería posible optimizar el proceso lo que generaría pérdidas en los siguientes aportes traduciéndose a la larga en un gasto mayor que el supuesto por la investigación. Si se tratase de un procedimiento muy controlado y conocido quizá sería una buena alternativa.

1.6.2. Alternativa 2: Empleo de termopares.

Realización de los ensayos únicamente con los termopares. Pese a extraerse información, esta no sería de gran utilidad. Esto es porque los datos más relevantes se obtendrán de las medidas del termopar. No obstante, habría que diseñar desde otro punto de vista los defectos para obtener datos útiles de las temperaturas del sustrato, de la boquilla y de la mesa.

1.6.3. Alternativa 3: Extensión con análisis acústico.

Además de disponer de los aparatos de monitorización ya comentados, se incluirá uno nuevo, el análisis acústico. Este ampliará los detalles de aquellos defectos que emitan señales sonoras permitiendo caracterizar con más detalle el defecto. La inversión pese a ser mayor se compensará con un perfeccionamiento de la técnica que permitirá ahorrar tiempo y dinero en los próximos procesos.

1.7. Análisis de riesgos

Como es común en este tipo de proyectos, pueden surgir distintos problemas que deben ser resueltos con la mayor eficiencia posible. Para ello, se ha recurrido a la matriz de probabilidad-impacto para valorar el factor de riesgo de cada problema. A continuación, se presentan los posibles riesgos en este estudio:

1. Incorrecta lectura del pirómetro.
2. Fallo en la colocación correcta de los termopares.
3. No activar el *Datalogger*.

Seguidamente, sabiendo que el riesgo es el producto entre el impacto y la probabilidad, se plantea la matriz de posibilidad-impacto:

		Impacto		
		Bajo	Medio	Alto
Probabilidad	Alta	Medio	Alto	Alto
	Media	Bajo	Medio	Alto
	Baja	Bajo	Bajo	Medio

Tabla 1. Matriz de riesgos.

Ahora expondremos cada caso según su impacto y probabilidad:

- Incorrecta lectura del pirómetro.

Probabilidad → Baja

Impacto → Alto

Por tanto, si nos vamos a la tabla obtenemos que el impacto será medio. Dado que se estará revisando continuamente será poco probable que el pirómetro haga una lectura errónea. Sin embargo, si nos quedamos sin dicha lectura perderemos datos muy relevantes ya que nos proporciona información de la temperatura y las dimensiones del *melt pool*.

- Fallo en la colocación correcta de los termopares

Probabilidad → Media

Impacto → Bajo

Esto nos indica que es un riesgo bajo. A la hora de tomar una medida mediante termopares es fundamental que la punta de este esté en contacto con la superficie a medir, por lo que al estar colocado con cinta puede que no se vea bien y no haya un buen contacto. No obstante, las lecturas de los termopares no darán información de valor por lo que su impacto será bajo.

- No activar el *Datalogger*.

Probabilidad → Media

Impacto → Alto

El riesgo, en este caso, es alto. Esto es debido a que depende de que el operario que esté en máquina pueda olvidarse de activar el *Datalogger*, lo que supondría el desperdicio de las lecturas tanto de pirómetro como de los termopares, siendo esto de vital importancia para obtener los resultados finales.

2. METODOLOGÍA

2.1. Equipo y material empleado

Comenzando con el equipo empleado se van a nombrar y comentar las especificaciones de la máquina empleada para la fabricación aditiva. Esta se trata de un centro de mecanizado Kondia Aktinos 500 a la cual se le ha añadido el dispositivo necesario para el aporte de material. Las características se detallan a continuación:



Control Numérico	Fagor 8070
Velocidad	15000 mm/min
Superficie de trabajo	700x360 mm
Precisión de posicionamiento	± 0,01
Repetitividad	± 0,005 mm
Resolución	0,001 mm

Tabla 2. Especificaciones del centro de fabricación aditiva.

Ilustración 7. Centro de fabricación aditiva.

El láser empleado es el Coherent HighLight FL Compact que tiene 1 kW de potencia máxima. Este se trata de un láser en estado sólido capaz de propagarse a través de la fibra óptica.



Modelo	HighLight FL Compact
Potencia	1000 W
Longitud de onda	1070 ± 10 nm

Tabla 3. Especificaciones láser

Ilustración 8. Generador láser.

Para posibilitar el intercambio de calor de los circuitos del láser y así evitar su sobrecalentamiento se ha empleado el equipo KKT Kraus. Además, también es necesario un refrigerador para la boquilla.



Ilustración 9. Refrigerador láser.



Ilustración 10. Refrigerador boquilla.

Para la adquisición de datos se han empleado diversos dispositivos. Comenzando por los aparatos que obtienen temperaturas, se pueden diferenciar 2 tipos. Por un lado, se encuentran los termopares que van unidos a un equipo de adquisición de datos.



Ilustración 11. Termopar.



Ilustración 12. Centro de adquisición de datos

Y, por otro lado, el pirómetro, siendo este un IGAR 12 LO pirómetro bicolor de rango 549-2500 °C de Advanced Energy.



Ilustración 13. Pirómetro.

También se grabará el baño fundido mediante el uso de una cámara coaxial de la marca Thorlabs.



Ilustración 14. Cámara coaxial.

Y, por último, se dispone de un *Flow watch* que recogerá datos sobre la variación del polvo.



Ilustración 15. Flow watch.

Además, se hizo uso de otras máquinas para preparar los sustratos y sus defectos. Para realizar las ranuras, se hizo uso del centro de mecanizado.



Ilustración 16. Centro de mecanizado.

Además, se necesitaba obtener un buen acabado superficial en los sustratos por lo que se les realizó una operación de rectificado.



Ilustración 17. Rectificadora plana.

2.2. Descripción de tareas

Tarea 1: Análisis del estado del arte y recogida de información		
Inicio: 06/11/2023	Fin: 12/02/2024	Duración: 3 meses, 7 días
Descripción de la tarea:		
Se comenzará con la comprensión teórica del proceso sobre el que se va a trabajar además de los aparatos de monitorización. Para ello, se recopilará información tanto en páginas webs como en libros docentes. Se hará especial hincapié en el proceso DED y sus parámetros más relevantes.		
Tarea 2: Diseño de los ensayos		
Inicio: 01/12/2023	Fin: 31/12/2023	Duración: 1 mes
Descripción de la tarea:		
Para realizar los ensayos se pensó en diferentes defectos que suelen aparecer en el proceso. En esta tarea se diseñaron los distintos defectos como el número de repeticiones a realizar.		
Tarea 3: Realización práctica		
Inicio: 01/01/2024	Fin: 30/04/2024	Duración: 4 meses
Descripción de la tarea:		
Por un lado, la creación de unos sustratos adaptados a cada defecto y, por otro lado, la realización de un cordón sobre estos. Obtener unos datos a partir de los elementos de monitorización.		
Tarea 4: Análisis de los resultados		
Inicio: 01/05/2024	Fin: 09/06/2024	Duración: 1 mes, 9 días
Descripción de la tarea:		
Una vez obtenidos los datos, se procederá a sintetizarlos mediante una aplicación de Matlab. Se compararán gráficas y tablas a fin de obtener unas conclusiones válidas para mejorar siguientes ensayos.		
Tarea 5: Recopilación de información y conclusión del proyecto		
Inicio: 10/06/2024	Fin: 16/06/2024	Duración: 1 semana
Descripción de la tarea:		
Resumir y organizar la información recopilada. Con ello se dará por finalizado el proyecto.		

Tabla 4. Descripción de tareas.

2.3. Diagrama Gantt

Duración	Comienzo	Fin	Tareas	Año	2023																															
					2023				2023				2024				2024				2024				2024				2024							
					Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio			
				Semana				Semana				Semana				Semana				Semana				Semana				Semana								
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
98 días	06/11/2023	12/02/2024	Análisis del estado del arte y recogida de información	T1	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																
60 días	06/11/2023	06/01/2024	Recogida de información proceso DED	T1.1	█	█	█	█	█	█	█	█																								
38 días	06/01/2024	12/02/2024	Recogida de información monitorización	T1.2									█	█	█	█																				
31 días	01/12/2023	31/12/2023	Diseño de los ensayos	T2					█	█	█	█																								
7 días	01/12/2023	07/12/2023	Diseño de los sustratos	T2.1					█																											
21 días	07/12/2023	31/12/2023	Diseño de los parámetros de la máquina	T2.2					█	█	█																									
112 días	01/01/2024	30/04/2024	Realización práctica	T3									█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█								
42 días	01/01/2024	11/02/2024	Creación de los sustratos	T3.1									█	█	█	█	█	█	█	█																
70 días	11/02/2024	30/04/2024	Realización de los ensayos	T3.2													█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█								
1 días	30/04/2024	30/04/2024	Recopilación de datos	H1																					█											
40 días	01/05/2024	09/06/2024	Análisis de los resultados	T4																					█	█	█	█	█	█	█	█				
7 días	10/06/2024	16/06/2024	Recopilación de información y conclusión del proyecto	T5																									█							

Tabla 5. Diagrama Gantt.

2.4. Aspectos económicos

A continuación, se detallará el presupuesto necesario para ejecutar este proyecto:

Concepto	Coste Unitario (€/h)	Nº unidades (h)	Coste
Ingeniería Industrial en prácticas	15	600	9.000,00 €
Director de Proyecto	35	20	700,00 €
Técnico LMD	30	100	3.000,00 €
Ordenador	2	200	400,00 €
Licencia Matlab	5	150	750,00 €
Centro de mecanizado	30	1	30,00 €
Centro de LMD	30	80	2.400,00 €
Herramientas	1	50	50,00 €
Subtotal			16.330,00 €
Imprevistos		10%	1.633,00 €
Total			17.963,00 €

Tabla 6. Presupuesto

Es importante recalcar que este estudio se hace en el ámbito académico lo que supone un ahorro importante en cuanto a la ingeniería industrial que es, sin duda, lo que más dinero supone. Así pues, el ahorro rondaría el 50%.

2.5. Plan de proyecto y planificación

Antes de proceder con las pruebas es vital realizar toda la preparación pertinente. Esta fase preparatoria se va a dividir en 2 partes. Por un lado, se tratará la creación de los sustratos y, por otro lado, la puesta a punto de la máquina, que como ya se ha anunciado es una parte fundamental de la deposición directa de energía.

Abordando el tema del sustrato, lo primero de todo fue seleccionar una barra de acero que será donde se realice el aporte. Para facilitar el manejo se dividió empleando una sierra de cinta, dejando unos sustratos de dimensiones 70x30x14 mm y uno de 70x106x14 mm. Una vez obtenidos los sustratos con sus correspondientes dimensiones, se rectificaron con el fin de obtener unos buenos acabados superficiales en la dirección del aporte.

Una vez obtenidas las piezas necesarias se procedió a introducir los defectos correspondientes. Entre los Defectos podemos distinguir 2 grupos. A un lado, con origen en el sustrato y, por otro lado, con origen en máquina.

Defectos con origen en el sustrato:

- Ranuras perpendiculares al cordón. 4 ranuras de distintas dimensiones:
 - Ranura de 1 mm de ancho y 1 mm de profundo.
 - Ranura de 2 mm de ancho y 1 mm de profundo.
 - Ranura de 1 mm de ancho y 2 mm de profundo.
 - Ranura de 2 mm de ancho y 2 mm de profundo.
- Tres distintas rugosidades a lo largo de una cara.
- Viruta sobre la superficie de aporte.
- Polvo metálico (el mismo que se usa para el aporte) sobre el sustrato.
- Aceite sobre la pieza.

Defectos con origen en la máquina:

- Variación de altura tanto positiva como negativa.
- Variación de potencia. Siendo la potencia nominal de 600 W.
 - Se redujo y elevó la potencia un 10% y un 20%.
- Variación de la velocidad de avance. Siendo la velocidad de avance nominal 525 mm/min.
 - Se redujo y elevó un 20% y un 30%.
- Variación de caudal. Siendo el nominal 5,5 g/min.
 - Se realizaron las vertientes más extremas, hasta el mínimo y el máximo.
- Inclinación a la hora de sujetar con la mordaza.

Cabe recalcar que la mayoría de estos defectos son puntuales, es decir, no se realizan de forma continua durante todo el aporte. Además, para la mayoría de los ensayos se han realizado 3 repeticiones. También se ha añadido un sustrato de referencia sin ningún defecto con el fin de comparar con los defectos las señales obtenidas.

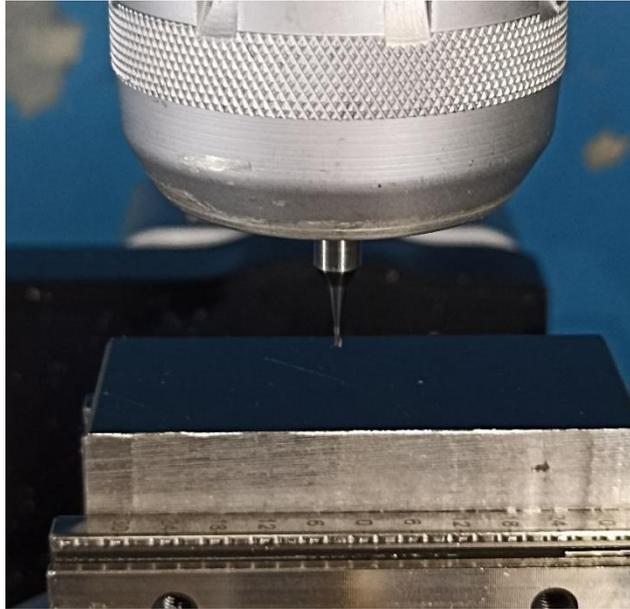


Ilustración 18. Fresado de una ranura

En cuanto a la puesta a punto de la máquina se refiere se han de establecer los ceros de la máquina. Además, se debe introducir el polvo suficiente en la tolva y aplicar el programa que de las instrucciones para realizar el cordón. En este caso era una operación muy sencilla por lo que se manipularon los parámetros desde el control numérico.

Una vez completados los procesos preliminares, se realizarán los aportes correspondientes en cada pieza. Se estableció hacer 3 aportes para cada prueba excepto para la viruta que se realizó uno menos por la complejidad de obtener buenas medidas.

El procedimiento fue sistemático, por lo que para cada defecto se realizó la siguiente programación:

El primer paso fue amarrar correctamente la pieza en la máquina-herramienta mediante la mordaza. Una vez está la pieza correctamente sujeta, se comprobará la distancia entre la boquilla y la superficie de aporte. Se realiza mediante un patrón con el fin de alcanzar la mayor precisión posible. Este es un parámetro crítico en este proceso ya que el hecho de no mantener una distancia adecuada provoca distorsiones en el baño fundido y un menor aporte del polvo. Este hecho se recalcará a la hora de analizar el defecto de variación de altura ya que es precisamente ahí donde se observará los problemas de una mala configuración de la distancia de aporte.

A continuación, se prepara el polvo metálico que se usará, en este caso Inconel 718. Este material es una superaleación níquel-cromo que es muy utilizado en la fabricación aditiva por su excelente capacidad de soldado y tratarse de un material termorresistente, es decir, que conserva sus propiedades a muy altas temperaturas.

Una vez listo el polvo, se deposita en la tolva y se enciende el suministro de argón y el generador láser. Posteriormente, se pasa a manipular el programa previamente creado en el control numérico. Se definió uno genérico en el que se establecía la trayectoria y el

resto de los parámetros relevantes para que después en máquina se modificase para cada defecto.

Una parte fundamental era la comprobación del correcto ajuste de los aparatos de monitorización. Entre ellos tenemos los termopares, el pirómetro y una cámara coaxial a la boquilla. Se disponía de 3 termopares los cuales median la temperatura de la mesa, de la boquilla, y de la pieza; su colocación era sencilla, pero había que certificar que la punta de estos tocaba la superficie a medir. Por otro lado, otro elemento de medida es el pirómetro que nos permitía saber la temperatura del baño fundido. El ajuste de este resultaba algo más complicado. Se realizó mediante un puntero láser que indicaba la zona de medida del pirómetro que debía coincidir con el punto donde incidía el láser de fusión. Por último, la cámara coaxial empleada para conocer las dimensiones (área) del *melt pool*.

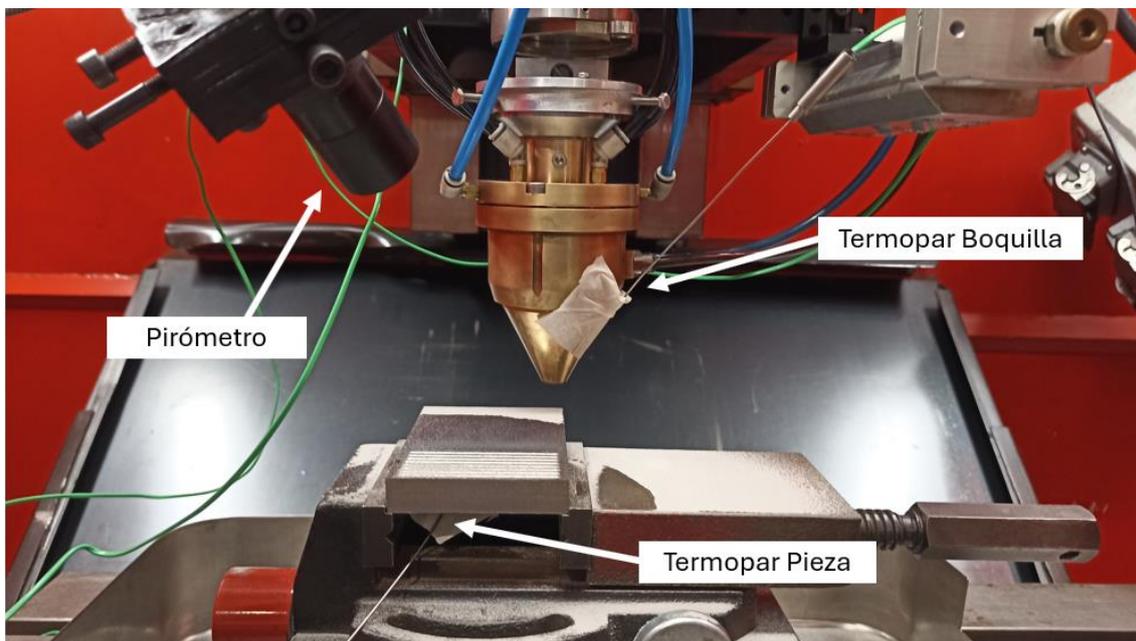


Ilustración 19. Elementos de medida de temperatura.

Una vez realizadas todas estas operaciones se procede a ejecutar el programa. Es importante que antes de iniciar el aporte se activen todos los programas de monitorización que se dividen en 4:

Primero, ejecutamos un programa que recoge las lecturas de los 3 termopares y crea un archivo Excel con las temperaturas recogidas; por otra parte, el pirómetro crea un archivo de texto con las correspondientes medidas de temperatura; seguidamente, la cámara coaxial crea un archivo TIFF que almacena gran cantidad de fotogramas por segundo; por último, se genera un archivo Excel llamado *Datalogger* encargado de recoger las dinámicas de la máquina, las posiciones y si el láser está encendido o apagado.

Para finalizar, se deben analizar todos los archivos recopilados. Para ello se ha empleado el programa de cálculo *Matlab*, mediante una aplicación diseñada por Dña. Aizpea Urresti Ubillos que sintetiza y grafica los datos más relevantes y de interés. A continuación, se realizará el análisis detallado de lo recopilado en los defectos ya mencionados.

2.6. Descripción de los resultados

En esta sección procederemos a analizar y procesar los datos obtenidos de la aplicación de Matlab. Los datos adquiridos del programa son:

- Temperatura del *melt pool* frente a la distancia de aporte.
- Anchura del *melt pool* frente a la distancia de aporte.
- Caudal de polvo frente a la distancia de aporte.
- Temperaturas de mesa, pieza y boquilla frente al tiempo.

No obstante, las temperaturas de mesa, pieza y boquilla no han sido datos relevantes ni de interés ya que, al solo aportar un cordón, las temperaturas de mesa y boquilla no experimentaban un aumento significativo y la pieza se calentaba a valores normales. Es por esto por lo que no se comentan en los análisis posteriores.

Para comenzar, se van a establecer unos valores de referencia con el fin de comparar y obtener conclusiones. Esta primera prueba se realizó meticulosamente, ya que establecer unas buenas condiciones de referencia son fundamentales para poder realizar una comparación de calidad. Se puso especial énfasis en la distancia entre boquilla y sustrato, buena precisión al colocar el pirómetro y demás aparatos de medida.

Una vez obtenido el documento con la información sintetizada y las gráficas correspondientes se pueden establecer unos estándares. Todos los datos obtenidos se recogen en las siguientes tablas:

Media T	2217,42	°C	Media diam	1,710	mm
Max T	2283,74	°C	Media FW	1,742	V
Min T	2090,56	°C	Max FW	1,815	V
Dif Sup	66,32	°C	Min FW	1,656	V
Dif Inf	126,86	°C	Dif	0,159	V
% Dif Sup	2,991	%			
% Dif Inf	5,72	%			

Tabla 7. Parámetros de referencia.

La información más útil es la temperatura media del baño fundido que oscila alrededor de los 2200 °C con leves variaciones superiores e inferiores del orden del 3% al 5%. Otro dato sumamente interesante es la anchura media del *melt pool* que nos indica que el diámetro medio es de 1,71 mm. Este se ha medido mediante el procesamiento de las imágenes obtenidas por la cámara coaxial, aplicándole un filtro mediante Matlab y midiendo su diámetro. Por último, el valor del caudal de polvo que viene referido en Voltios es un valor muy constante y que al aplicarle un factor de conversión (multiplicar por 3,158) obtenemos el valor que se había establecido anteriormente, 5,5 g/min.

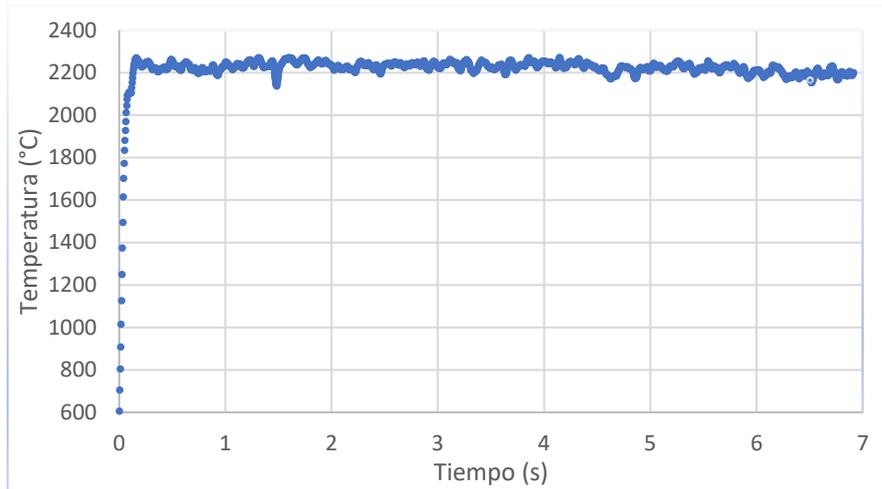


Gráfico 1. Temperatura Referencia

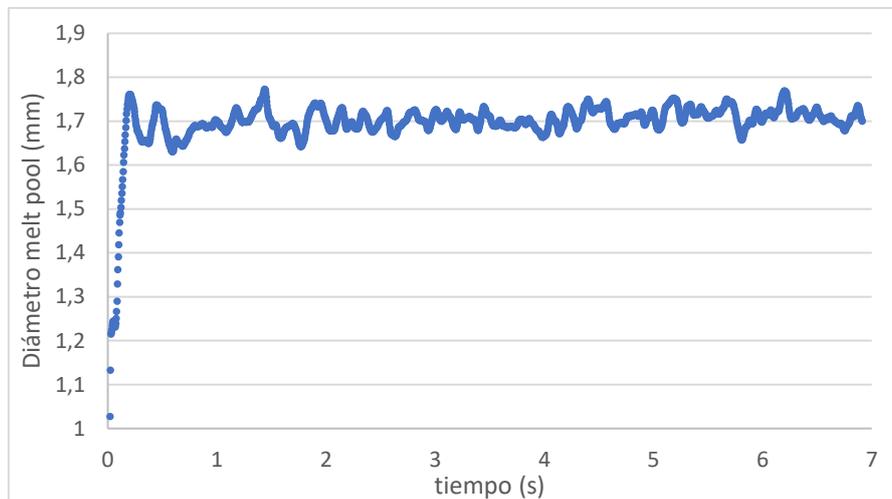


Gráfico 2. Diámetro melt pool Referencia.

A continuación, se van a detallar los resultados obtenidos. Se comenzará con los defectos en el sustrato y seguidamente se analizarán los debidos a la máquina.

2.6.1. Defecto de ranuras

Un problema que puede surgir es la aparición de grietas o ranuras en la pieza. Por ello se ha simulado mediante una fresado distintas ranuras. Se han dispuesto en un mismo sustrato 4 ranuras perpendiculares a la dirección de aporte de las siguientes dimensiones:

- Ranura de 1 mm de ancho y 1 mm de profundo.
- Ranura de 2 mm de ancho y 1 mm de profundo.
- Ranura de 1 mm de ancho y 2 mm de profundo.
- Ranura de 2 mm de ancho y 2 mm de profundo.

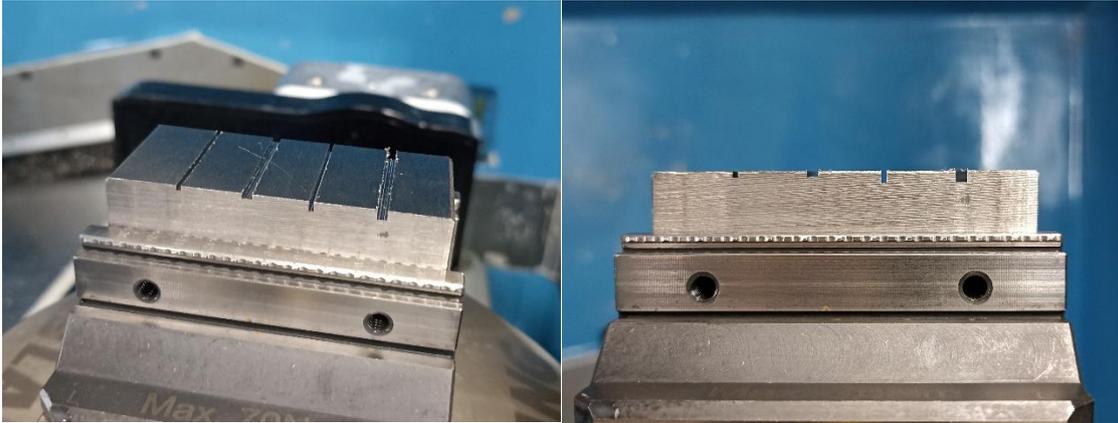


Ilustración 20. Sustrato ranurado.

Tras el análisis de los resultados se han encontrado parámetros de relevancia muy interesantes:

Por un lado, la temperatura, al encontrarse una ranura, muestra claros descensos de esta. Se puede apreciar que tanto el cambio de profundidades como de anchuras de las ranuras deja un patrón claro. El hecho de ser la ranura más profunda provoca un descenso mayor en la temperatura. No obstante, el aumento de la anchura crea que el descenso de la temperatura sea más prolongado en el tiempo. Cabe recalcar que al pasar el láser por las aristas vivas la temperatura se incrementa. Esto viene provocado por que, al incidir el láser en las aristas vivas, estas provocan chispas creando un aumento del *melt pool* ficticio pero útil para poder detectar este defecto.

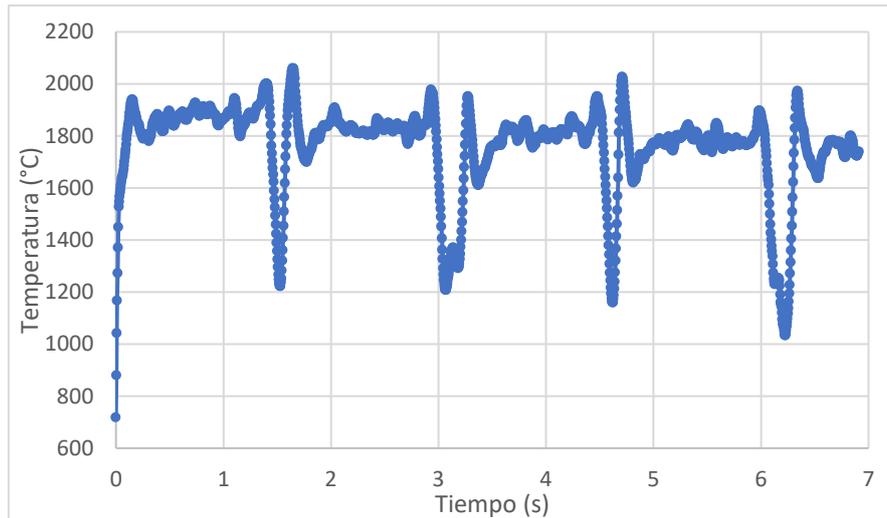


Gráfico 3. Temperatura Ranuras.

También se aprecian cambios notables en el baño fundido. El diámetro de este desciende levemente al entrar en las ranuras. Esto es más apreciable en las ranuras más anchas. Además, es notable el aumento de la anchura del *melt pool* antes de entrar en las ranuras. Pero este dato puede llegar a ser engañoso ya que, como se ha comentado anteriormente, al pasar el láser por una arista viva se crean grandes cantidades de chispas lo que pueden alterar el filtro empleado por el programa de Matlab. Por otro lado, cuando el láser incide dentro de las ranuras ocurren 2 sucesos; el láser deja de trabajar a la distancia correcta y la cámara coaxial se desenfoca. Esto ocasiona que la zona de incidencia sea por una parte más grande, pero haya menos aporte de energía por unidad de superficie. Esto, junto al desenfoco crea un aumento del *melt pool*; por lo tanto, no se puede asegurar que el baño fundido aumente. Es más, probablemente descienda su diámetro ya que, al solo incidir correctamente en la zona elevada, únicamente esa zona se fundirá debidamente. En cambio, la zona dentro de la ranura no alcanzará la temperatura deseada y, además, la gráfica del *melt pool* también indica que su diámetro es menor dentro de la ranura pero, solamente para las de 2 mm de ancho ya que las de 1 mm no son suficientemente anchas para las chispas no se extingan y alteren el filtro de la cámara.

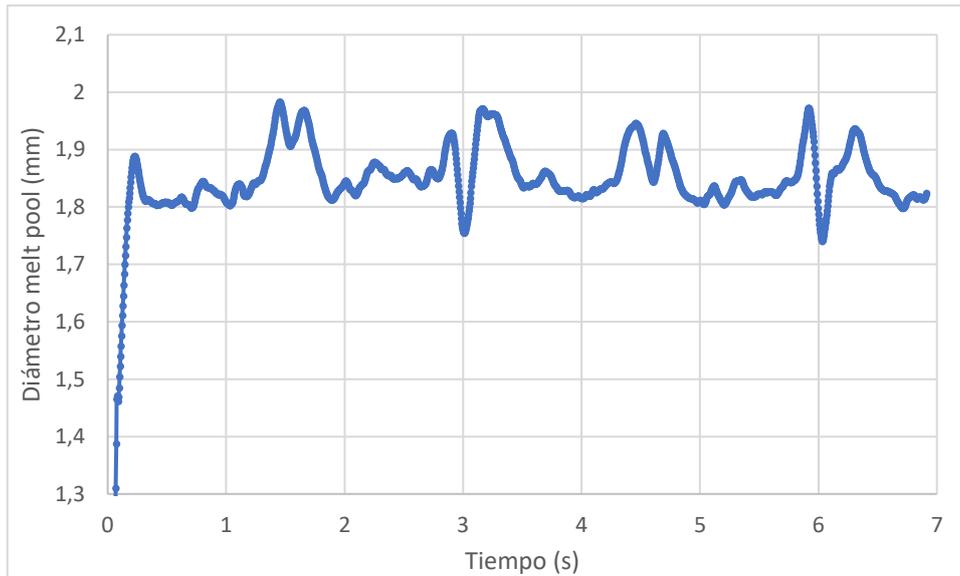


Gráfico 4. Diámetro melt pool Ranuras.

Por tanto, se puede concluir que ante apariciones de ranuras o grietas (a partir de unas dimensiones considerables) se espera un claro descenso de la temperatura en el cual se puede intuir sus dimensiones, tanto de ancho como de profundo. También el baño fundido apreciará un descenso en su diámetro dentro de las ranuras. Todo esto se traduce en un aporte de mala calidad que tendrá deficientes propiedades mecánicas y muy probablemente ocasionará el fallo en esa zona.

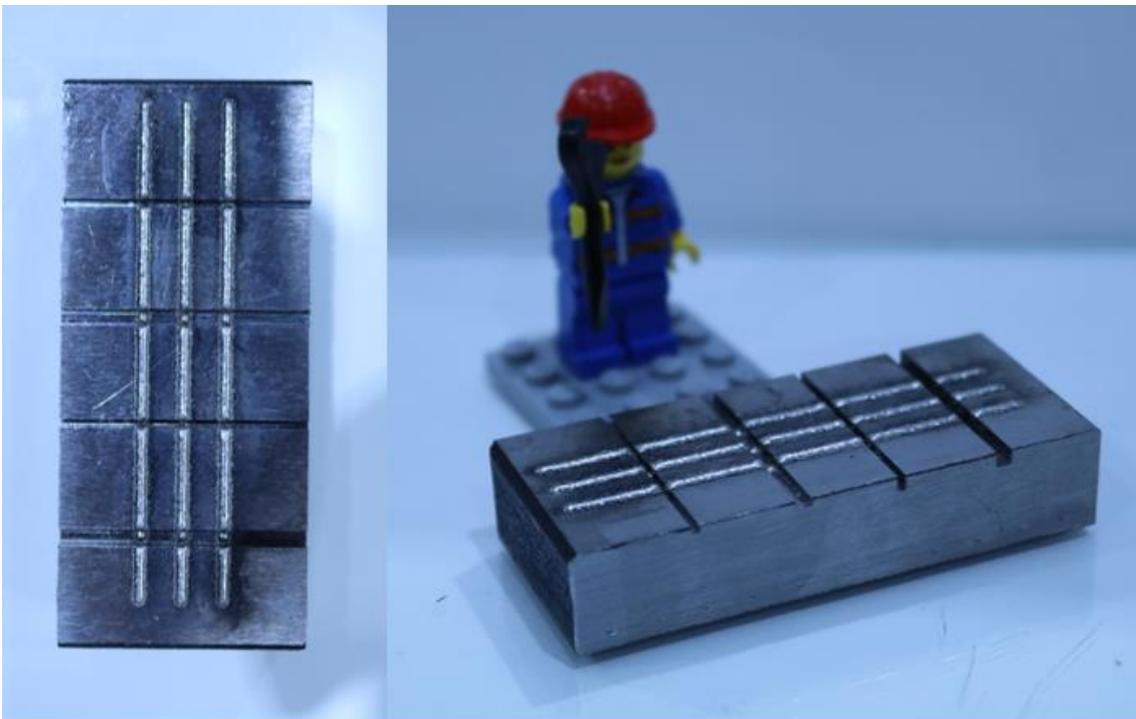


Ilustración 21. Cordones sobre el sustrato ranurado.

2.6.2. Defecto de rugosidad

Este defecto se introdujo debido a la posibilidad de que muchos sustratos sobre los que se quieran aportar podrían no presentar un buen acabado. El hecho de aportar sobre una superficie con un buen acabado superficial permite que el polvo se introduzca mejor sobre la pieza. Además, el baño fundido será más regular facilitando lo anteriormente dicho.

Para este defecto se establecieron 3 rugosidades distintas. En este caso el defecto no es puntual, ya que se dividió el sustrato en 3 zonas incrementando la rugosidad progresivamente.

A continuación, se mostrarán unas rugosidades medias (Ra) para el sustrato empleado en las demás pruebas y el obtenido una vez aumentado la rugosidad del sustrato:

Rectificado (dirección de aporte)			
Ra (μm)	0,42	0,5	0,33
	Valor medio:		0,42

	Rayado 1			Rayado 2			Rayado 3		
Ra (μm)	0,5	0,51	0,41	0,57	0,63	0,55	0,77	0,86	0,87
	Valor medio:			Valor medio:			Valor medio:		
	0,47			0,58			0,83		

Tabla 8. Rugosidades medias del sustrato.

Una vez analizados los datos se han podido obtener los siguientes resultados:

En cuanto a la temperatura del *melt pool* se puede apreciar un descenso junto con el incremento de rugosidad. Esto puede explicarse de forma parecida al caso de las ranuras. Al haber más rugosidad, la superficie es más irregular por lo que el láser no incide a la distancia exacta que se ha establecido. No obstante, el descenso de temperatura no es tan significativo como el de las ranuras.

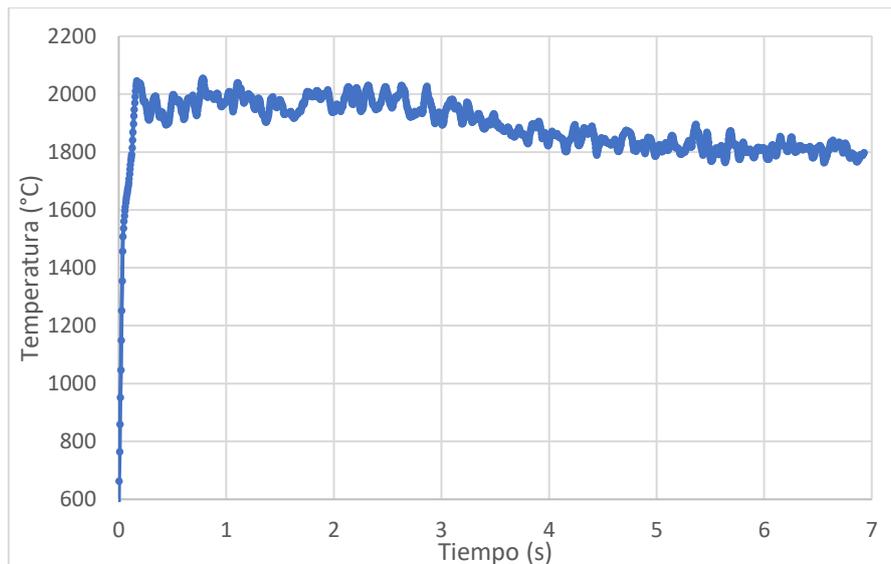


Gráfico 5. Temperatura Rugosidad.

Por otro lado, en cuanto a la anchura del baño no se aprecian grandes cambios. Se podría recalcar una mayor irregularidad y mayor variación de máximos y mínimos, pero a lo que el diámetro de este respecta conserva unos valores muy parecidos a los de referencia.

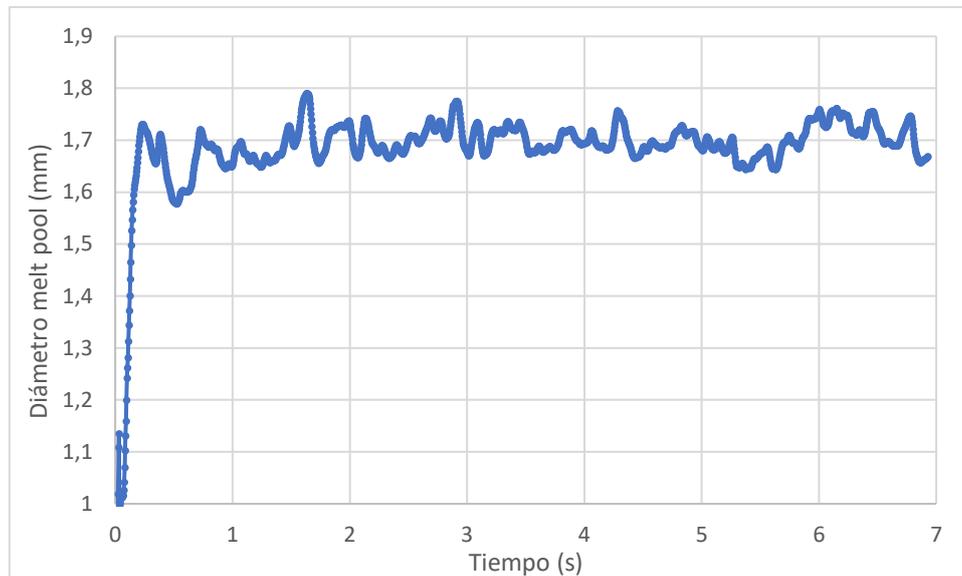


Gráfico 6. Diámetro melt pool Rugosidad.

Respecto a la rugosidad cabe afirmar que pese a que la temperatura decrezca si la rugosidad no es excesivamente grande no debería de afectar significativamente al aporte (para rugosidades bajas). Es cierto que el aporte no será tan uniforme y puede presentar un *melt pool* menor con ligeras zonas donde se haya adherido menos material pero, no debería ser significativo.

2.6.3. Defecto de viruta

Para esta prueba se depositó viruta de otro proceso sobre el sustrato, con el fin de que el cordón pase sobre ella simulando una caída de viruta de otro mecanizado.



Ilustración 22. Sustrato con viruta.

Tras los análisis de los resultados podemos comentar lo siguiente:

En cuanto a la temperatura no se puede evidenciar que produzca ningún efecto. Esto es porque la viruta se rompe en milésimas de segundo al incidir el láser sobre ella. Únicamente al pasar por la tercera viruta se aprecia un descenso de la temperatura que podría deberse a que esta le resta tiempo de incidencia al sustrato.

Por otro lado, el *melt pool* sí que presenta grandes variaciones respecto a sus valores normales. En una medida crece hasta 2 veces su tamaño habitual. Pero este resultado puede llevar a engaño. Esto se debe principalmente a que la viruta produce unos chispazos severos capaces de saturar al filtro, o bien la viruta introducida tenía un punto de fusión muy reducido; por lo que más que el baño fundido del sustrato se estaría hablando del baño de la viruta.

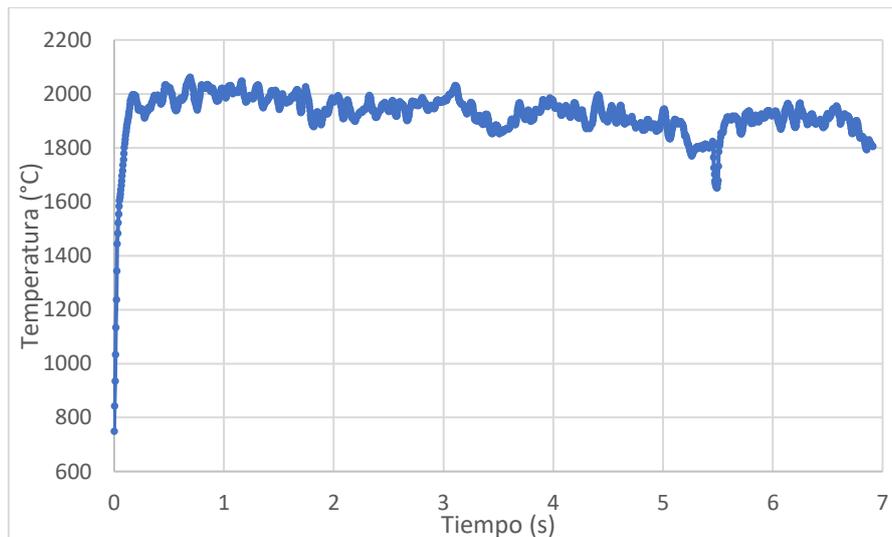


Gráfico 7. Temperatura Viruta.

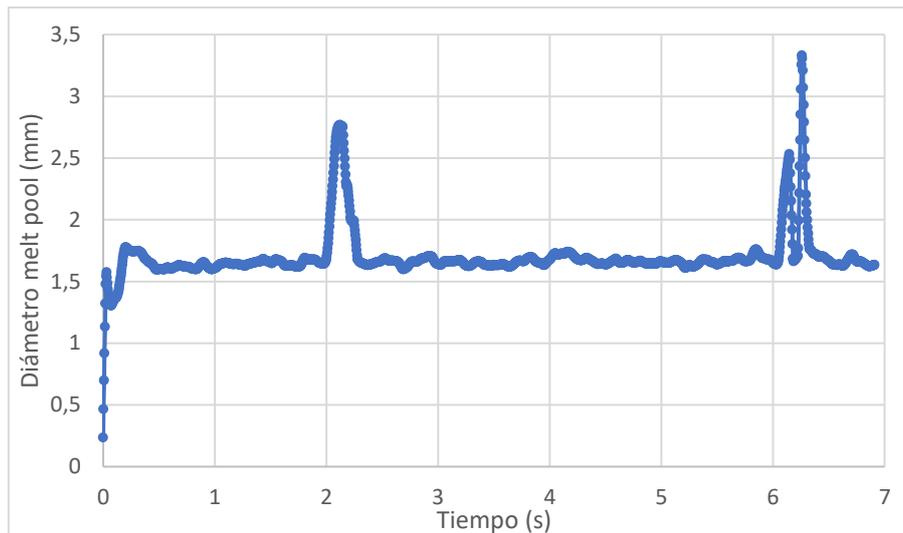


Gráfico 8. Diámetro melt pool Viruta.

Por tanto, de la prueba de la viruta no se pueden extraer resultados concluyentes. No obstante, se podría distinguir si una viruta hubiese interferido en el aporte mediante la lectura del diámetro del *melt pool*, ya que el hecho de aumentar tan drásticamente no se produce por muchos otros fenómenos.

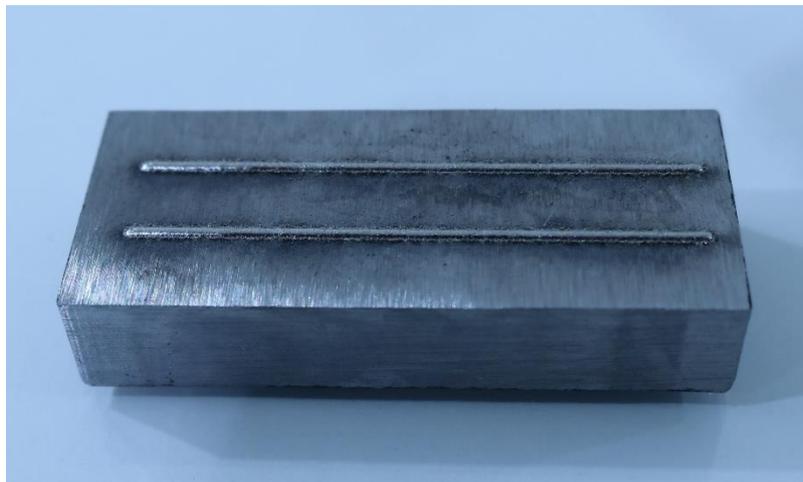


Ilustración 23. Sustrato de viruta con cordón.

2.6.4. Defecto de polvo metálico sobre el sustrato

En este caso se va a disponer de polvo sobre el sustrato. Es una manera de dar imagen a un derrame que por cualquier motivo aparezca polvo metálico sobre nuestro sustrato, pero de una manera más exagerada. Para ello se dispuso una fila de polvo en la parte intermedia de la pieza y con ayuda de un imán para que no se desprendiese a la hora de aportar.

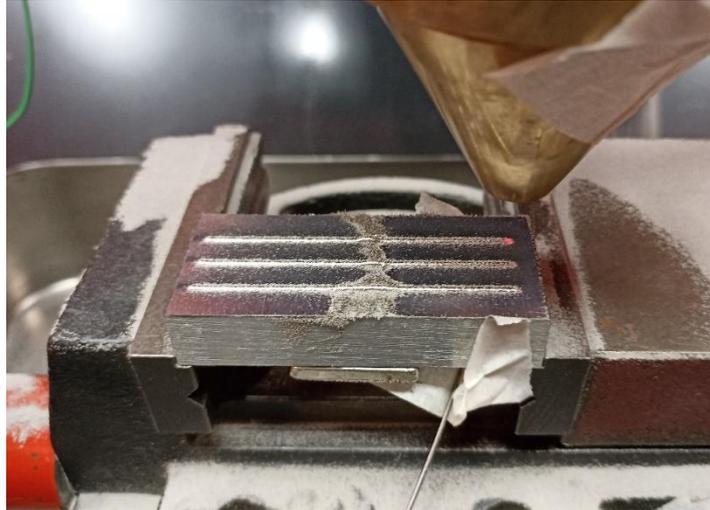


Ilustración 24. Sustrato con polvo tras el aporte.

Los resultados obtenidos tanto de temperatura del baño fundido, como de su diámetro resultan interesantes:

En cuanto a la temperatura se aprecia un claro descenso de esta. Ello es debido a que al atravesar esta zona el polvo previamente depositado hace de pantalla absorbiendo calor que debería incidir en el sustrato. Esto se debe a que además de hacer de pantalla, el material de aporte (AISI H13) tiene un punto de fusión menor que el sustrato, dado que se trata de un acero al carbono básico (poco aleado). También se observa claramente las zonas en las que había más o menos polvo, como reflejan las siguientes gráficas.

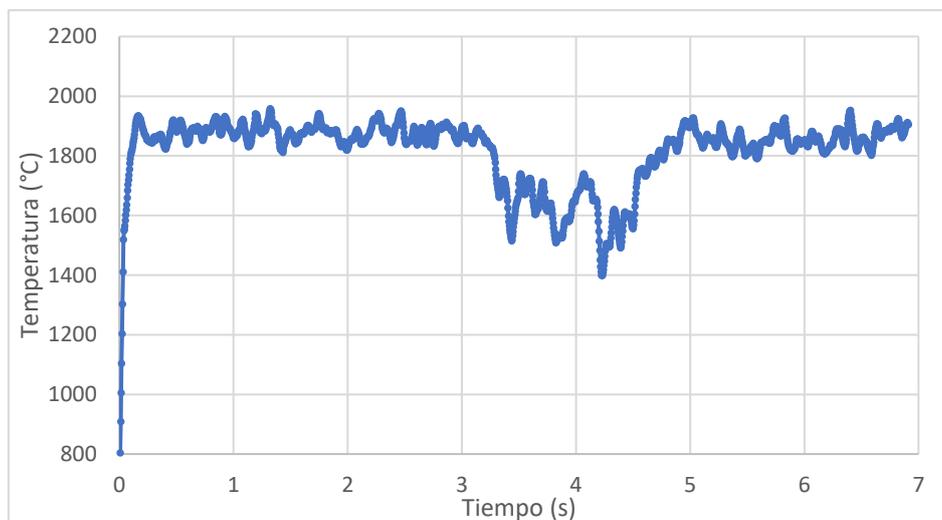


Gráfico 9. Temperatura Polvo (mucho polvo).

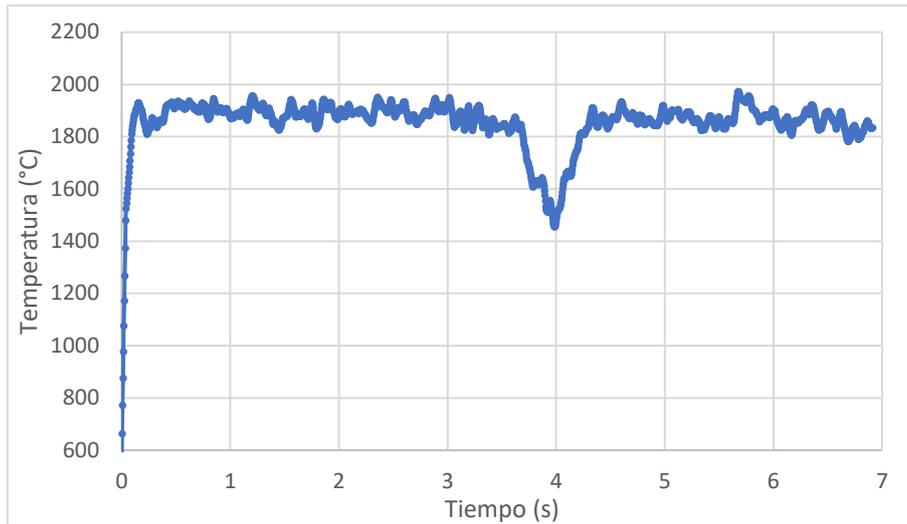


Gráfico 10. Diámetro melt pool Polvo (poco polvo).

La anchura del *melt pool*, según las gráficas obtenidas indican que crece. Pero la realidad es que lo que se está midiendo no es la anchura del baño fundido del sustrato sino el de la capa de polvo metálico. Esto se debe a que, al poseer menor punto de fusión, el láser es capaz de fundir más material y crear un *melt pool* mayor. Al igual que con la temperatura, también se pueden apreciar las zonas con más o menos polvo, que se identifica en la gráfica con una mayor distancia en la que el baño es más amplio.

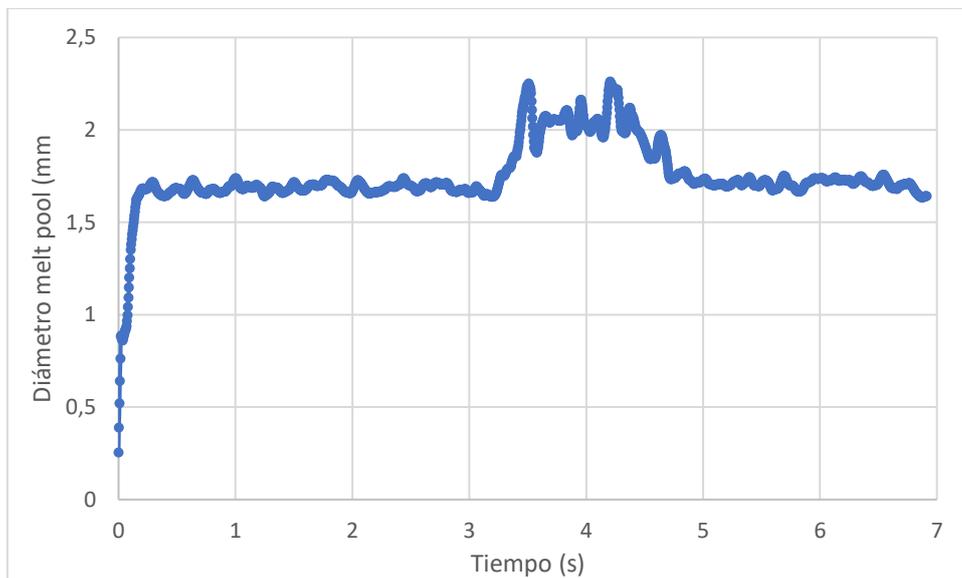


Gráfico 11. Diámetro melt pool Polvo (mucho polvo)

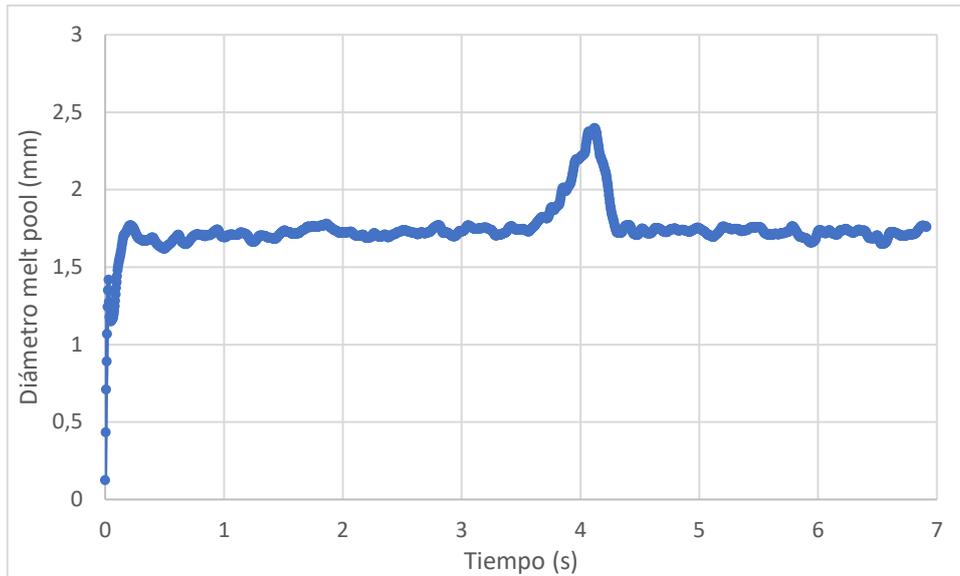


Gráfico 12. Diámetro melt pool Polvo (poco polvo)

Por tanto, se puede concluir que la presencia de polvo en nuestro sustrato se hará notar tanto en la temperatura como en la anchura de nuestro *melt pool*. Como se ha comentado, en ambos parámetros se aprecia la distancia en la que se encuentra el polvo. Además, las desviaciones de temperatura y anchura son razonables por lo que ante este defecto podríamos detectar que algo no funciona correctamente. Por último, cabe recalcar que visualmente se aprecia como el polvo que se encontraba en la superficie del sustrato ha quedado adherida al cordón.

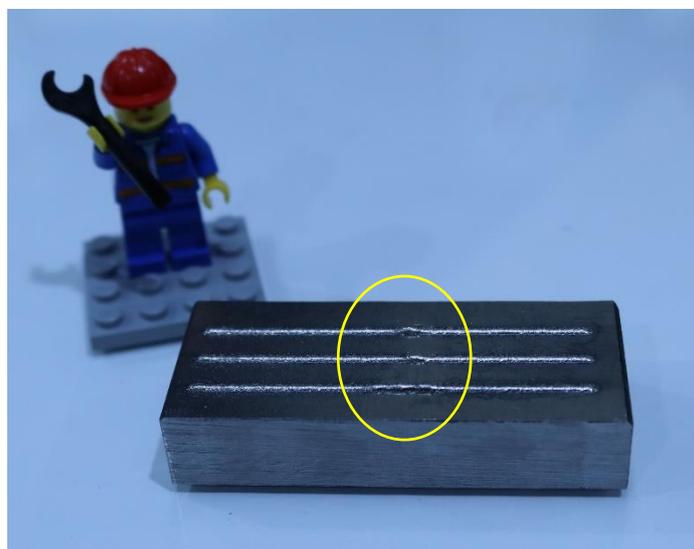


Ilustración 25. Irregularidades en los cordones.

2.6.5. Defecto de aceite

En este último defecto de sustrato se quiso simular la aparición de aceite en la pieza. En este caso no se trata de un defecto puntual sino de uno continuo ya que el aceite se esparció por toda la pieza.

Tras el análisis de gráficos y resultados obtenidos se han llegado a las siguientes conclusiones:

Para empezar, a lo que la temperatura del baño fundido se refiere, se puede apreciar un claro descenso de la temperatura media de entorno unos 250 °C y una irregularidad mucho mayor que la apreciada en la referencia.

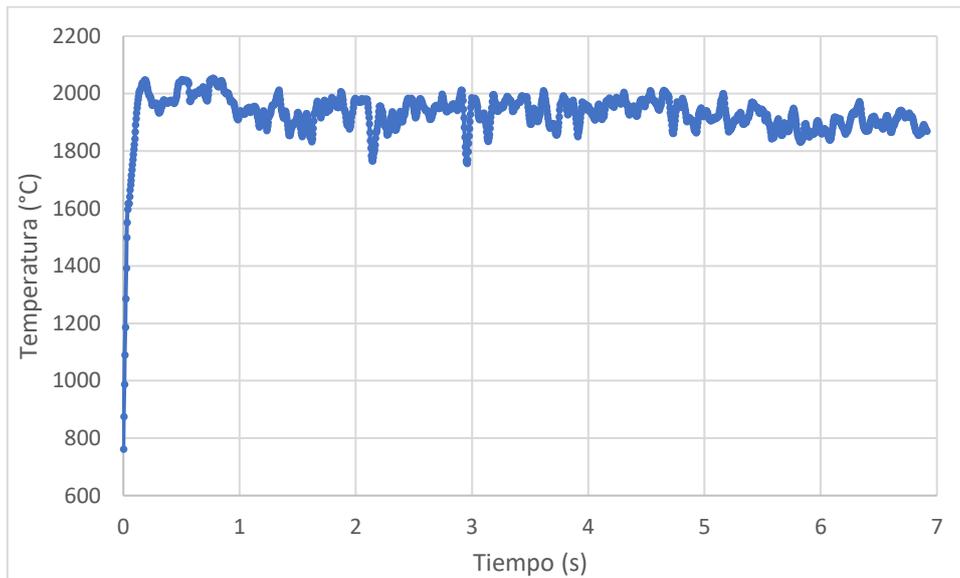


Gráfico 13. Temperatura Aceite.

La anchura del baño también sufre una gran desviación, y su valor medio se eleva relativamente poco respecto al valor de referencia. Esto se debe a que la presencia de aceite no permite en ciertas zonas que se alcance la temperatura correcta evitando o fomentando la creación correcta del baño de fundido. Esta irregularidad puede afectar a la unión entre sustrato y cordón haciendo que sea más endeble. Para este defecto se ha mirado un aspecto a partir del baño fundido que es la circularidad de este. Con este parámetro se confirma la irregularidad de las dimensiones del *melt pool*. Siendo uno el valor donde es completamente circular y cero lo contrario, se presentan las siguientes gráficas. En estas se puede apreciar que, en las medidas de referencia, la circularidad de este es de entorno al 0,9. No obstante, para los ensayos de aceite, el valor desciende hasta los 0,75.

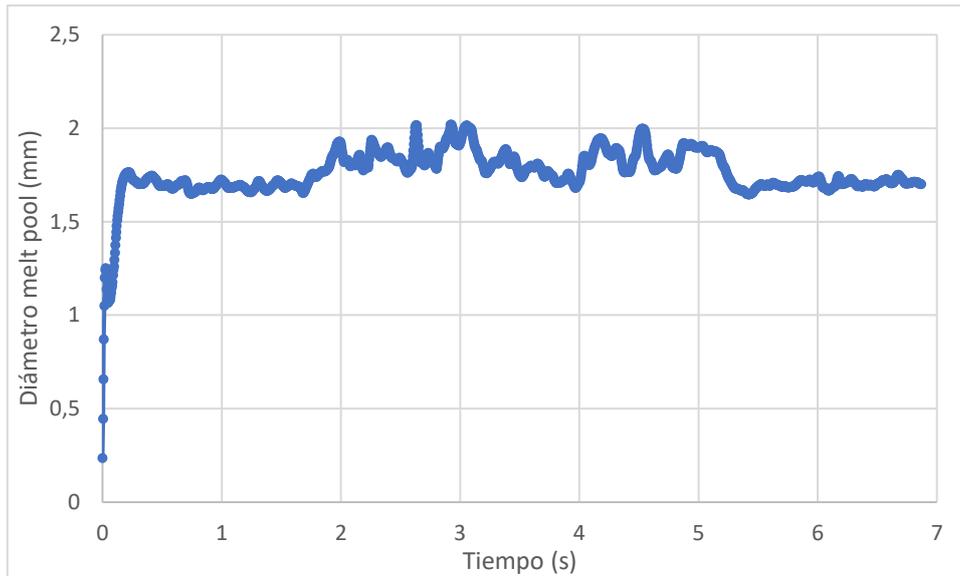


Gráfico 14. Diámetro melt pool Aceite.

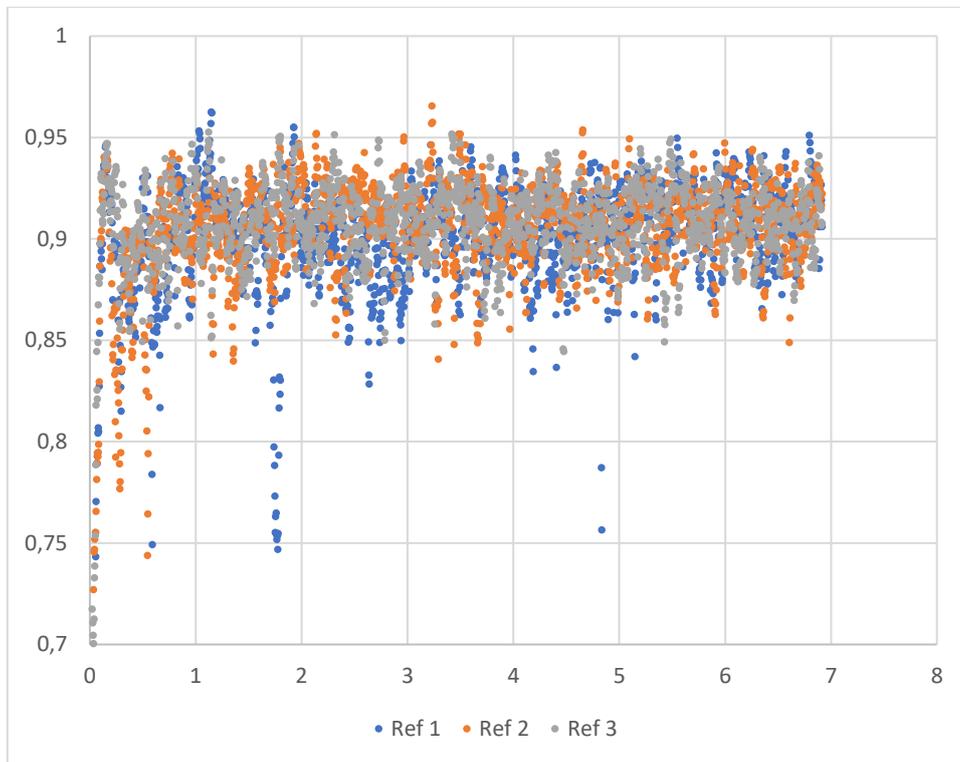


Gráfico 15. Variaciones de la circularidad de la referencia.



Gráfico 16. Variaciones de la circularidad del Aceite.

Como resultado, se puede afirmar que ante la presencia de aceite se espera una temperatura menor y más irregular con una anchura del *melt pool* también irregular. No obstante, al contrario de lo que podría parecer, no se incrementa la temperatura ya que el aceite puede suponer un peligro a la hora de entrar en contacto con el haz láser, que podría arder. Por último, cabe destacar que visualmente se aprecia una superficie más sucia, con aceite adherido al cordón. Si el aceite ha quedado atrapado dentro del cordón puede afectar a la integridad metalúrgica de este. También se puede apreciar que el material de aporte en forma de polvo se queda impregnado en el aceite lo que acarreará problemas en siguientes aportes.

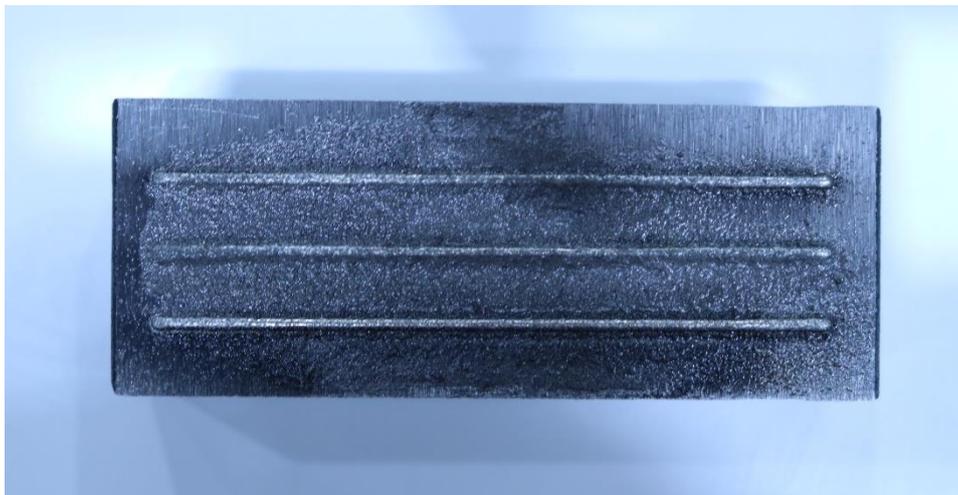


Ilustración 26. Sustrato con aceite tras el aporte.

2.6.6. Variación de altura

Abordando ahora los defectos producidos en máquina, se va a comenzar simulando una variación de altura de la boquilla tanto positiva como negativa a fin de observar la importancia de que el láser incida a la distancia correcta. La variación será de 10 mm y se comentará a continuación ambos casos.

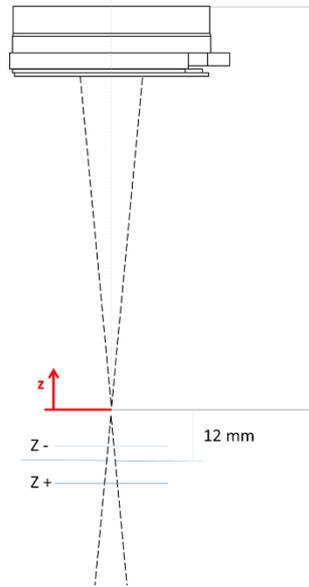


Ilustración 27. Distancias focales con la variación de altura.

Pese a que pueden parecer casos muy distintos en el fondo comparten muchas similitudes en cuanto a la monitorización. Comenzando con la temperatura del baño fundido ambos casos sufren un descenso de temperatura. Esto no es cierto en la realidad dado que al bajar la boquilla el área de incidencia del láser es menor, concentrando más energía en la superficie y aumentando su temperatura. Por el contrario, al elevar la boquilla esta área aumenta lo que provocaría un descenso de la temperatura, pero entonces ¿qué está ocurriendo? simplemente que, al desplazarse la boquilla, también lo hace el pirómetro, apuntando fuera del baño. Es por ello por lo que se observa que en ambos casos la temperatura desciende. Para solucionar este fallo habría que rediseñar el equipo de monitorización haciendo independiente el pirómetro de la boquilla.

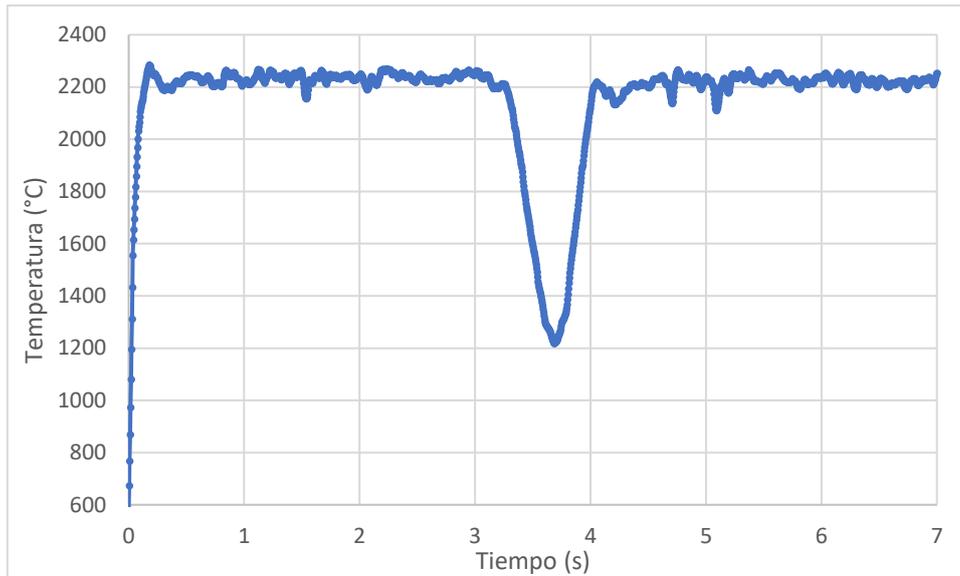


Gráfico 17. Temperatura Alta negativa.

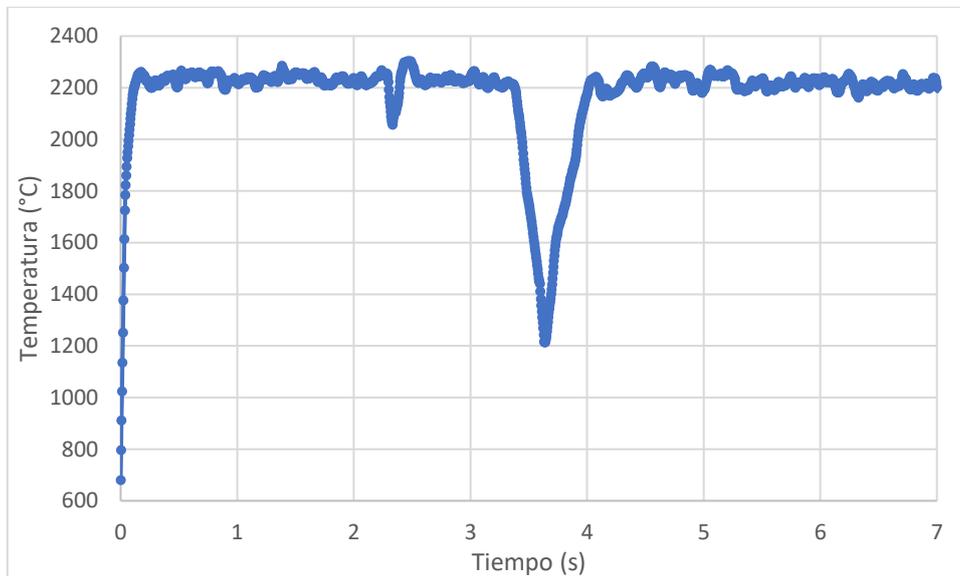


Gráfico 18. Temperatura Alta positiva.

En cuanto a las dimensiones del baño fundido, los datos obtenidos de monitorización indican, para ambos casos, que aumenta. No obstante, esto es debido al desenfoque de la cámara coaxial. Cuando la cámara se mueve en vertical, esta sufre un desenfoque, creando una imagen menos nítida que al pasar por el filtro de Matlab, erróneamente indica que aumenta. Como hemos comentado, al elevar la boquilla el área de incisión del láser se hace mayor. Sin embargo, que esta área sea mayor no implica que el baño aumente ya que se aportará menos energía por unidad de superficie creando probablemente un *melt pool* menor. Por otro lado, al descender la boquilla el área de incidencia se hará menor, concentrando más energía en una superficie menor creando un baño fundido más pequeño que el de referencia.

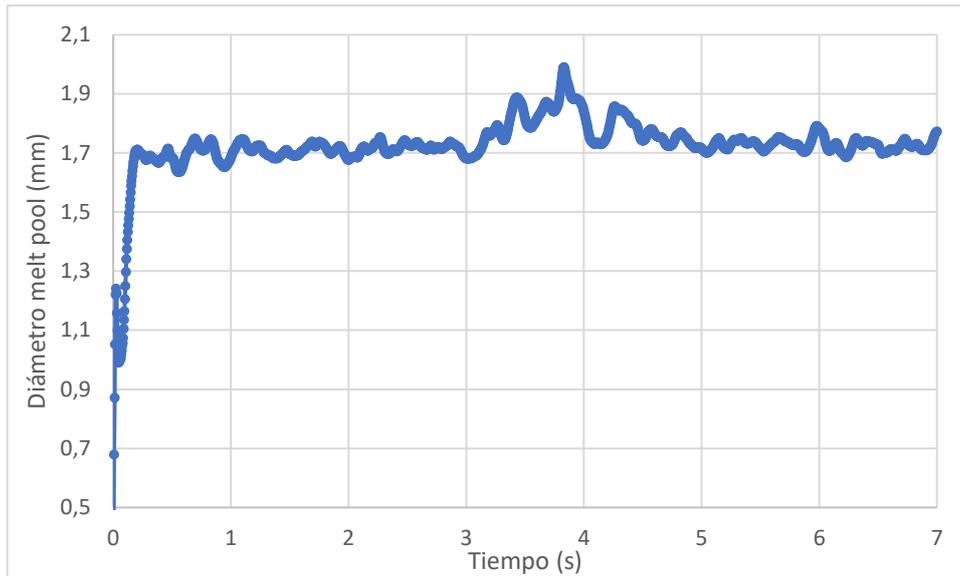


Gráfico 19. Diámetro melt pool Altura negativa.

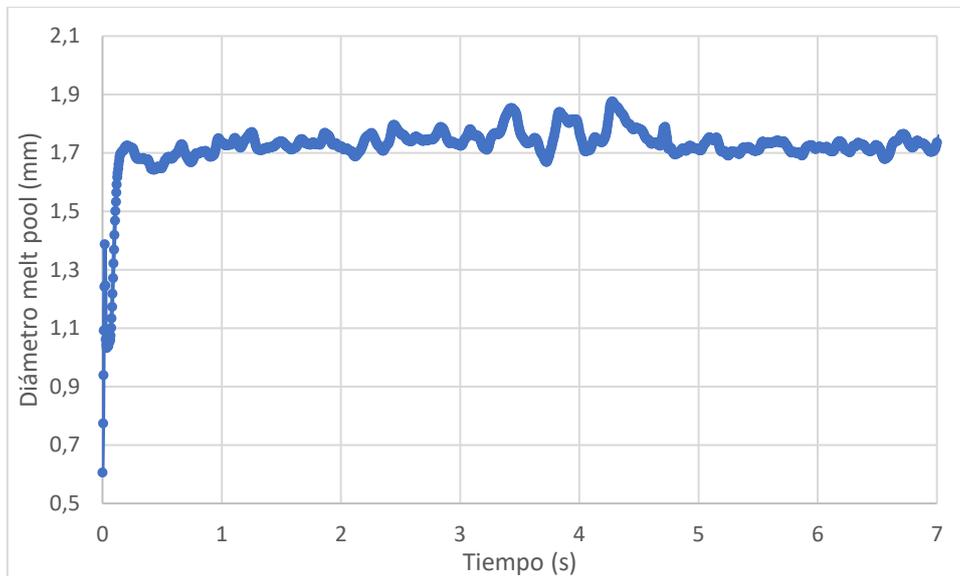


Gráfico 20. Diámetro melt pool Altura positiva.

Por tanto, se puede concluir que se puede detectar el defecto pero, debido a la disposición del equipo de monitorización, no se muestra lo que sucede en la realidad. Con una configuración distinta del equipo de monitorización se podrían medir las respuestas reales de este suceso. No obstante, la complejidad de este nuevo equipo asciende considerablemente. Por ende, es un defecto que con la instrumentaría actual no somos capaces de visualizar, pero sí de detectar que algo no está funcionando correctamente.

2.6.7. Defecto de variación de potencia

Este defecto se creó con el fin de simular distintas variaciones de potencia inesperadas por parte del generador láser. La potencia nominal del láser es 600 W. Para ello se han representado 2 escenarios:

- Variación negativa de la potencia:
 - 2 medidas con decremento del 10% (540 W)
 - 1 medida con decremento del 20% (480 W)
- Variación positiva de la potencia:
 - 2 medidas con incremento del 10% (660 W)
 - 1 medida con incremento del 20% (720 W)

Se comenzará analizando la variación negativa de potencia:

Se aprecia claramente como la temperatura del *melt pool* desciende significativamente con el descenso de potencia. Esto es debido a que una reducción de potencia implica una reducción de energía aportada por magnitud de tiempo, lo que supone menor capacidad para elevar la temperatura del baño. Es curioso cómo pese a que la última medida se realiza con un descenso de potencia el doble de grande, la temperatura se mantiene con los mismos valores que para el descenso del 10%.

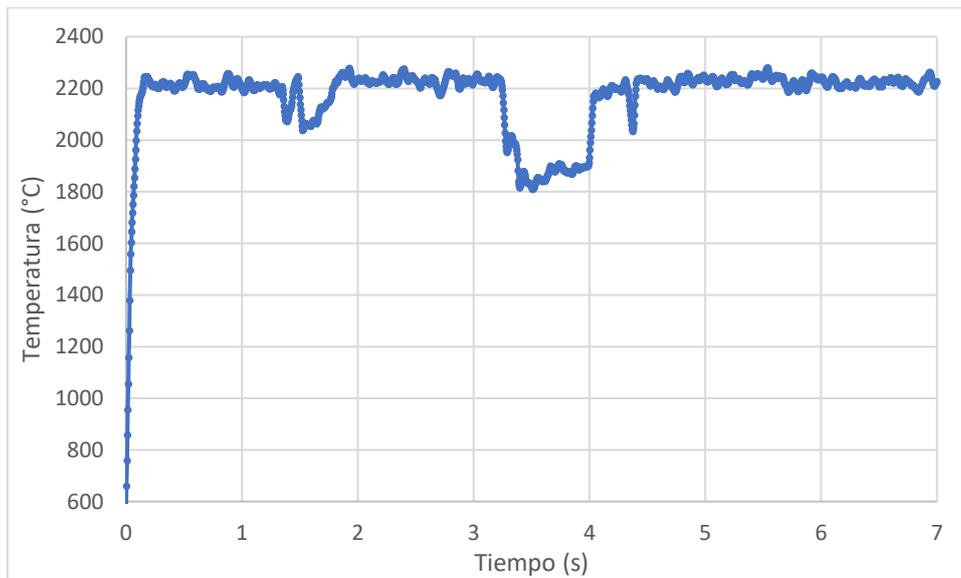


Gráfico 21. Temperatura Potencia 10% menor a la referencia.

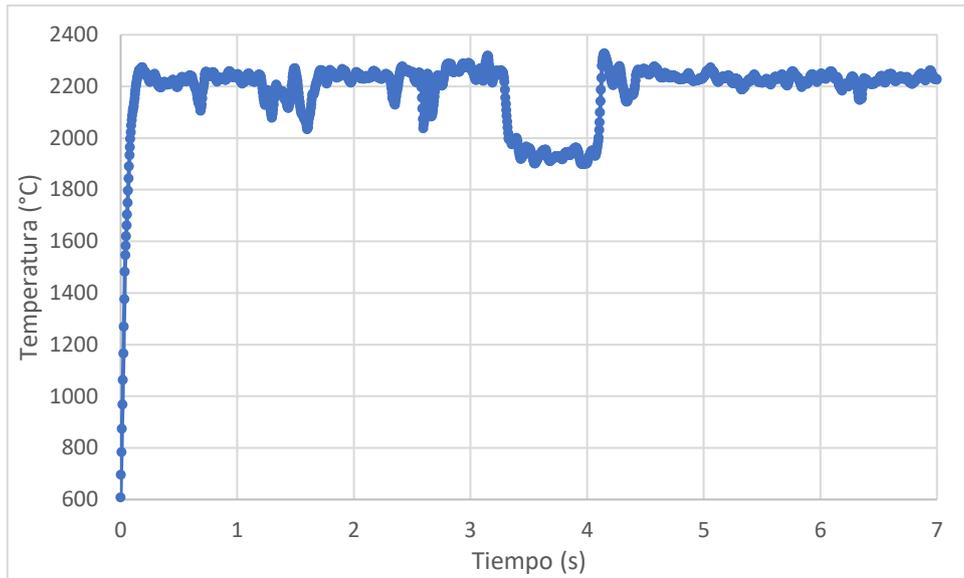


Gráfico 22. Temperatura Potencia 10% menor a la referencia.

A lo que las dimensiones del baño respecta, también se observa un claro descenso de su anchura. Esto es debido a que, al emitir menos potencia, obtenemos menos capacidad de fundir material, por lo que el polvo y el sustrato no alcanzan los valores necesarios para crear el correcto *melt pool*. No obstante, se repite la incongruencia anterior. En este caso las dimensiones del baño no parecen verse más distorsionadas por una bajada el doble de grande.

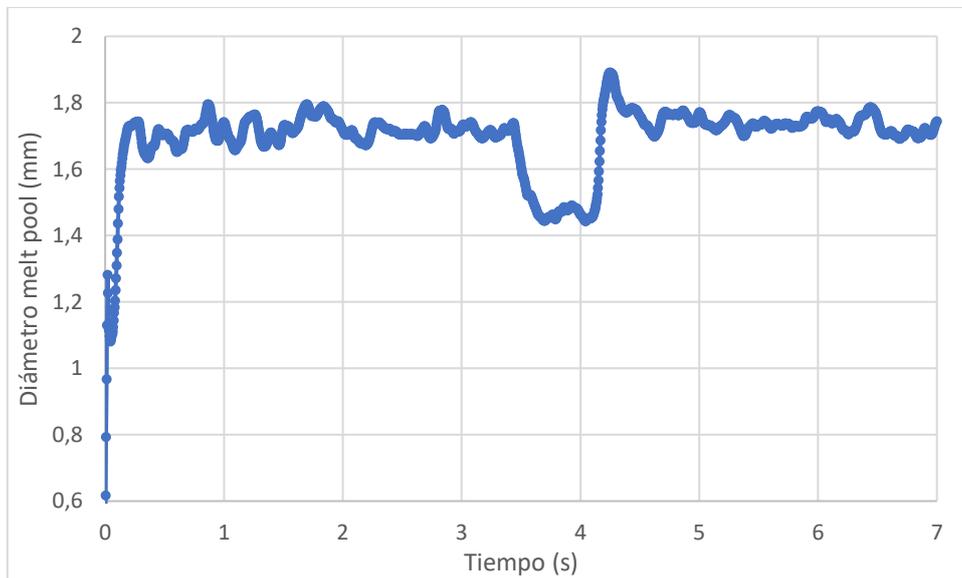


Gráfico 23. Diámetro melt pool Potencia 20% menor a la referencia.

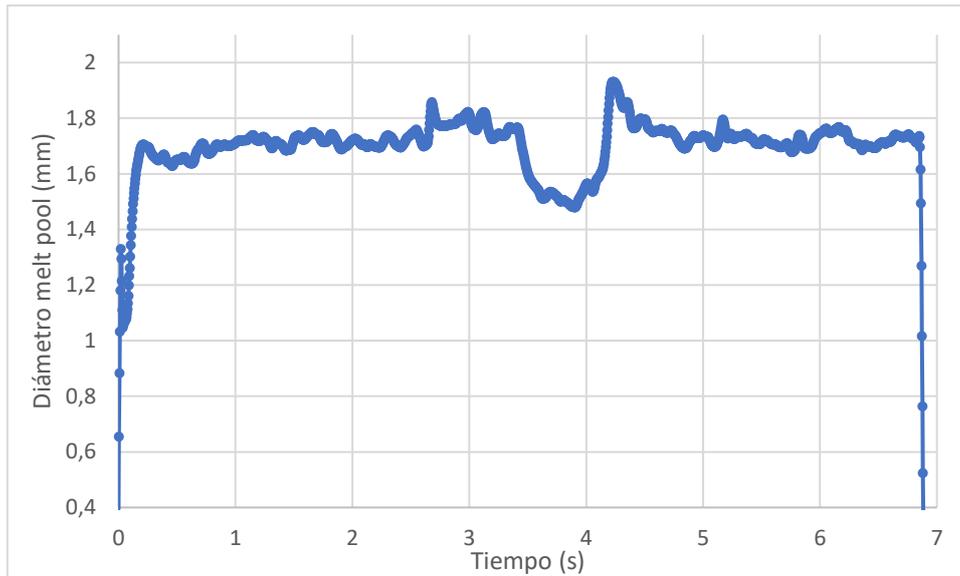


Gráfico 24. Diámetro Potencia 20% menor a la referencia.

Por contrapartida, se analizará el caso inverso, el incremento de potencia. La temperatura del baño fundido para los 2 valores a los que se ha aumentado se ha elevado. Esto es debido a que el aumento de potencia otorga mayor capacidad de calentar la superficie. No obstante, la temperatura no se eleva notablemente ya que al encontrarse a grandes temperaturas se requiere gran cantidad de energía para poder incrementar la temperatura del baño fundido. Nuevamente no parece haber distinción entre el incremento del 10% y del 20%.

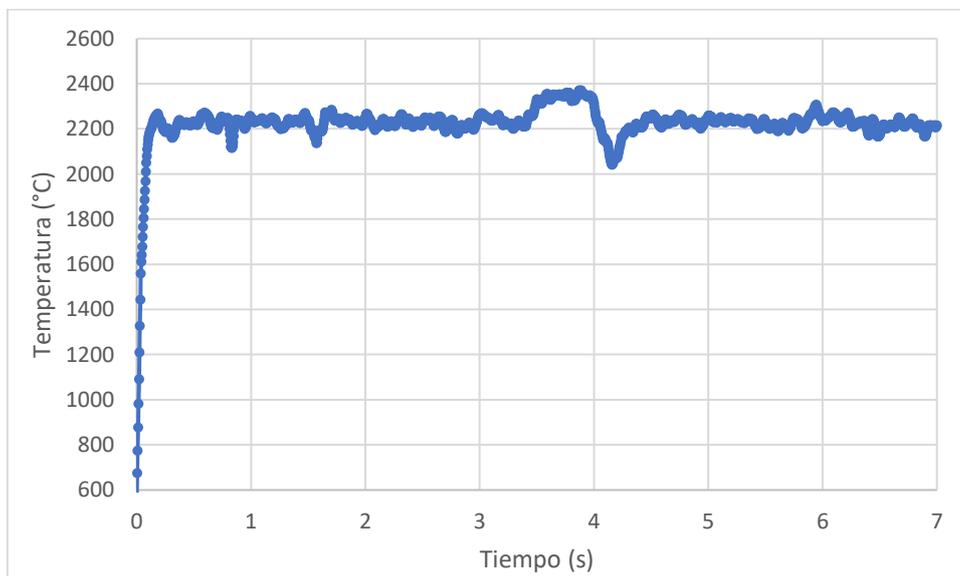


Gráfico 25. Temperatura Potencia 10% mayor a la referencia.

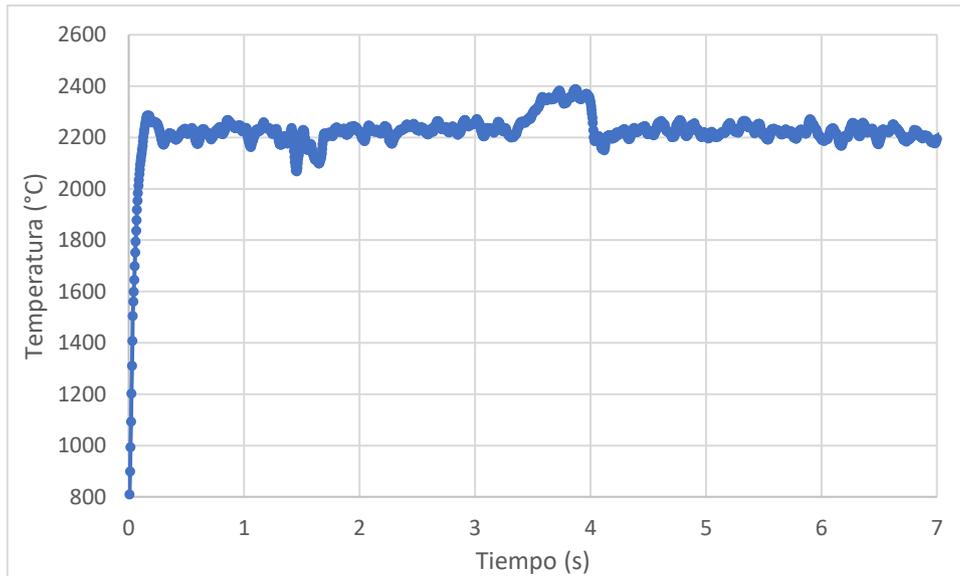


Gráfico 26. Temperatura Potencia 20% mayor a la referencia.

Por otro lado, la anchura del *melt pool* sí que sufre un aumento notable de su tamaño. Al ser el láser capaz de fundir más zona, este se hace mayor lo que no implica que sea mejor. Puede ocurrir que el material de aporte no se adhiera pese a tener más tamaño y, por tanto, estar malgastando energía. Además, se está modificando la microestructura de más zona, lo que puede ocasionar defectos en el sustrato o mayores tensiones residuales.

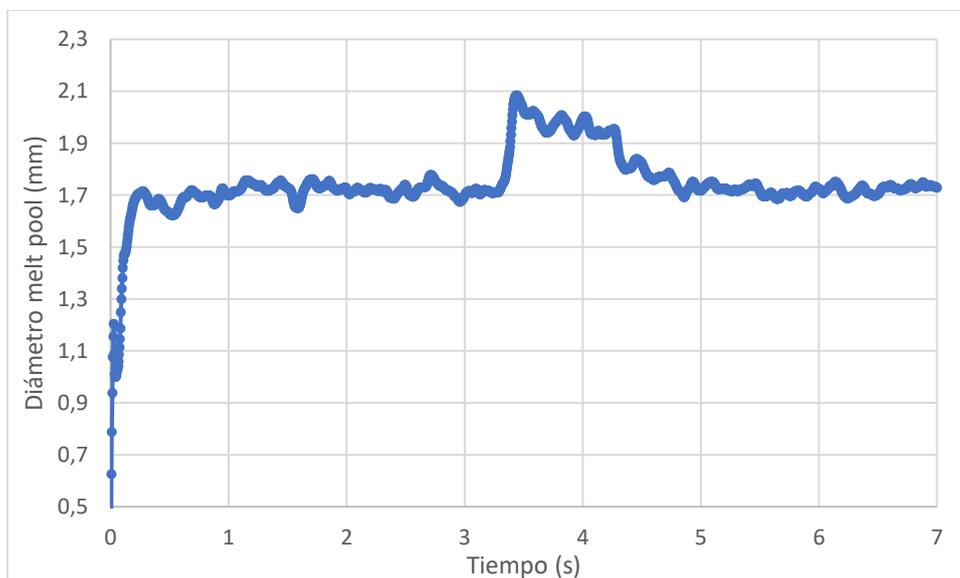


Gráfico 27. Temperatura Potencia 10% mayor a la referencia.

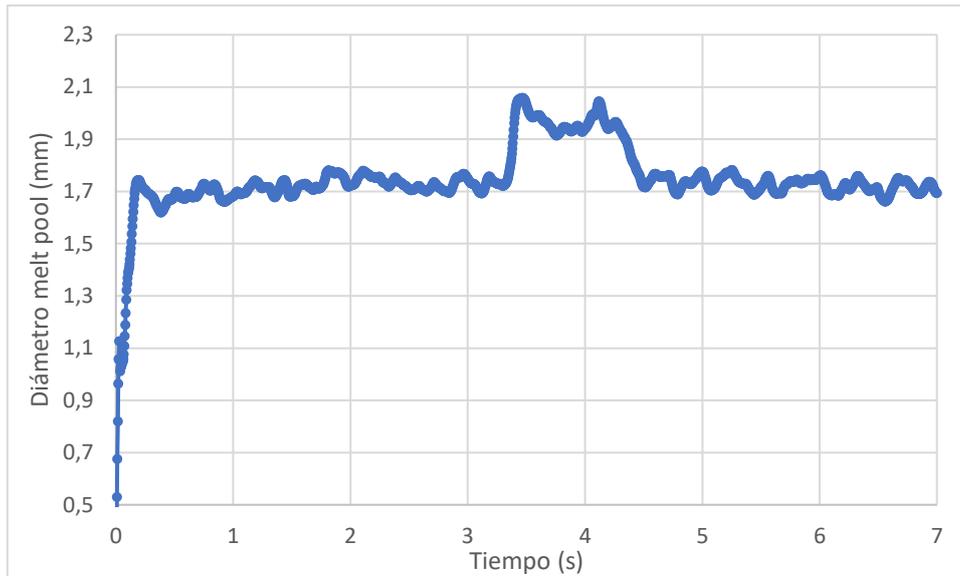


Gráfico 28. Temperatura Potencia 20% mayor a la referencia.

Así pues, se puede afirmar que tanto para un ascenso como un descenso las señales son claras. No obstante, el decremento de potencia se hace más evidente debido a sus drásticos cambios. Ambos defectos son perjudiciales dado que por negativa de potencia el baño fundido no será lo suficientemente grande para poder crear el cordón con sus dimensiones y características necesarias. Por positiva, se estará creando un *melt pool* excesivamente grande lo que ocasionará desperfectos en mayor parte de la pieza induciendo tensiones residuales y cambios de microestructura innecesarios. Principalmente el tener una fuente de calor concentrada es una ventaja de este proceso, pero si se hace el baño excesivamente grande se convertirá en lo contrario, una desventaja.

2.6.8. Defecto de variación de velocidad de avance

En este defecto se imitará un cambio de velocidades, tanto positivo como negativo. Se presentan 2 velocidades mayores a la de referencia y 2 velocidades menores a la de referencia. La velocidad de avance de la referencia es de 525 mm/min.

- Velocidad de avance negativa:
 - 2 ensayos de 420 mm/min.
 - 1 ensayo de 365 mm/min.
- Velocidad de avance positiva:
 - 2 ensayos de 630 mm/min.
 - 1 ensayo de 685 MM/MIN.

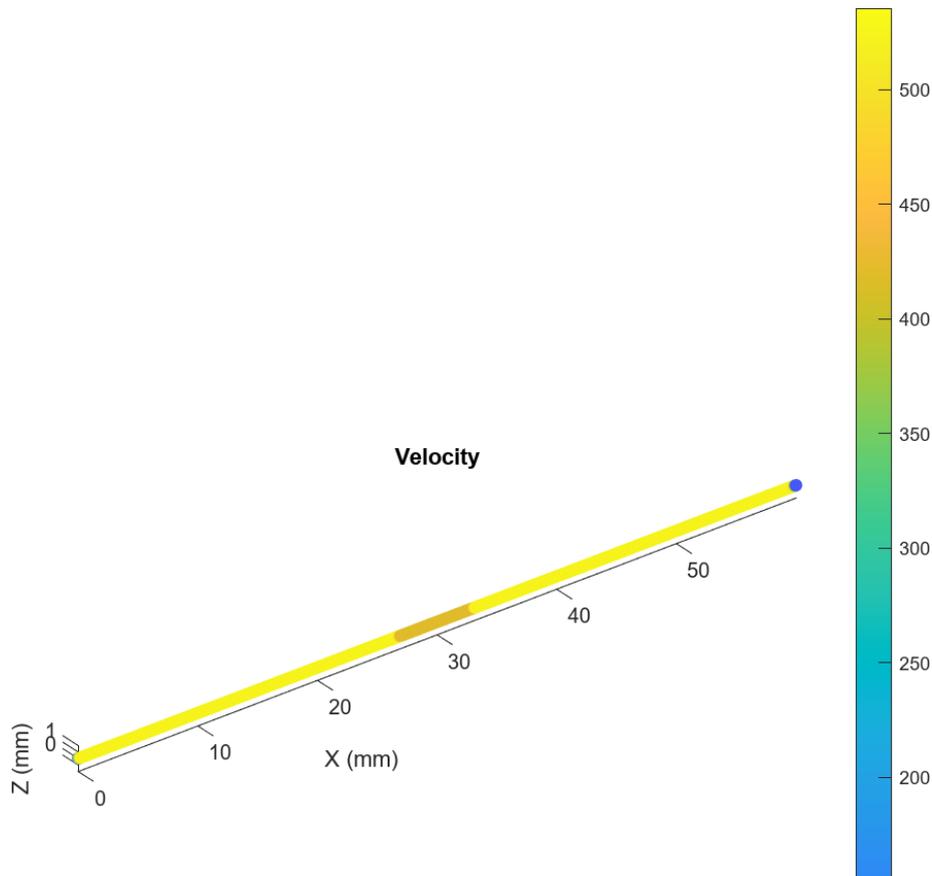


Gráfico 29. Dinámica de la Velocidad de avance negativa.

Comenzando por la reducción de la velocidad de avance, se aprecia como la temperatura no se ve prácticamente afectada en el primer supuesto. En cambio, para el último ensayo, donde la velocidad es aún menor, se puede observar un ligero descenso de la temperatura, lo que no se sujeta a la lógica. Esto es debido a que si la velocidad es menor, el láser incidirá más tiempo sobre dicha zona aumentando así el aporte de energía que debería conducir a un incremento de la temperatura. Pese a que no parezca presentar inconvenientes tener una velocidad de avance reducida, esto puede conllevar a cambios en la microestructura de la periferia del *melt pool* ya que el láser estará más tiempo incidiendo.

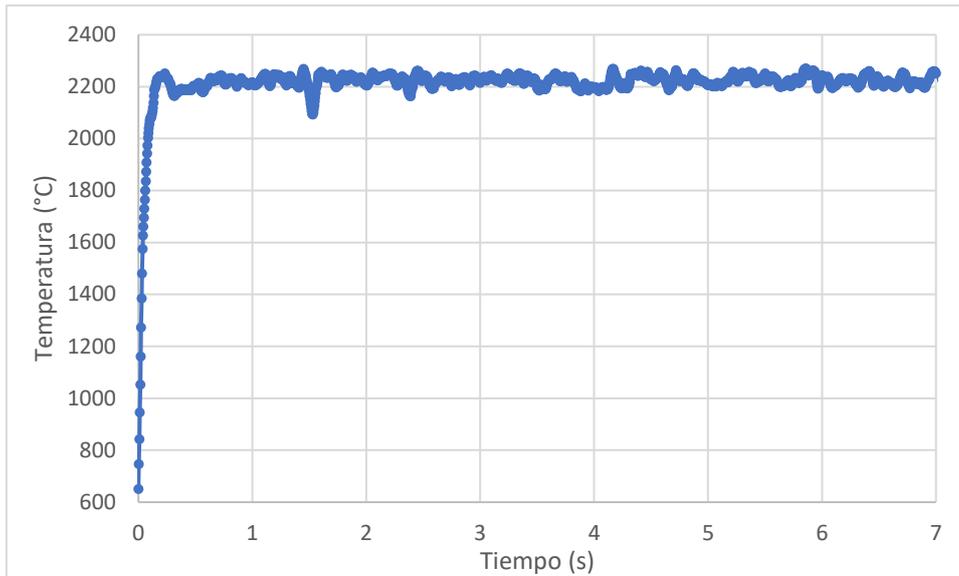


Gráfico 30. Temperatura Velocidad de avance a 420 mm/min.

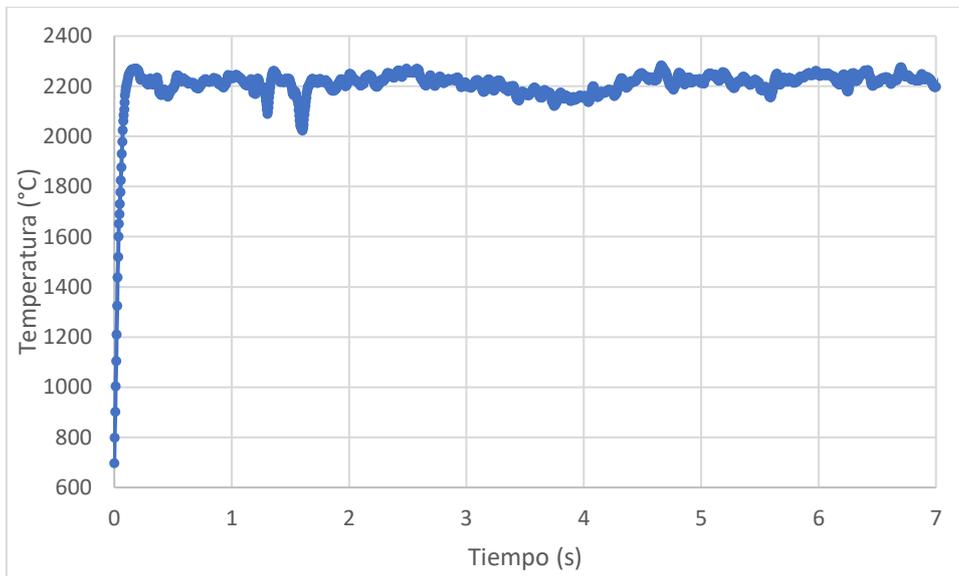


Gráfico 31. Temperatura Velocidad de avance a 365 mm/min.

En cuanto al ancho del baño fundido, presenta un notable crecimiento para ambos casos siendo para la menor velocidad un diámetro mayor más constante. Esto se debe a que al incidir el láser durante más tiempo en la superficie (por ir más lento), hay más aporte de calor, lo que crea un *melt pool* mayor.

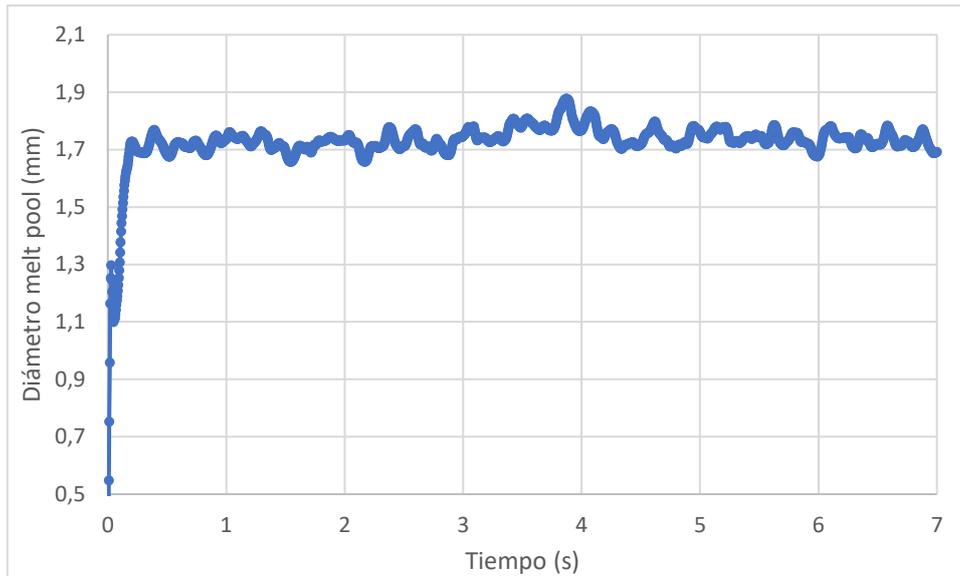


Gráfico 32. Diámetro melt pool Velocidad de avance a 420 mm/min.

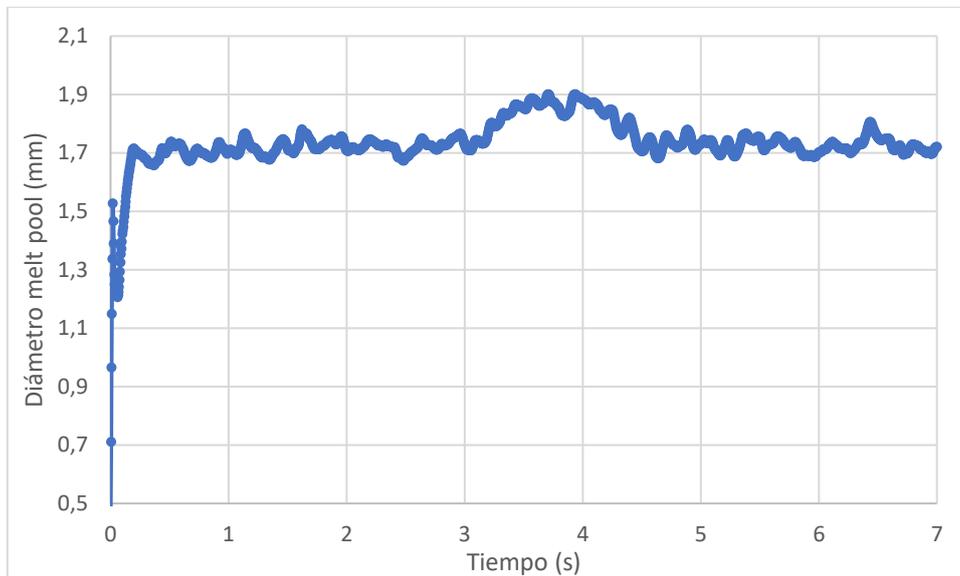


Gráfico 33. Diámetro melt pool Velocidad de avance a 365 mm/min.

Abordando la otra vertiente, en la que la velocidad de avance se aumenta, para velocidades de avance no muy superiores a la nominal, menores al 20%, no se puede apreciar una variación de las temperaturas. No obstante, para elevaciones superiores se observa un claro descenso de la temperatura. Esto es debido a que el láser al poseer mayor velocidad pasa más rápido por la zona de incidencia no dando tiempo así a que se caliente correctamente la zona.

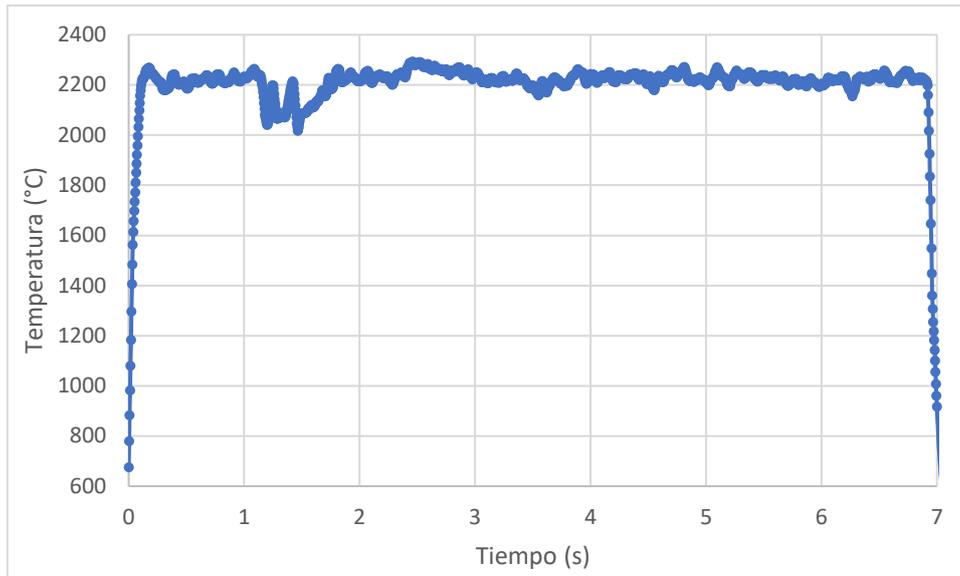


Gráfico 34. Temperatura Velocidad de avance a 630 mm/min.

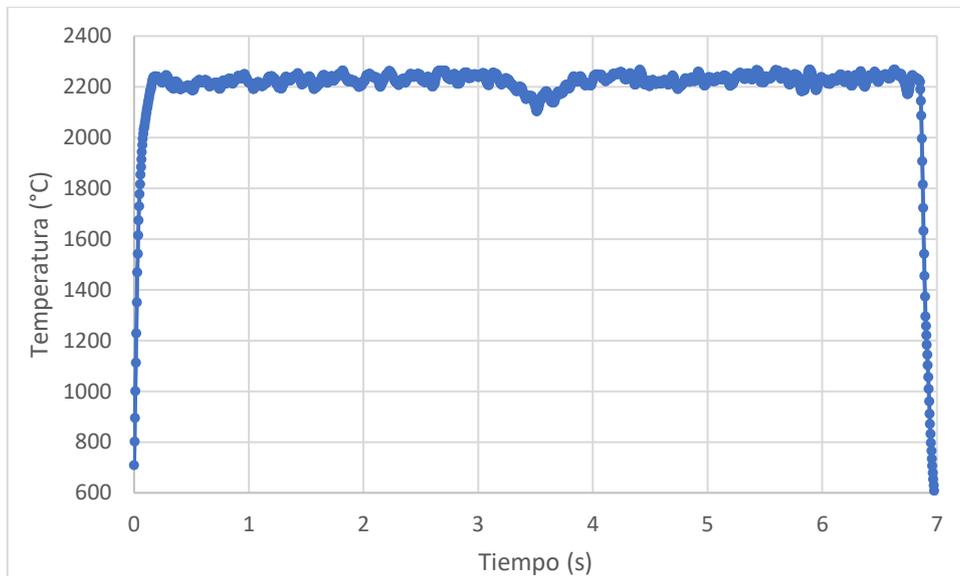


Gráfico 35. Temperatura Velocidad de avance a 685 mm/min.

En cuanto al *melt pool*, es notable el descenso de diámetro de este para ambas velocidades. Para la velocidad más lenta es claramente inferior. Esto se da por el mismo motivo que el anteriormente comentado, y es que al ganar velocidad pasa menos tiempo sobre la superficie a calentar, no dotando al baño fundido de las dimensiones y características necesarias.

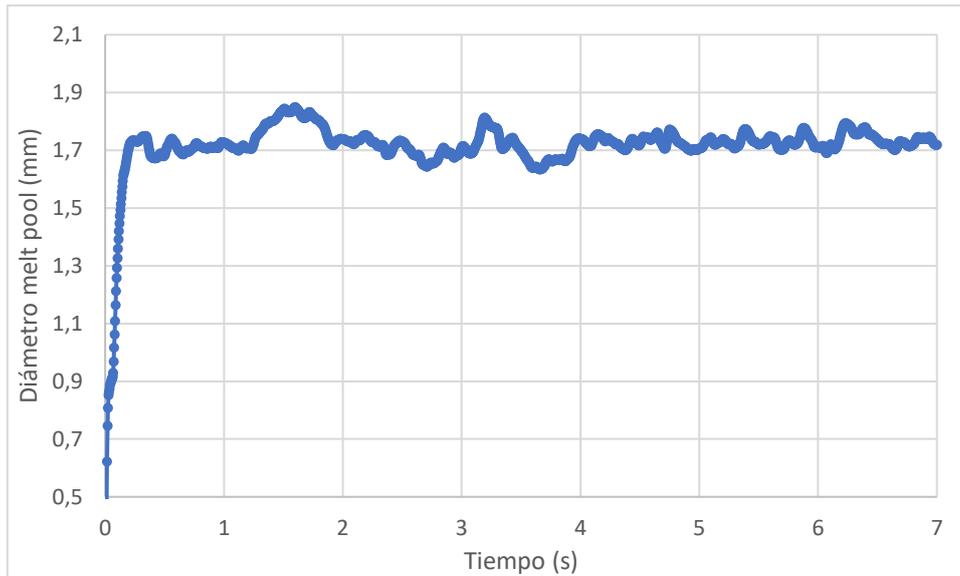


Gráfico 36. Diámetro melt pool Velocidad de avance a 630 mm/min.

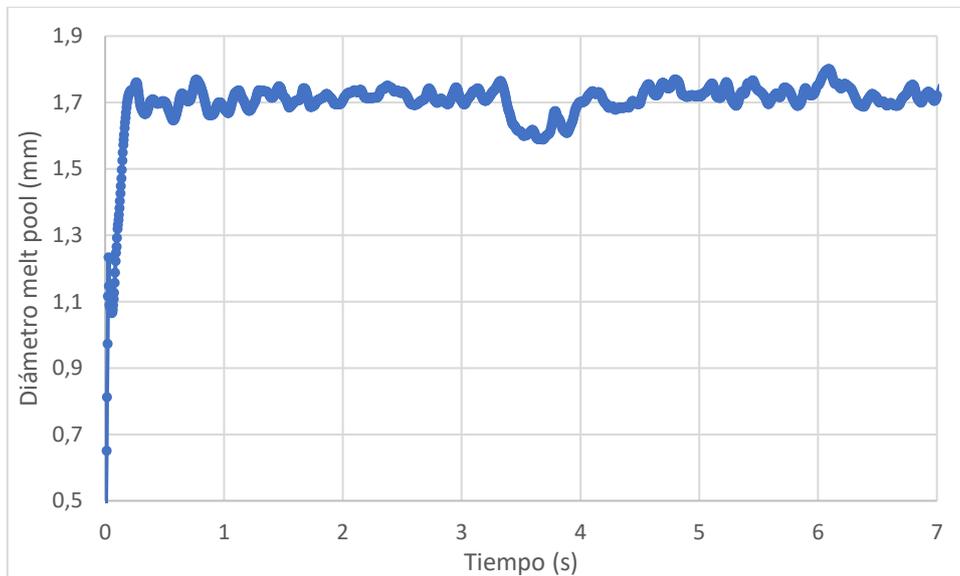


Gráfico 37. Diámetro melt pool Velocidad de avance a 685 mm/min.

Para concluir se puede afirmar que el parámetro que más información nos proporciona será el diámetro del *melt pool*, ya que se observa claramente el ascenso o descenso de la velocidad de avance. Además, se puede distinguir con claridad cada supuesto y orientativamente sus magnitudes. Por otro lado, la temperatura ofrece, en el caso en el que la velocidad disminuye, unos resultados confusos. No obstante, al aumentar la velocidad más de un 20% se puede apreciar un razonable descenso de temperatura coherente con lo ya comentado.

2.6.9. Defecto de variación de caudal

En este supuesto se realizaron dos cambios de caudal. Por un lado, se cortó el suministro de polvo y, por otro, se abrió completamente. El objetivo es simular un error en la tolva o un posible fallo en el cálculo de cuanto polvo se debería introducir.

Tras el análisis de los datos se han obtenido resultados interesantes:

Comenzando por el supuesto en el que se corta el caudal de polvo, se va a mostrar una gráfica donde se aprecia claramente que el caudal ha sido reducido a cero. En ella se puede observar como a medio aporte se cerró la tolva, impidiendo al polvo pasar y quedando únicamente el láser en funcionamiento. En la siguiente gráfica se representa el caudal de polvo respecto a la distancia recorrida por la boquilla. El caudal se encuentra en voltios ya que es la señal del sensor FlowWatch que convierte caudal de polvo en una señal entre 0 – 5 V.

La temperatura del baño en el instante en el que se produce el corte sufre un aumento puntual que luego se ve estabilizado y se mantiene en valores muy constantes con poca variación. Esto es porque la máquina ahora se encuentra funcionando a modo de soldadura por láser fundiendo únicamente el sustrato. Al no tener que fundir el material de aporte la temperatura representa una gran regularidad ya que el sustrato se encuentra con muy buen acabado y al láser le resulta muy sencillo fundir la zona incidida.

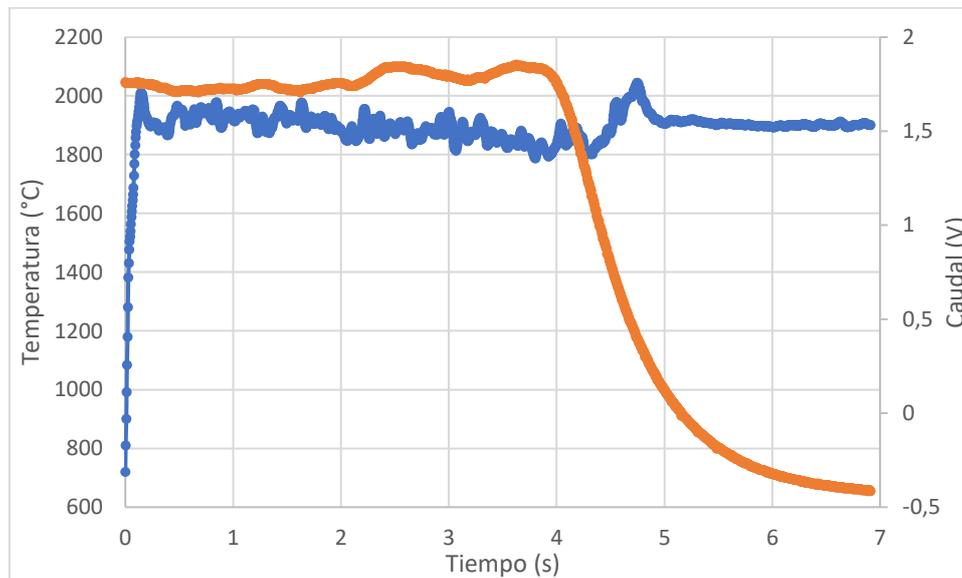


Gráfico 38. Temperatura y Caudal para Caudal mínimo.

El baño fundido representa un claro descenso. Esto es debido a que al no aportar polvo, únicamente funde el sustrato haciendo un *melt pool* más estable. Además, no se ven reflejados los brillos del polvo lo que suele ser la contribución del material de aporte al baño fundido.

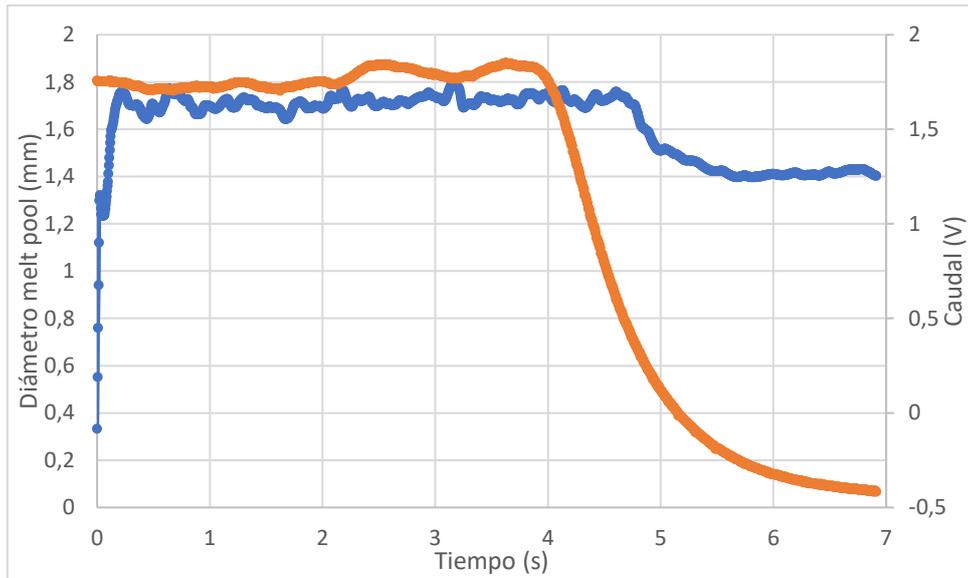


Gráfico 39. Diámetro melt pool y Caudal para Caudal mínimo.

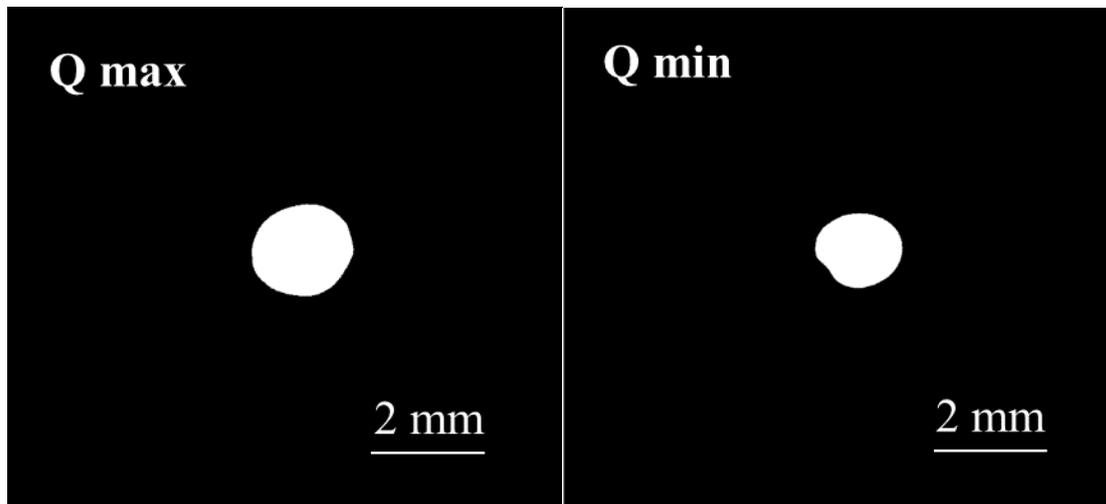


Ilustración 28. Diferencia entre diámetro del melt pool en el caudal máximo vs caudal mínimo.

Cuando se realiza la otra prueba, aumentando al máximo el caudal, se observa que la temperatura del baño fundido disminuye. Esto se debe a que el láser no es capaz de fundir correctamente el sustrato dado que parte del calor que debería ir al sustrato lo absorbe el material de aporte extra.

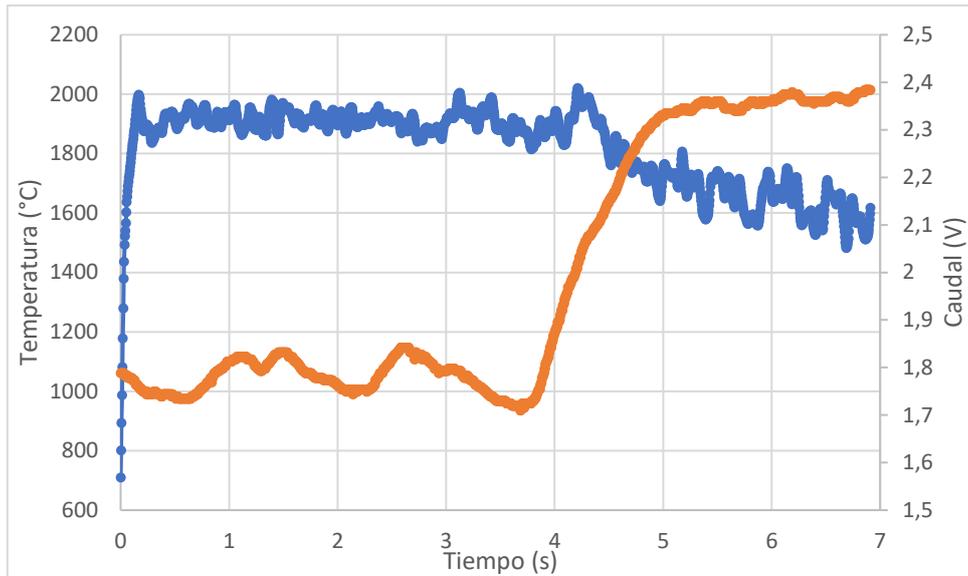
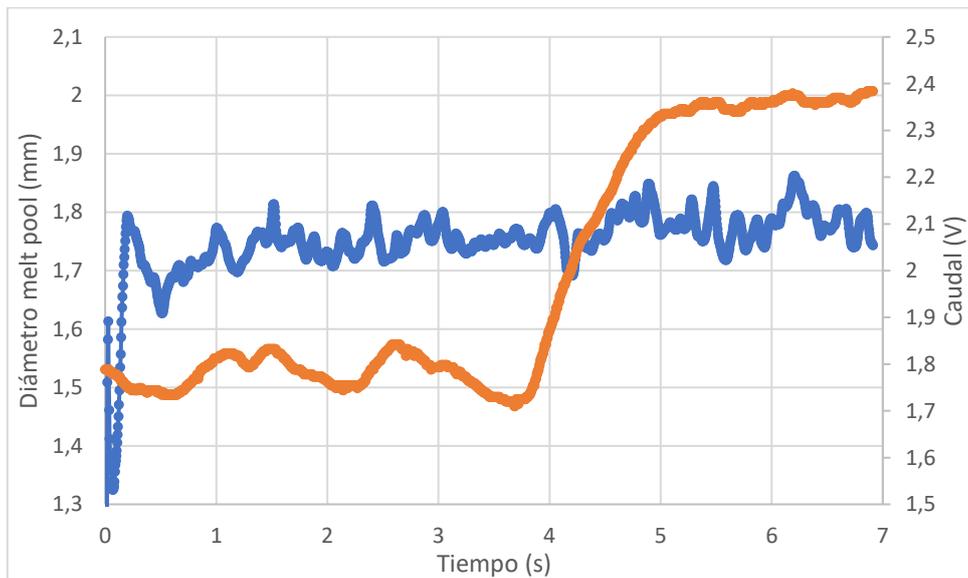


Gráfico 40. Temperatura y Caudal para Caudal máximo.

En cuanto a las dimensiones del *melt pool* no se pueden extraer conclusiones ya que en las 3 pruebas realizadas no hay indicios de un cambio de dimensiones. No obstante, se puede presumir que el diámetro real de este disminuya, pero no verse reflejado en la gráfica como consecuencia del incremento de chispas al aportar más material.



Por último, como era de esperar, el caudal de polvo se dispara y es así como se reflejan en las gráficas obtenidas.

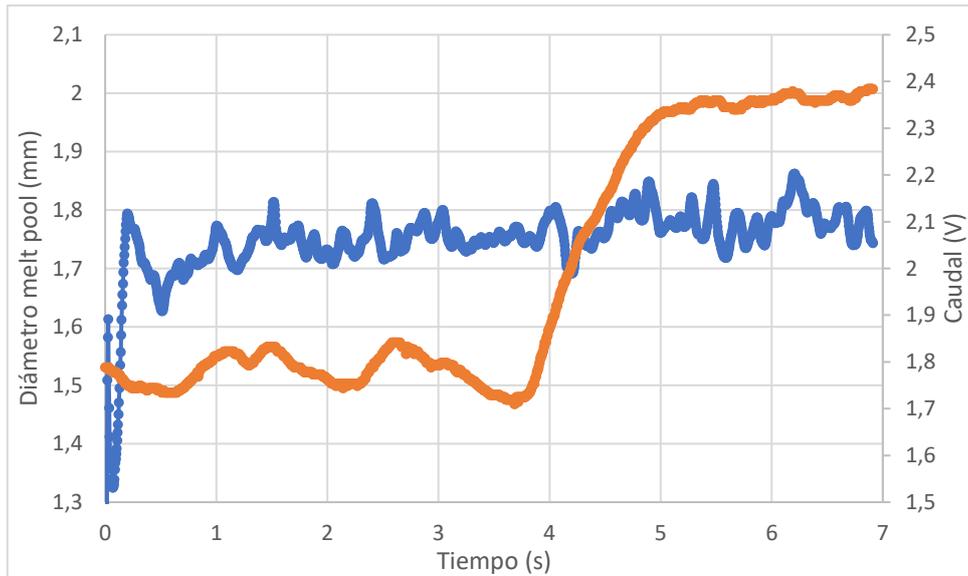


Gráfico 41. Diámetro melt pool y Caudal para Caudal máximo.

Comparando ambas pruebas se puede afirmar que el corte repentino de suministro de la materia prima es más perjudicial que el exceso de ella. Pese a que con el exceso se vaya a obtener un mayor derroche de materia prima, se consigue realizar el cordón. No obstante, este cordón no contará con la integridad metalúrgica característica de este proceso. La identificación de ambos defectos es fácilmente detectable mediante el valor del *poder flow*. No obstante, si no se dispusieran de estos datos, sería también sencillo identificar cuando no se está proporcionando polvo gracias a la anchura del *melt pool*, ya que desciende a unos niveles concretos que además presentan una variación prácticamente nula. Asimismo, visualmente se puede localizar fácilmente cuando se ha cortado el suministro de polvo. El exceso de polvo no es tan sencillo de identificar, pero observando bien, se puede localizar polvo que no ha sido del todo bien añadido al cordón y se ha adherido a la superficie adyacente.

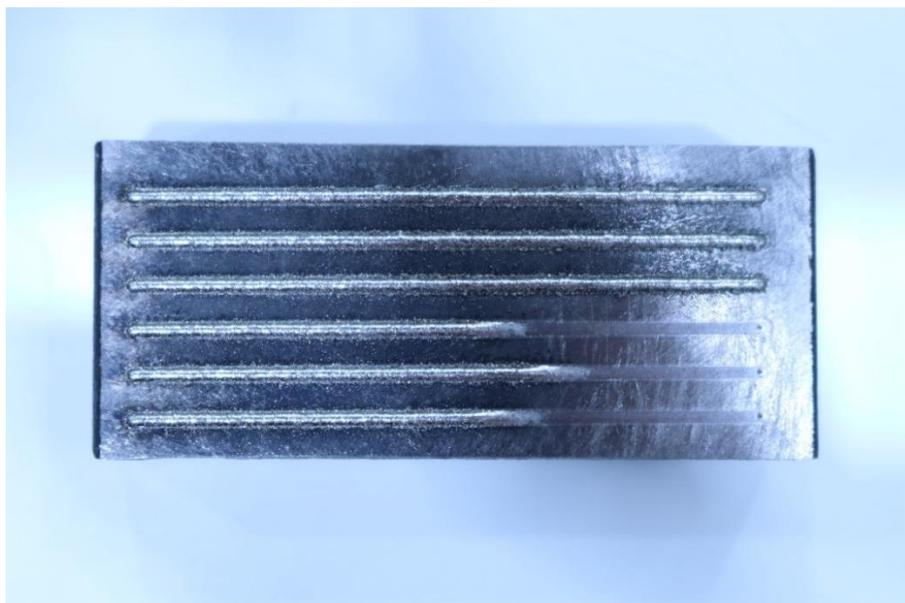


Ilustración 29. Sustrato con 3 cordones con caudal máximo y 3 con caudal mínimo.

2.6.10. Defecto de inclinación

El no disponer la superficie de incidencia perpendicular a la boquilla de aporte puede conllevar fallos en la fabricación. Es por ello por lo que se ha colocado el sustrato con una inclinación de 10°.



Ilustración 30. Colocación del sustrato para el ensayo.

Tras los ensayos realizados se han podido obtener los siguientes resultados:

Al incidir el haz de manera oblicua hay una única distancia a la que la incidencia es correcta que será en el eje central de una elipse. En el resto no se estaría aportando el calor suficiente o de la forma correcta. Es por esto mismo que la temperatura media a lo largo de todo el recorrido del baño fundido se mantiene alrededor de los 1700°C, notablemente inferior a la temperatura de referencia.

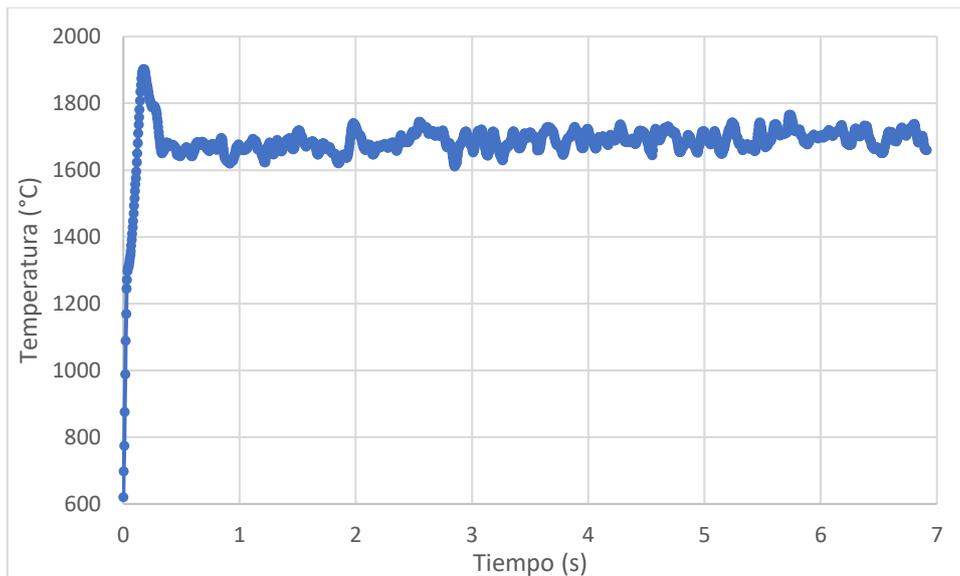


Gráfico 42. Temperatura Inclinación.

Por otro lado, el tamaño del *melt pool* se ve ligeramente reducido, haciendo que se desperdicie material al no poder fundirse y adherirse a la pieza. Por ello se tendrán peores integridades metalúrgicas y un cordón más débil.

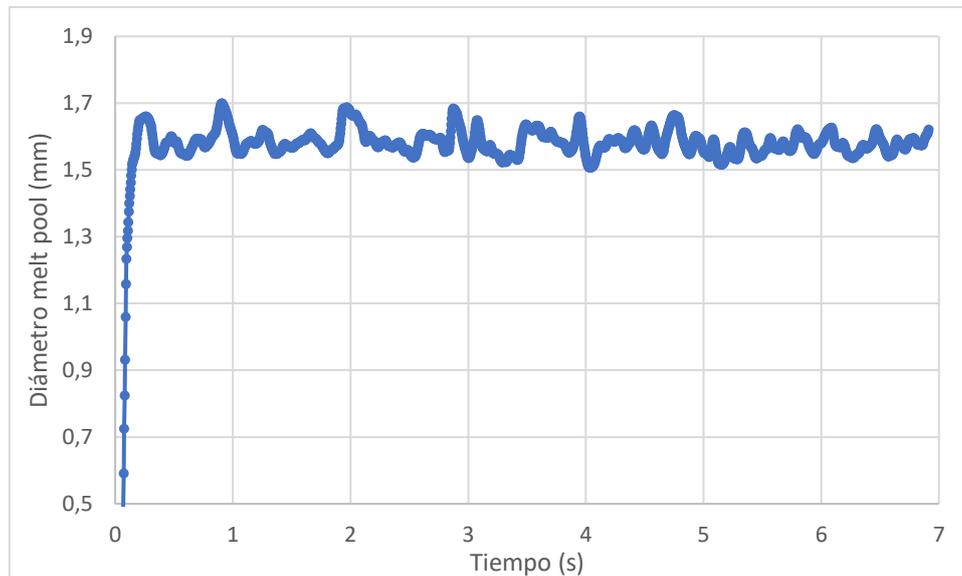


Gráfico 43. Diámetro melt pool Inclinación.

Por ende, se puede decir que si el sustrato está inclinado obtendremos una mala estructura metalúrgica y unos cordones de dudosa fiabilidad. Esto se ve claramente reflejado tanto en la temperatura como en el *melt pool* que presentan valores inferiores a los de referencia.

3. CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido una comprensión más profunda y detallada del proceso de fabricación aditiva, específicamente mediante el método de Direct Energy Deposition (DED). A lo largo del proyecto se realizaron diversas tareas que incluyeron la preparación de sustratos con defectos y la posterior aplicación de cordones de material sobre estos. La monitorización del proceso con diferentes herramientas y técnicas ha sido esencial para la obtención de datos relevantes que han permitido evaluar la relación entre los defectos introducidos y la calidad del aporte metálico.

Uno de los hallazgos más significativos es la correlación directa entre los defectos en los sustratos y las señales obtenidas durante el proceso de DED. Los resultados mostraron que los defectos impactan notablemente en la calidad del aporte, manifestándose en variaciones de la rugosidad superficial y la integridad metalúrgica. Los datos obtenidos mediante la monitorización con pirómetros y la cámara coaxial proporcionaron información valiosa sobre las fluctuaciones térmicas y su impacto en el proceso de solidificación del material.

Se observó que la incidencia del láser y la geometría del haz juegan un papel crucial en la formación de porosidades y en la calidad del cordón aplicado. La variación de la forma del haz láser, desde un punto circular hasta uno elíptico, debido a los ángulos de incidencia, afecta tanto la profundidad como el ancho del baño de fusión, influenciando directamente la estructura final del material depositado.

Asimismo, el análisis de alternativas mostró que la combinación de diversas herramientas de monitorización es esencial para obtener una imagen completa del proceso y sus variables. La integración de sistemas de alta precisión para la detección y corrección de defectos antes de que estos afecten significativamente la estructura final de la pieza es una recomendación clave para futuros trabajos y aplicaciones industriales.

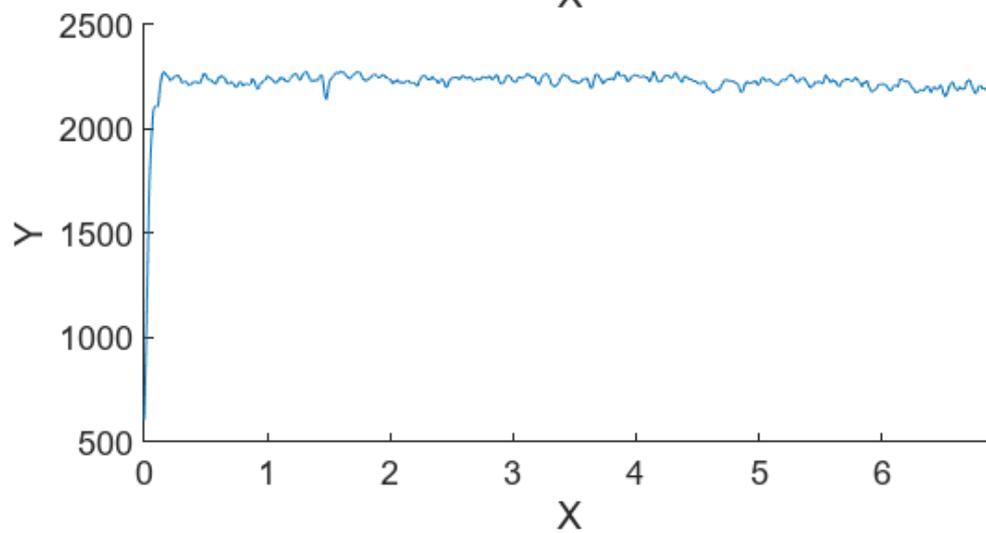
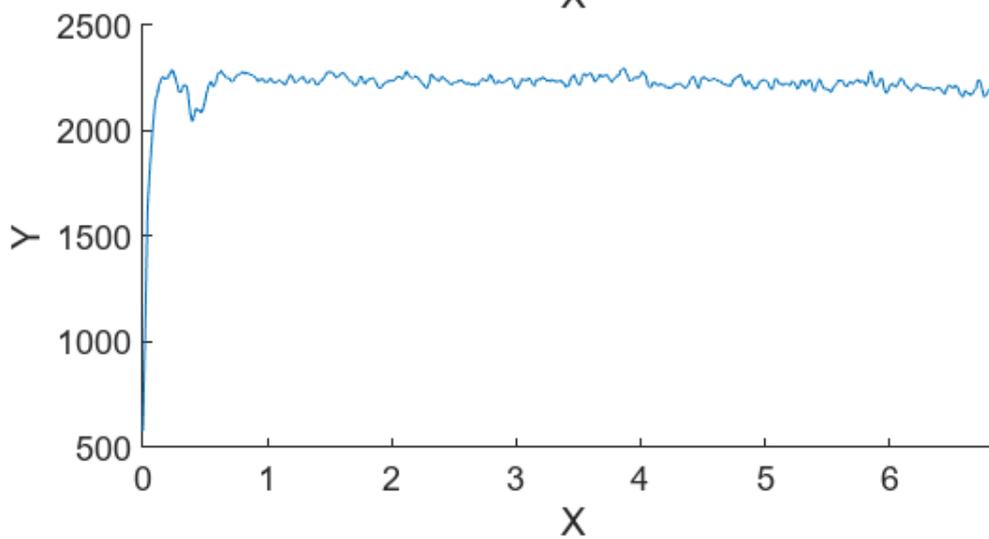
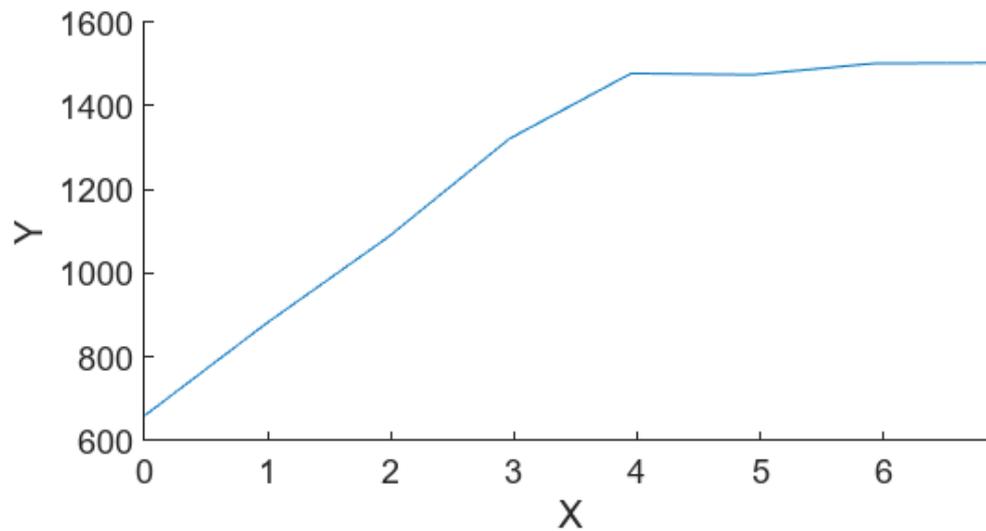
En resumen, este estudio no solo ha permitido identificar y cuantificar los efectos de los defectos en el proceso de DED, sino que también ha demostrado la importancia de una monitorización precisa y multifacética. Estos hallazgos ofrecen una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos, encaminados a optimizar el proceso de fabricación aditiva y mejorar la calidad y fiabilidad de los componentes producidos mediante este método.

4. BIBLIOGRAFÍA

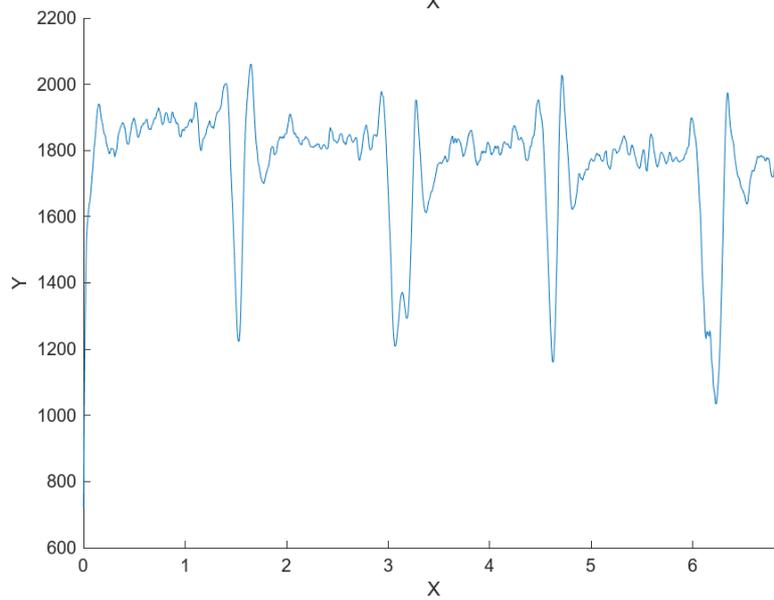
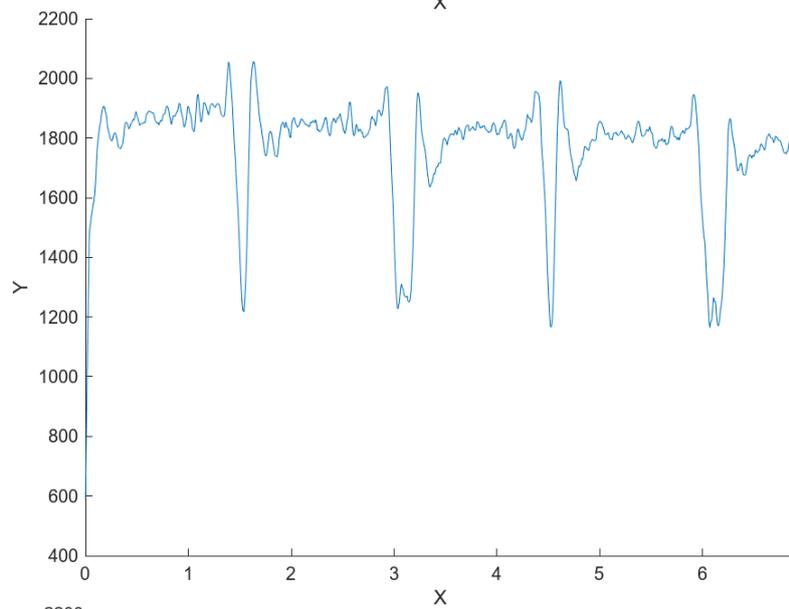
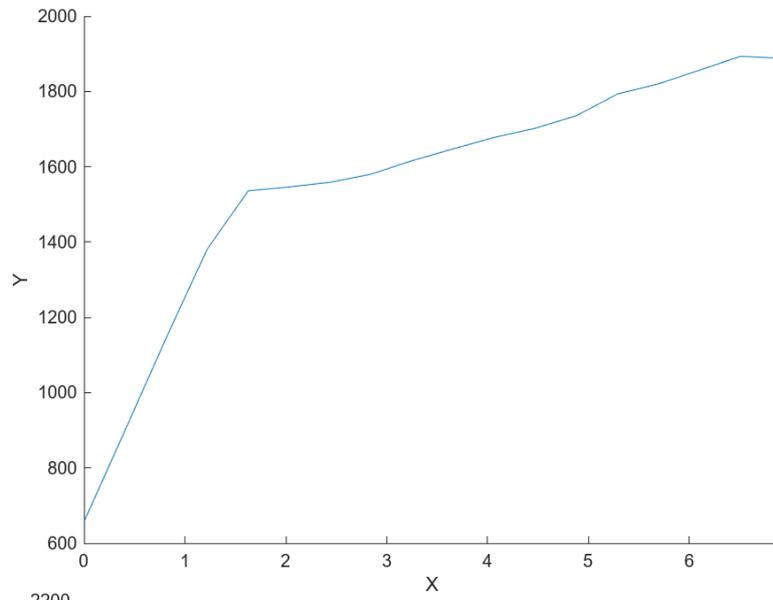
- [1] Apuntes fabricación aditiva metálica Escuela de Ingenieros Bilbao.
- [2] [Edimar-Fabricación aditiva](#)
- [3] [Comienzos de la fabricación aditiva.](#)
- [4] [Puntos clave de la fabricación aditiva metálica](#)
- [5] [Tekniker-Laser Cladding](#)
- [6] [What is laser cladding technology?](#)
- [7] Libro fabricación aditiva – Aitzol Lamikiz Mentxaka, Ana María Camacho López, Santiago Ferrándiz Bou, Moises Batista Ponce.
- [8] [Problemas de la fabricación aditiva](#)
- [9] [Impresión 3D-Fabricación aditiva](#)
- [10] [Omega-Pirómetro](#)

5. ANEXO I: Temperatura del melt pool.

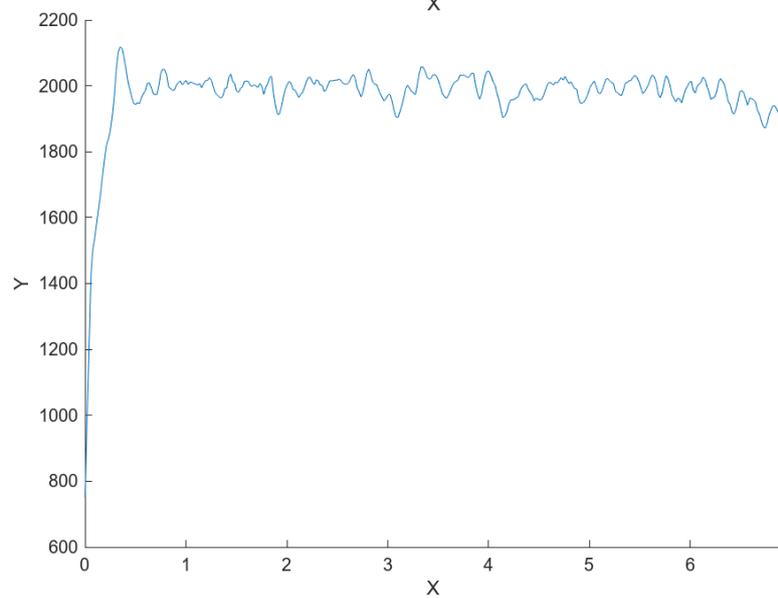
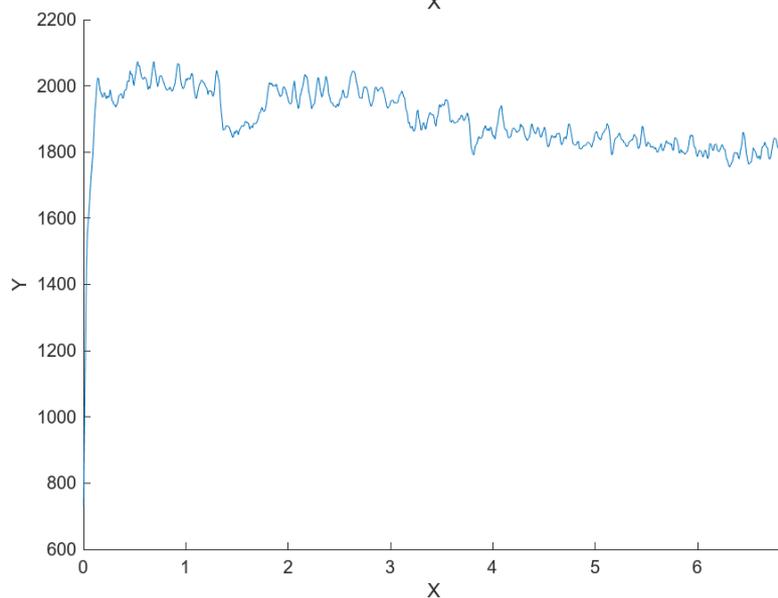
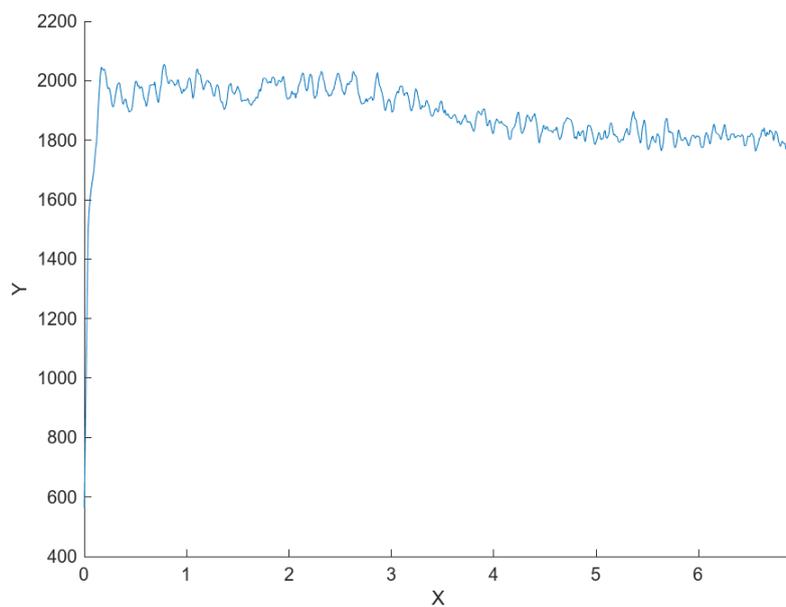
5.1. Referencia



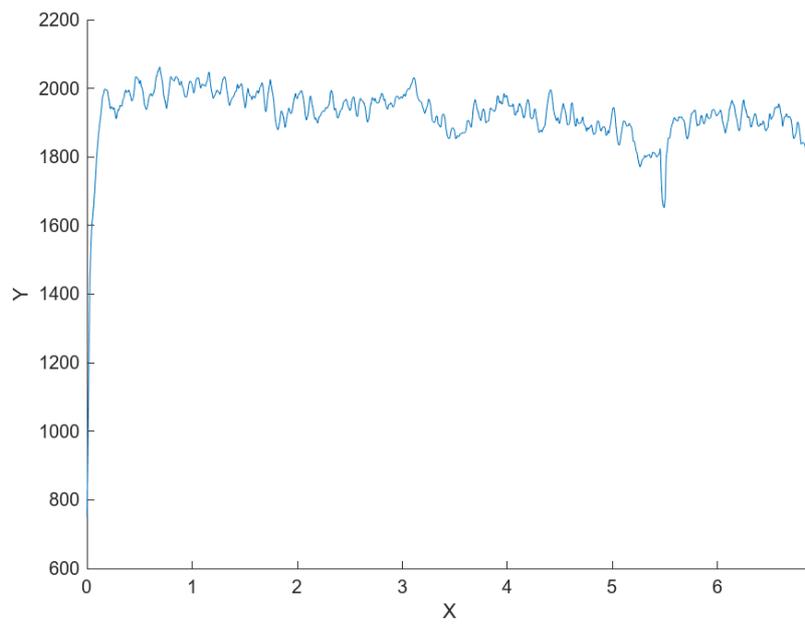
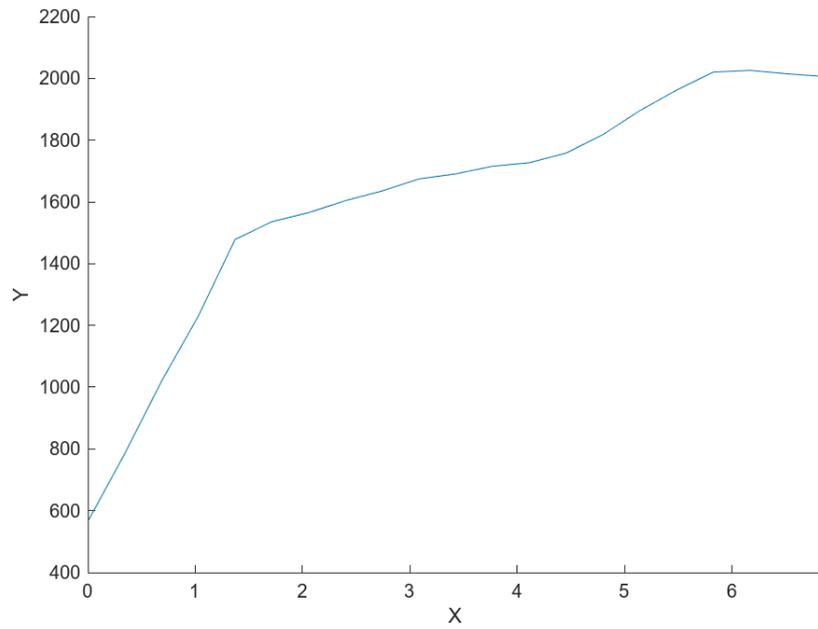
5.2. Defecto ranuras



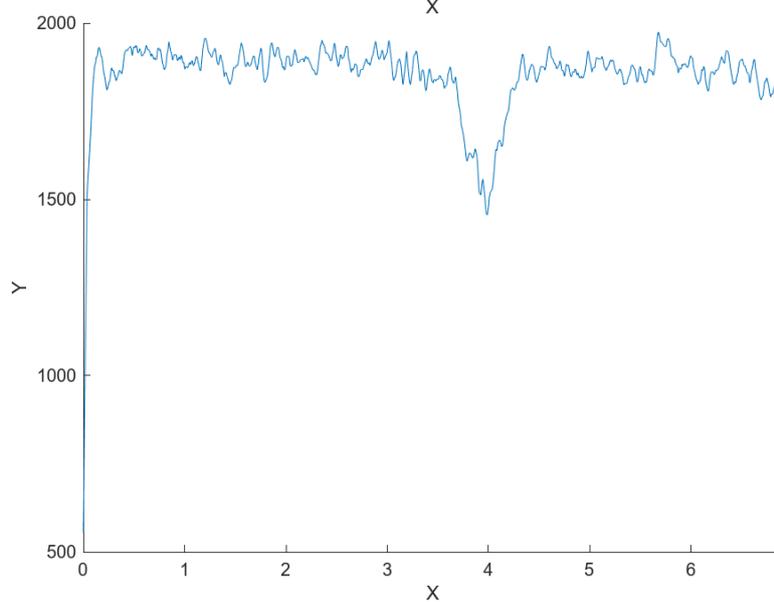
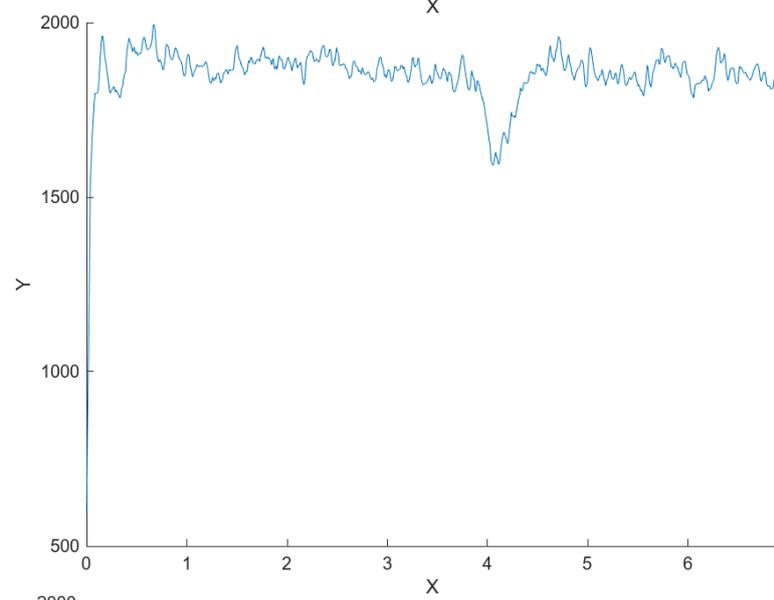
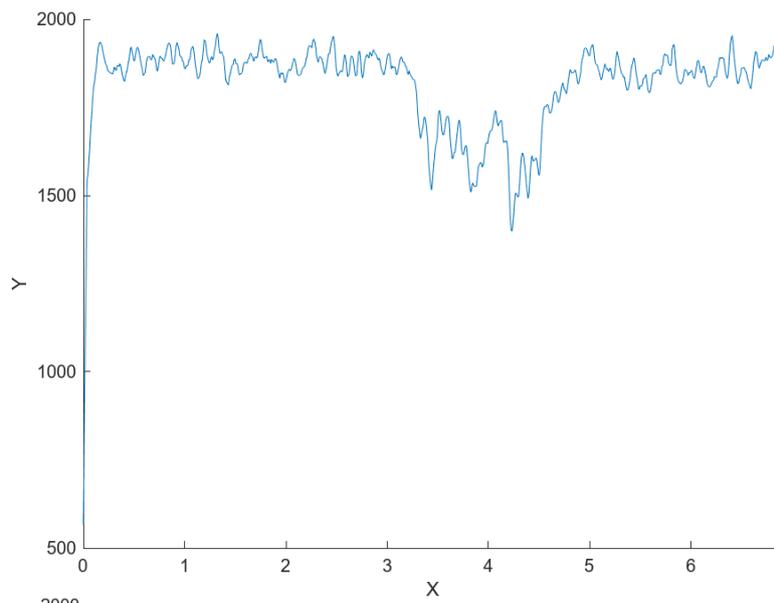
5.3. Defecto rugosidad



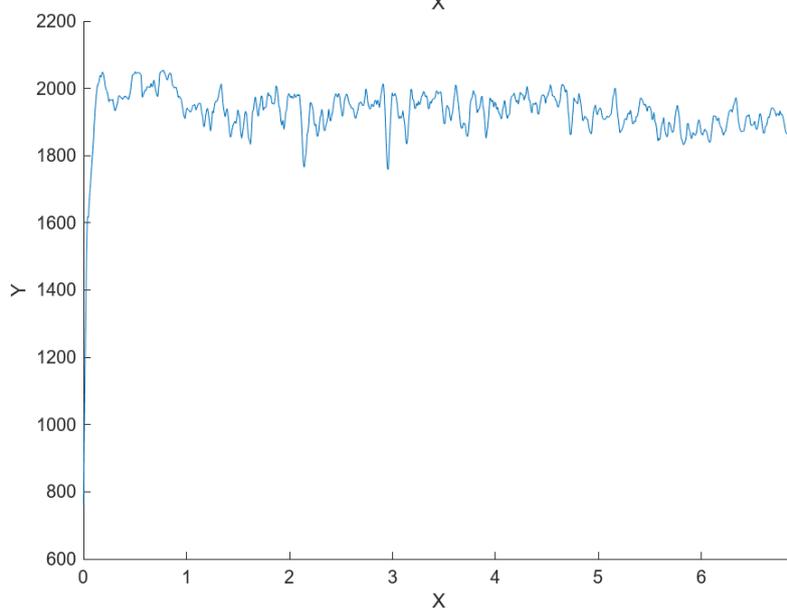
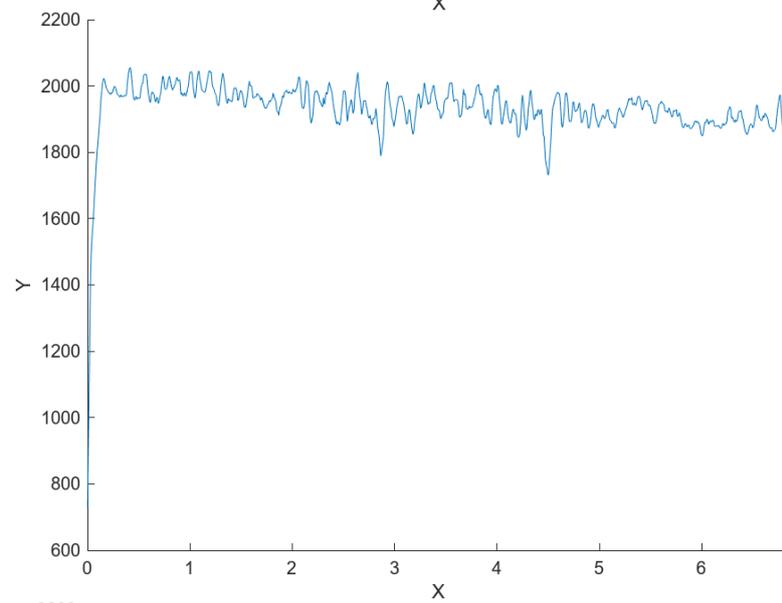
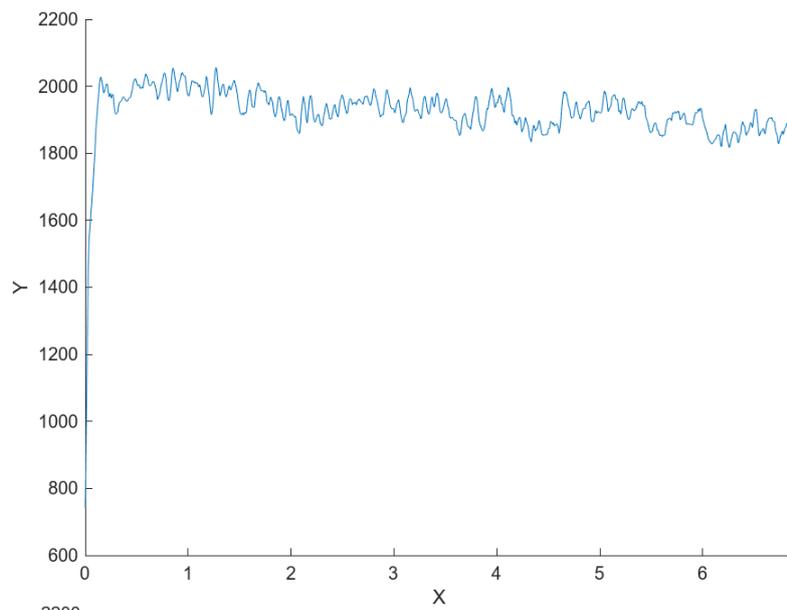
5.4. Defecto de viruta



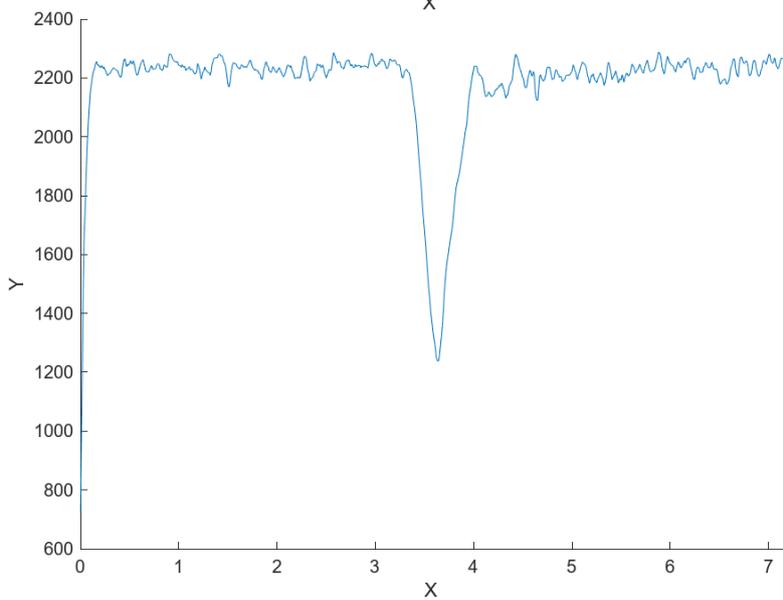
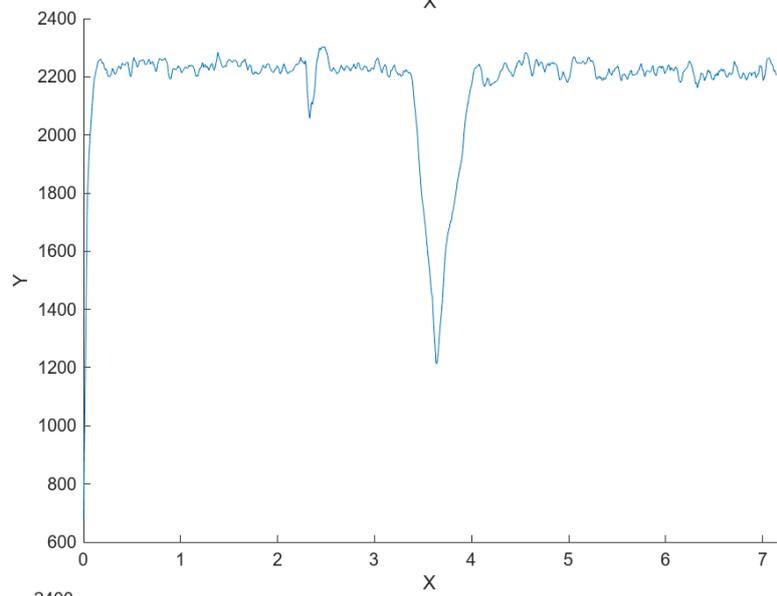
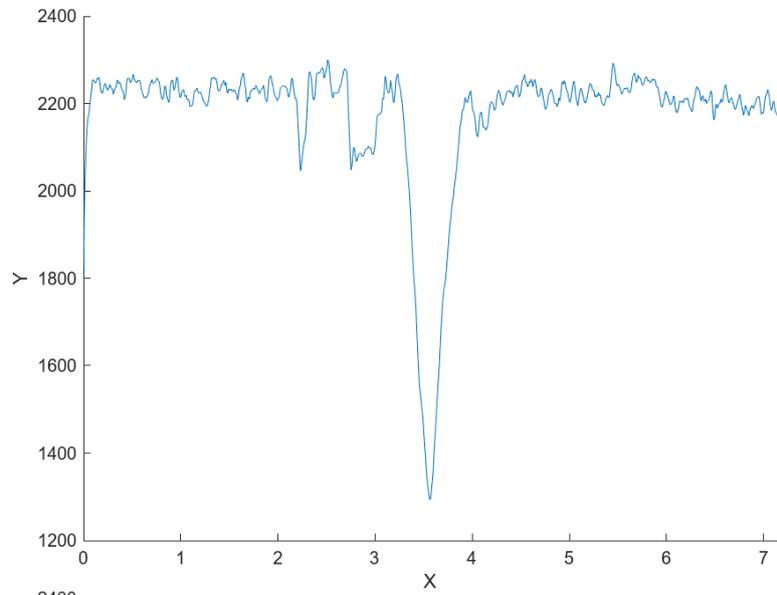
5.5. Defecto de polvo metálico sobre sustrato

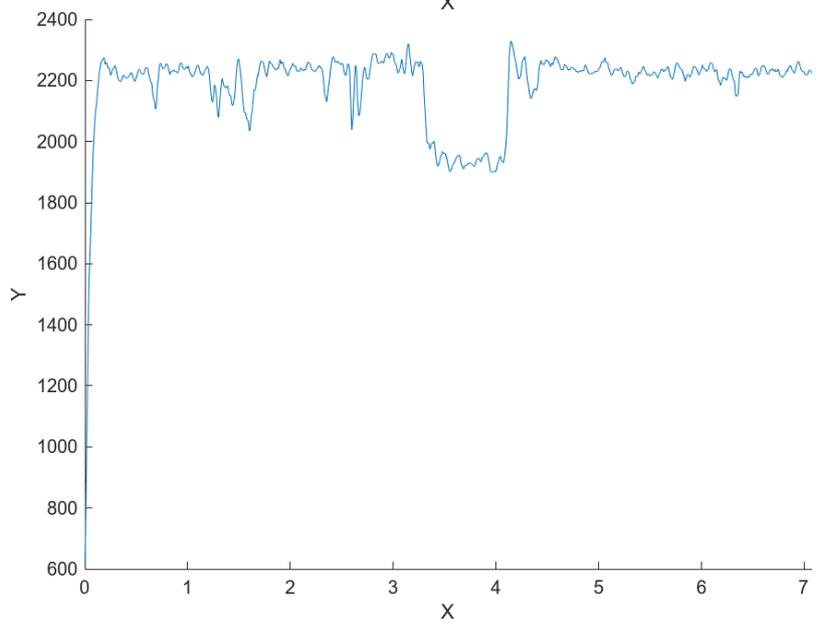
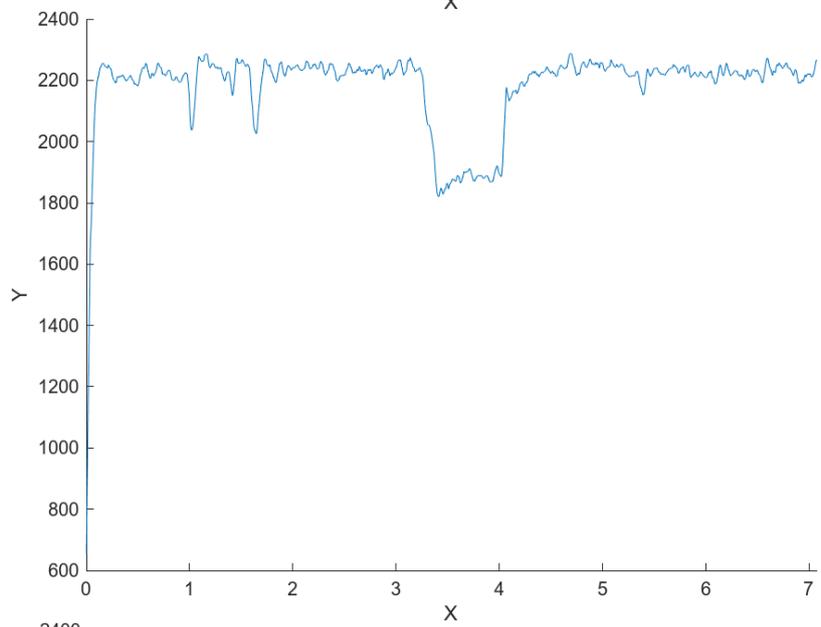
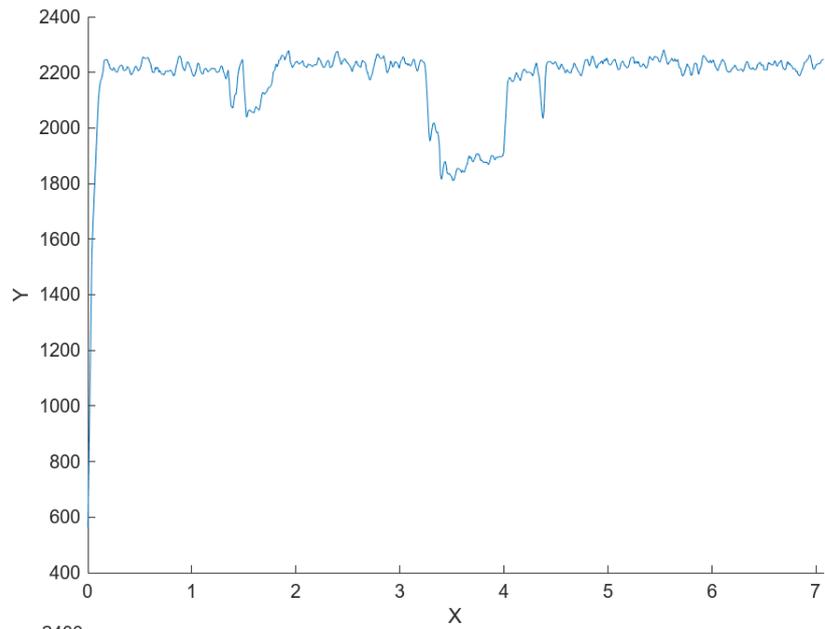


5.6. Defecto de aceite

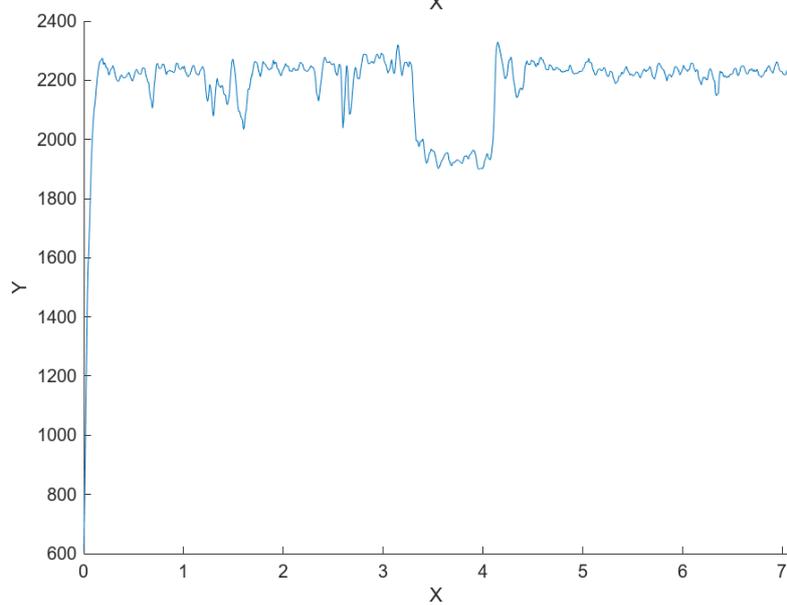
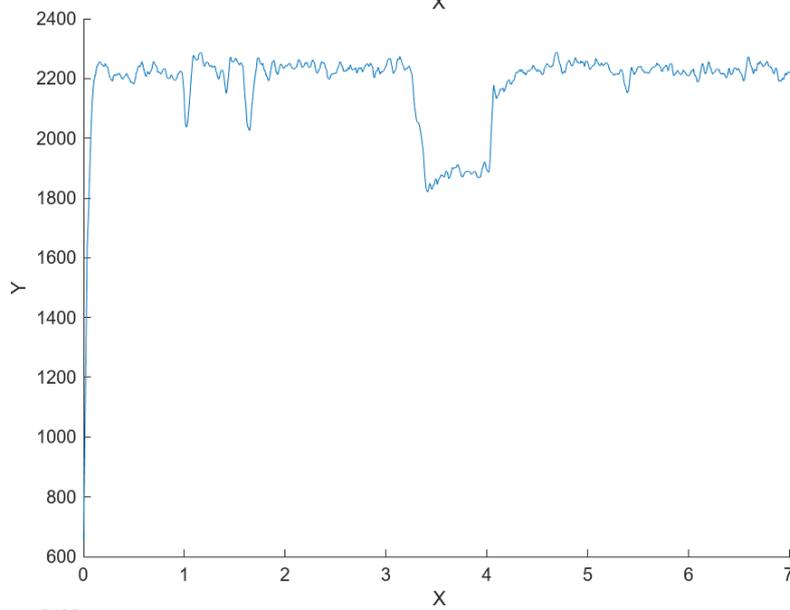
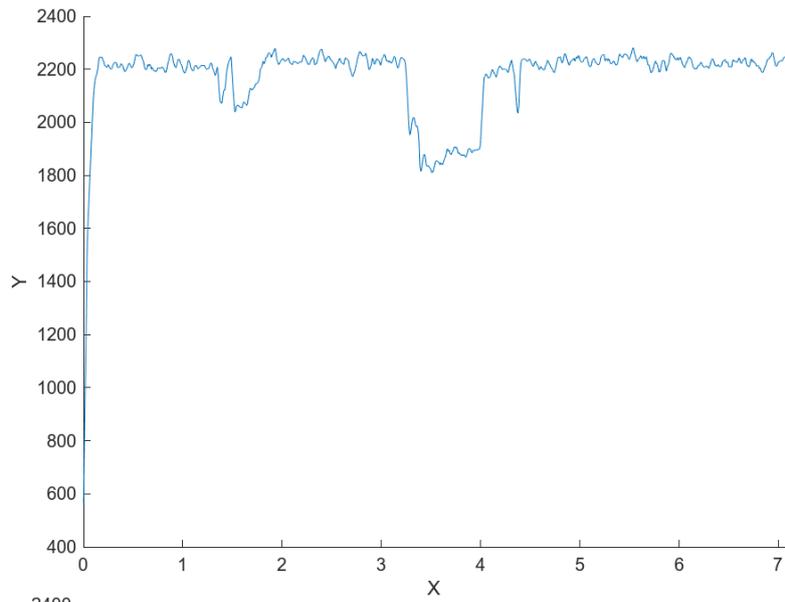


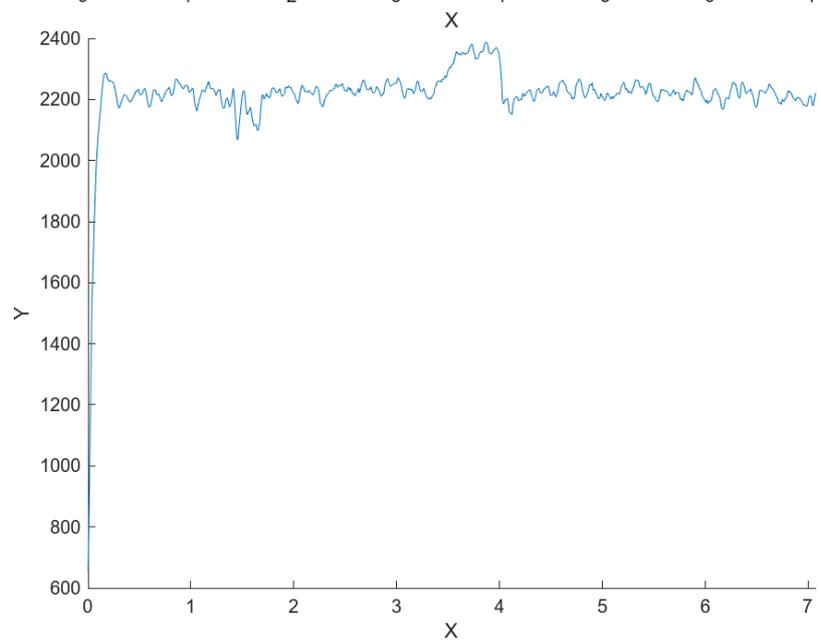
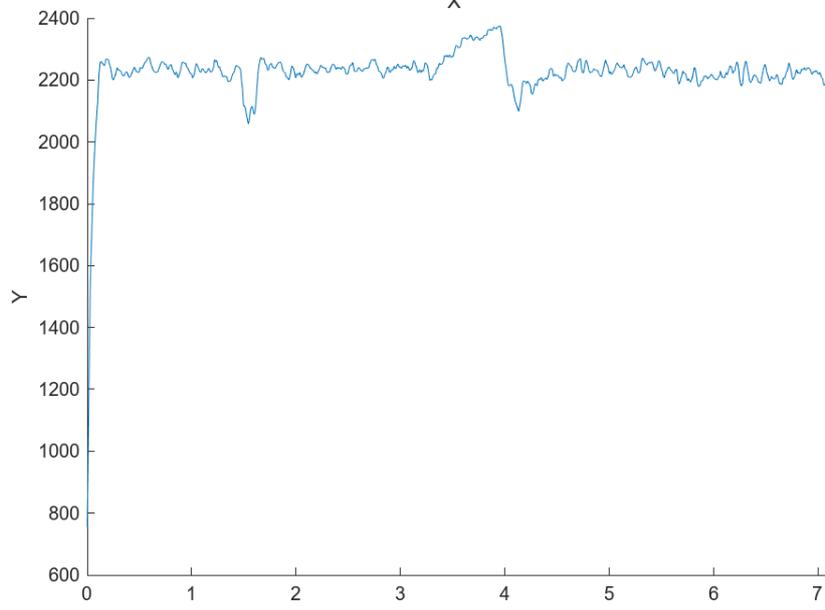
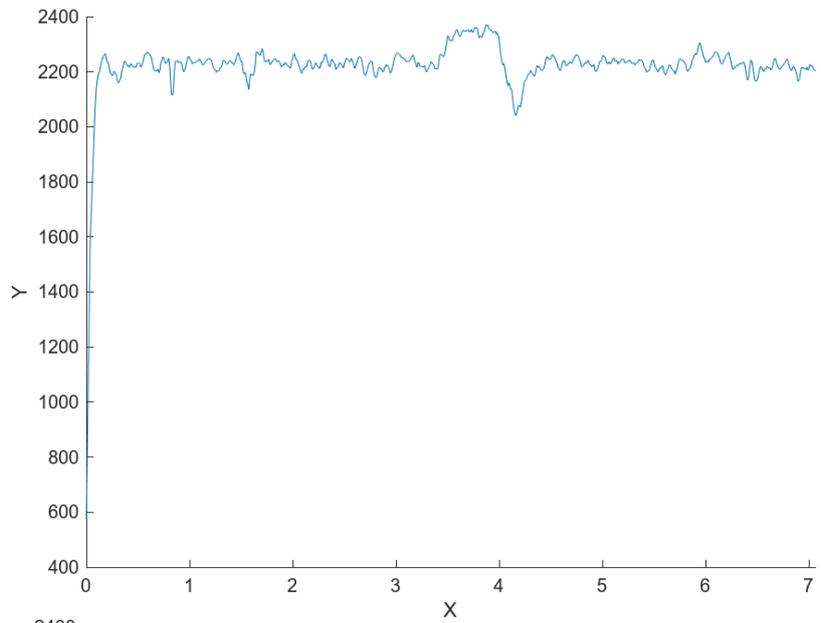
5.7. Defecto de altura



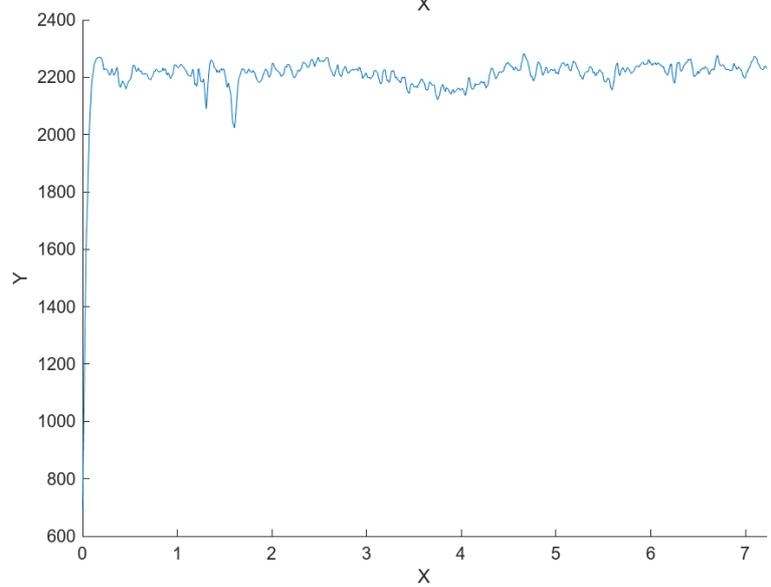
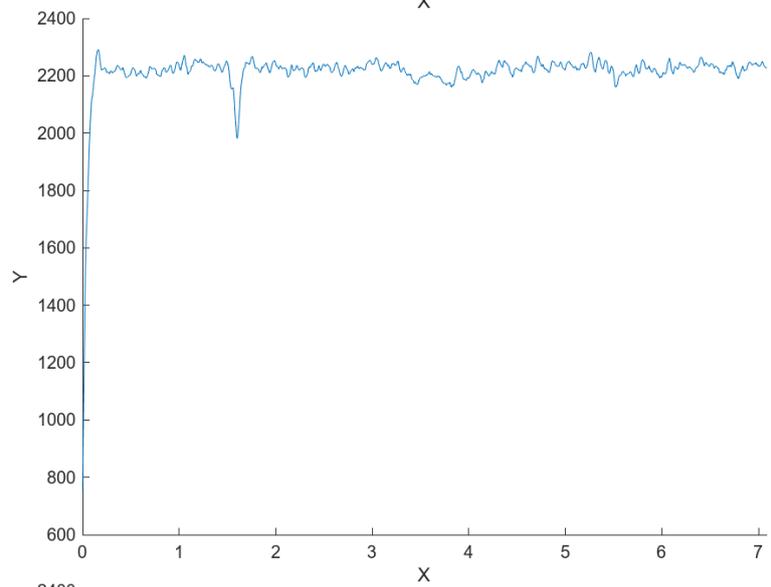
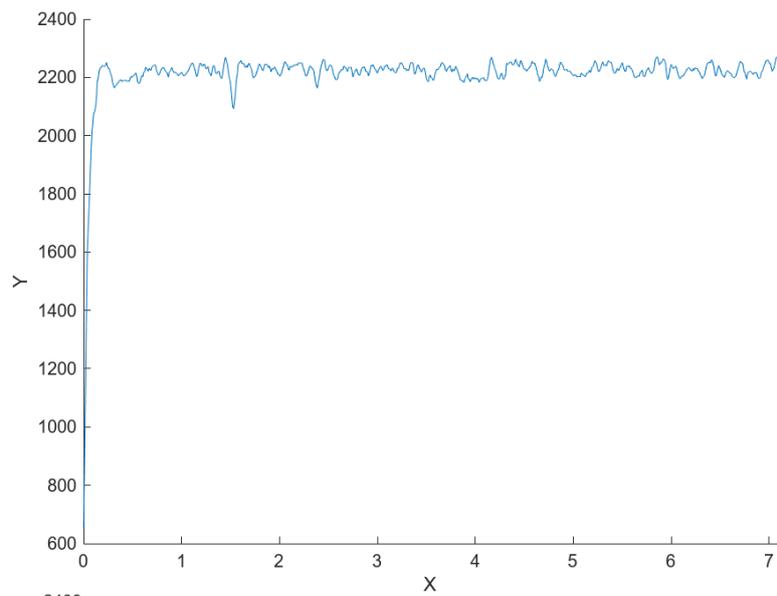


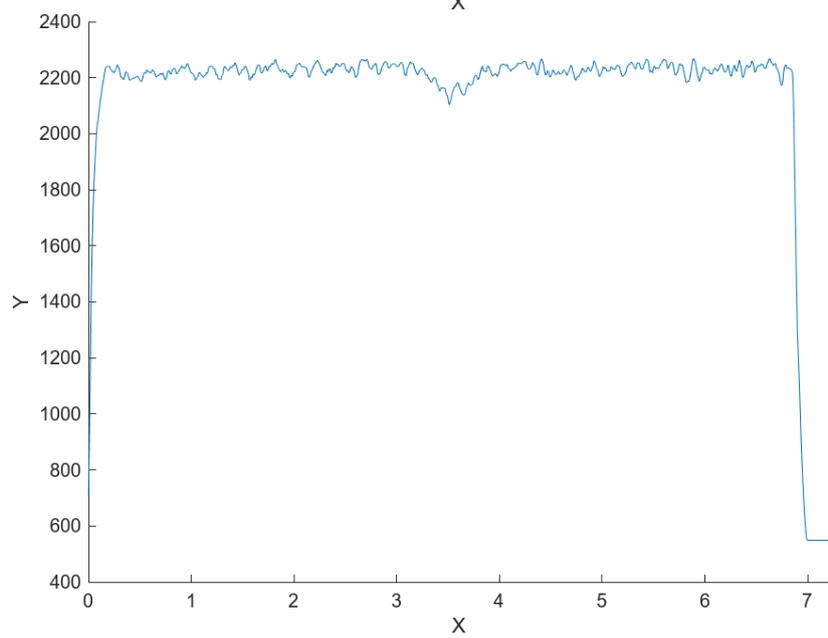
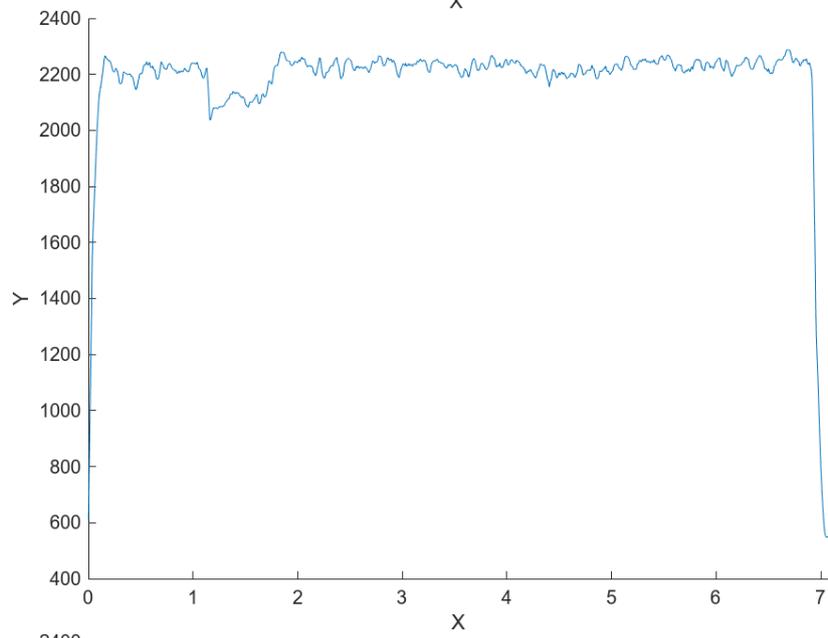
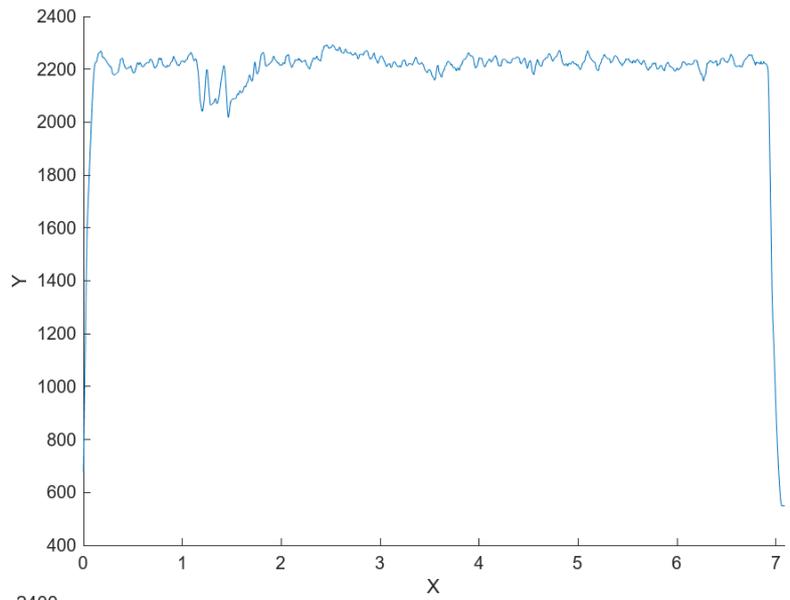
5.8. Defecto de variación de potencia



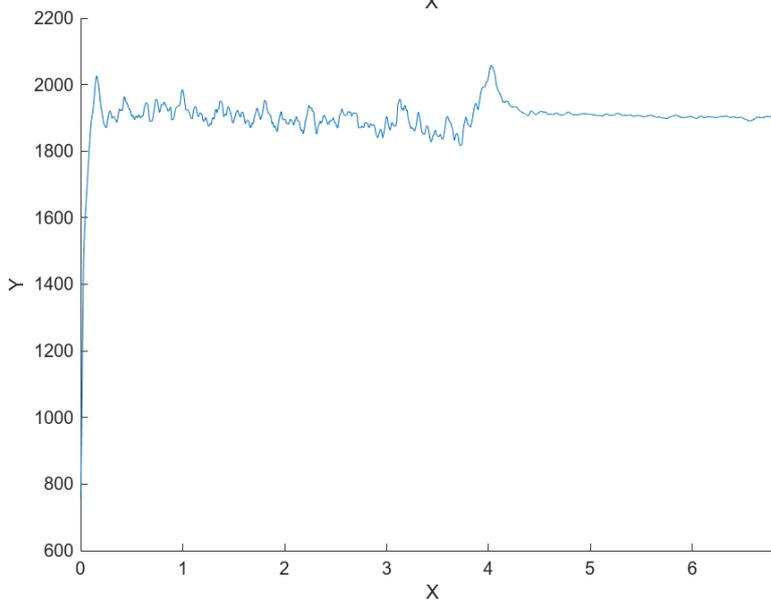
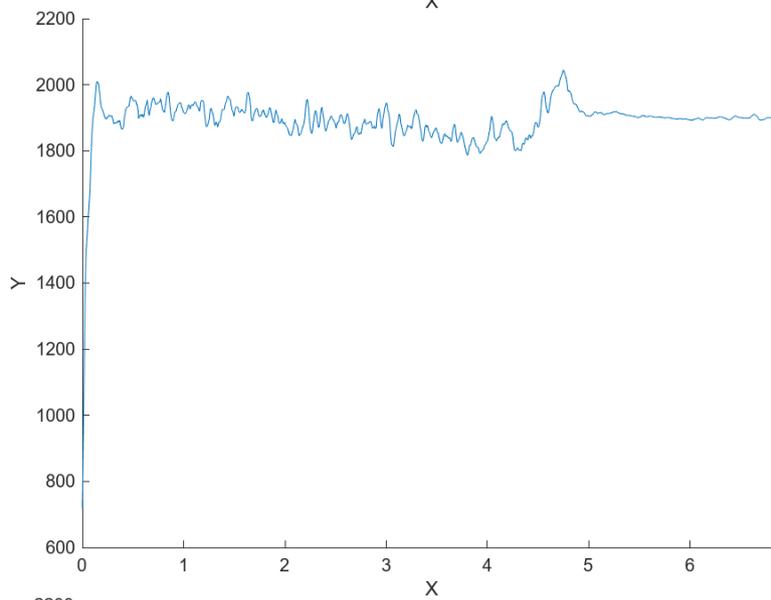
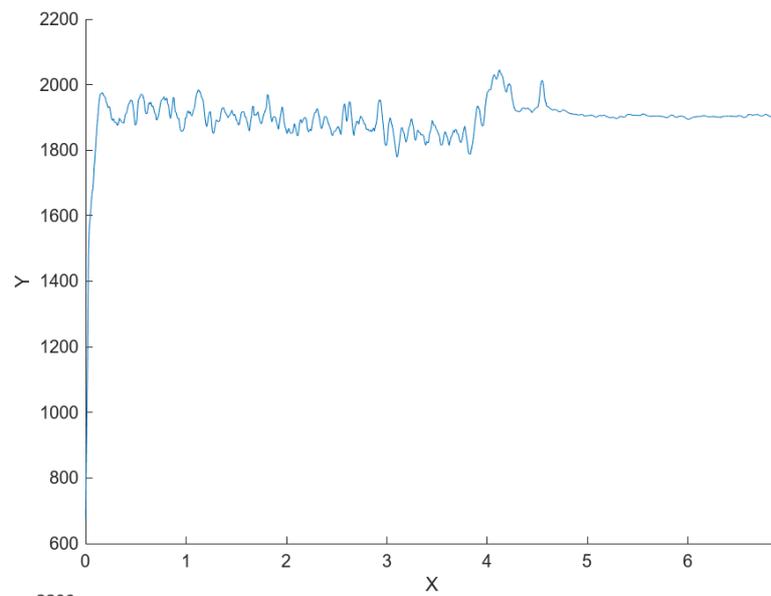


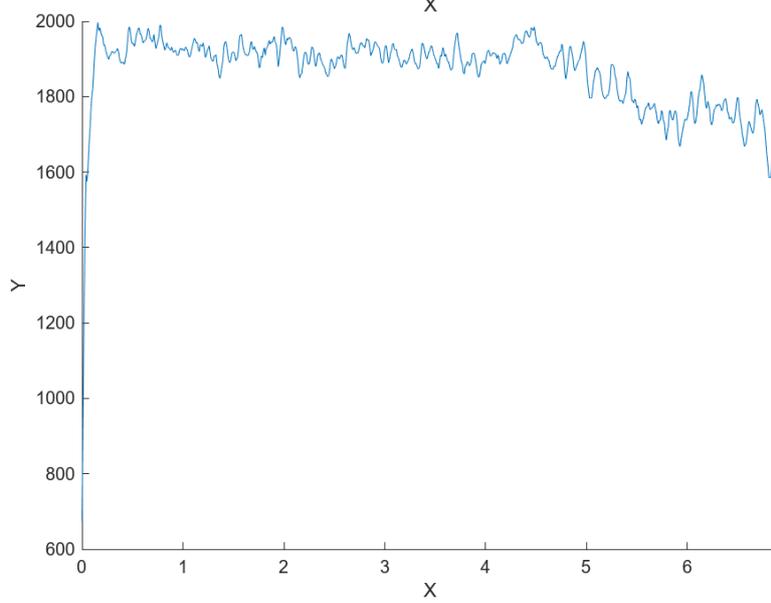
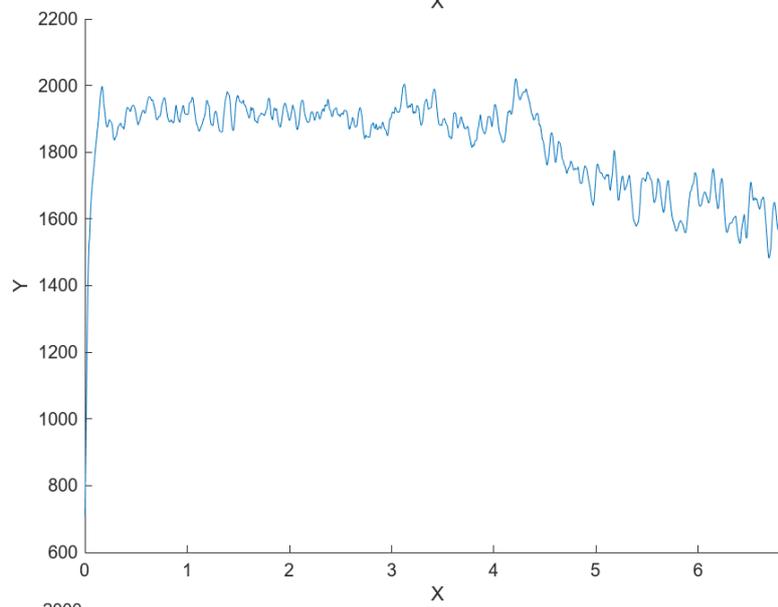
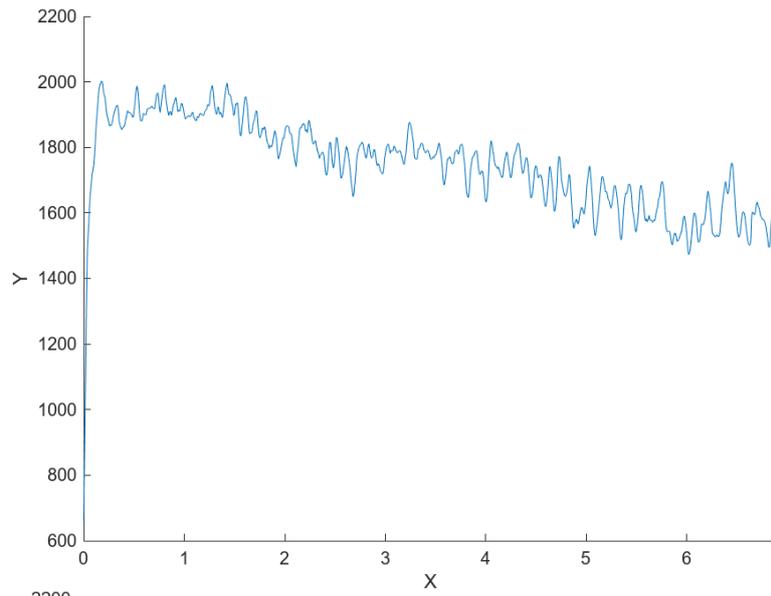
5.9. Defecto de variación de velocidad de avance



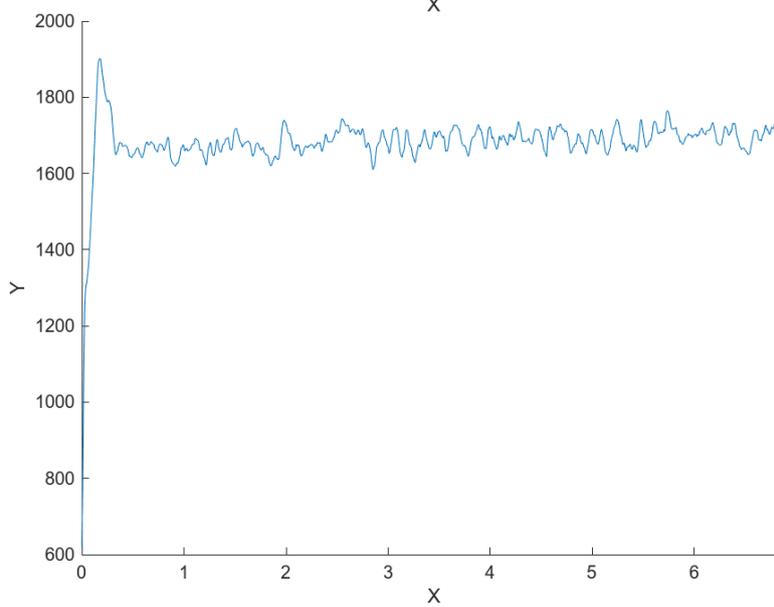
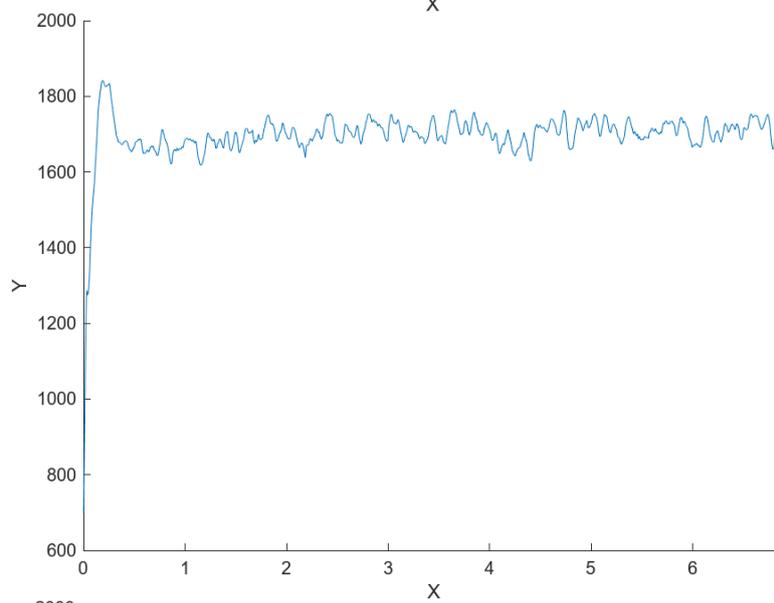
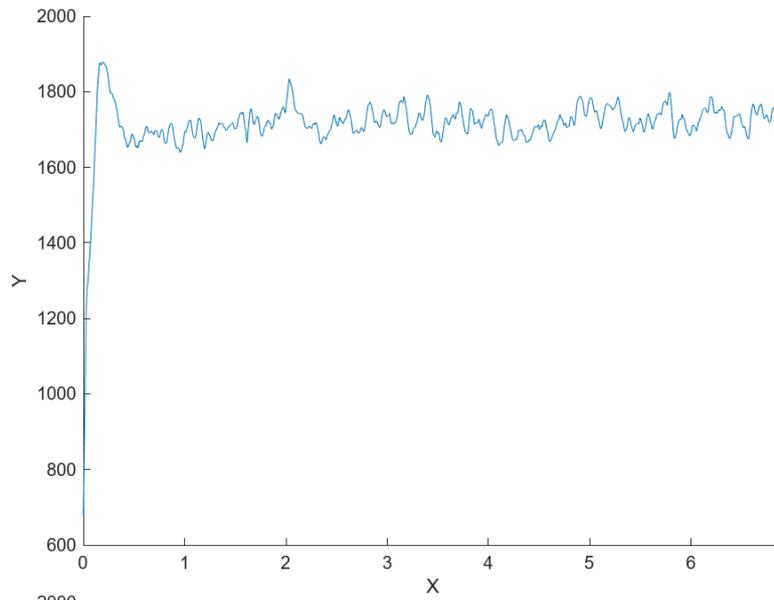


5.10. Defecto de variación de caudal



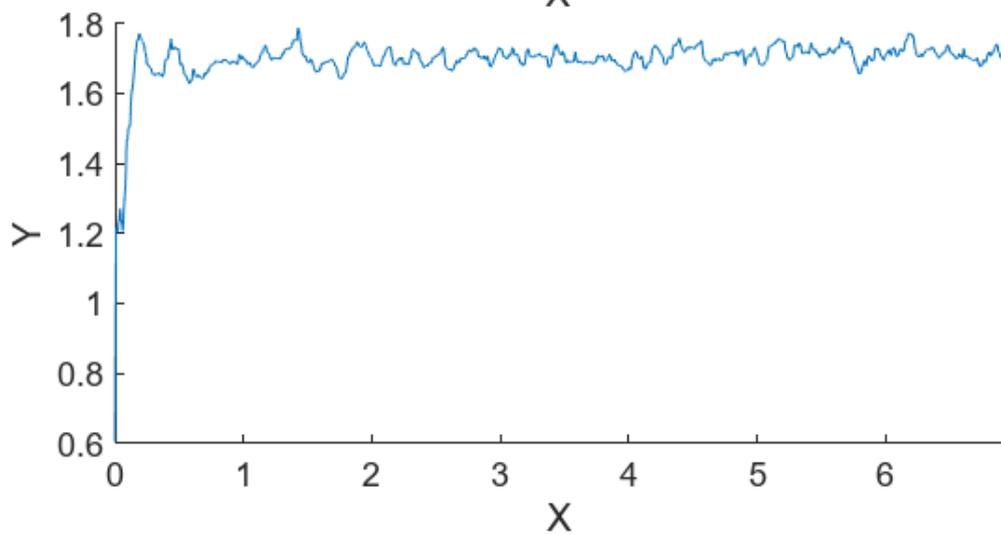
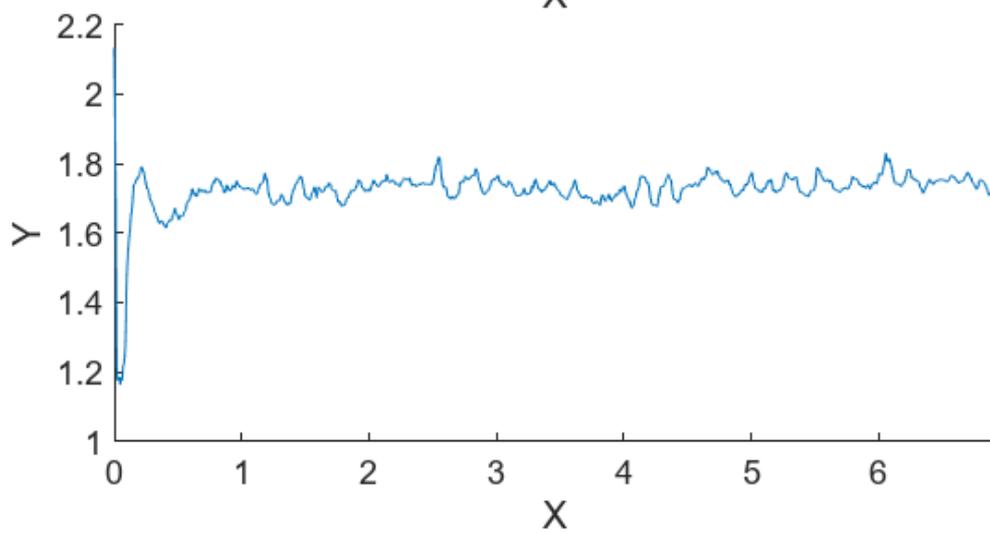
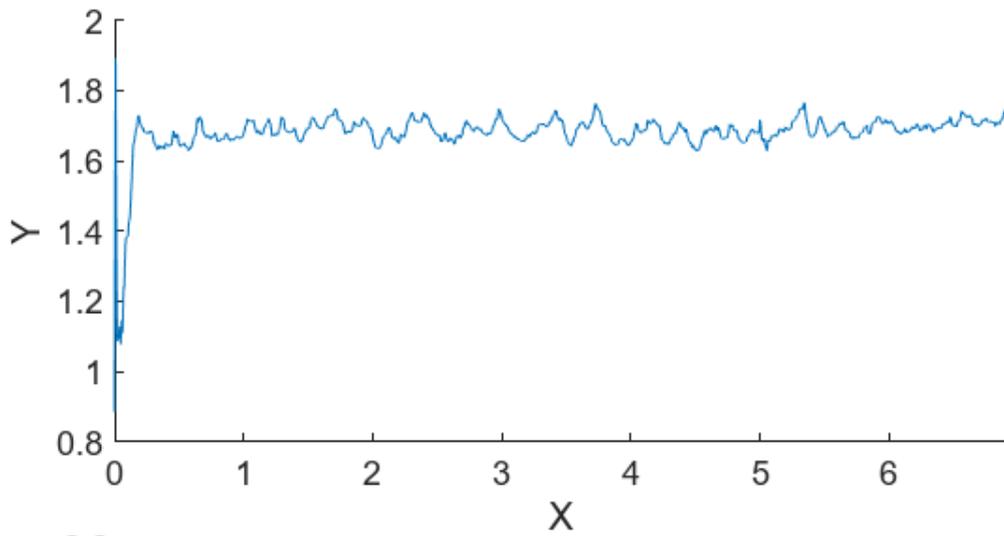


5.11. Defecto de inclinación

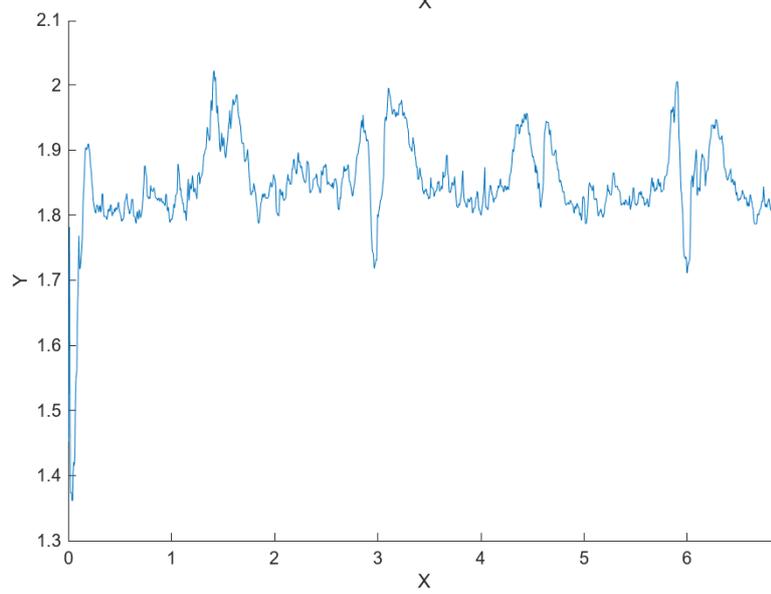
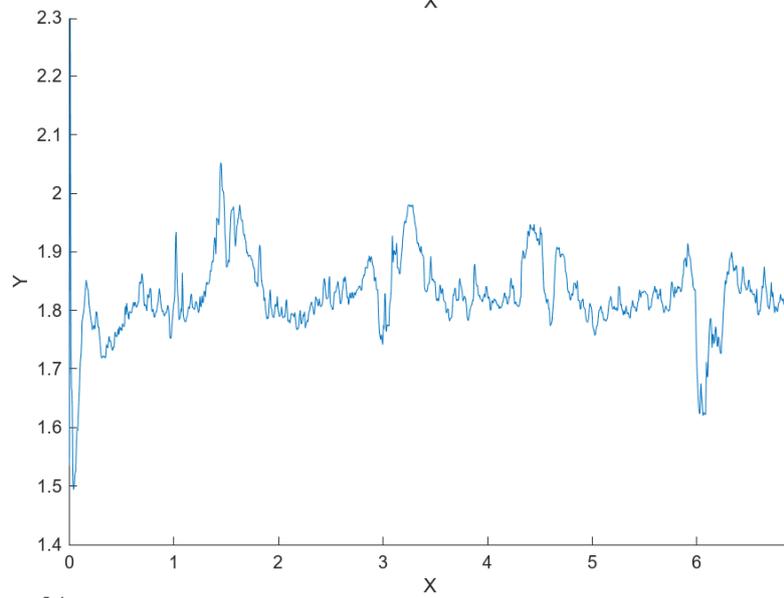
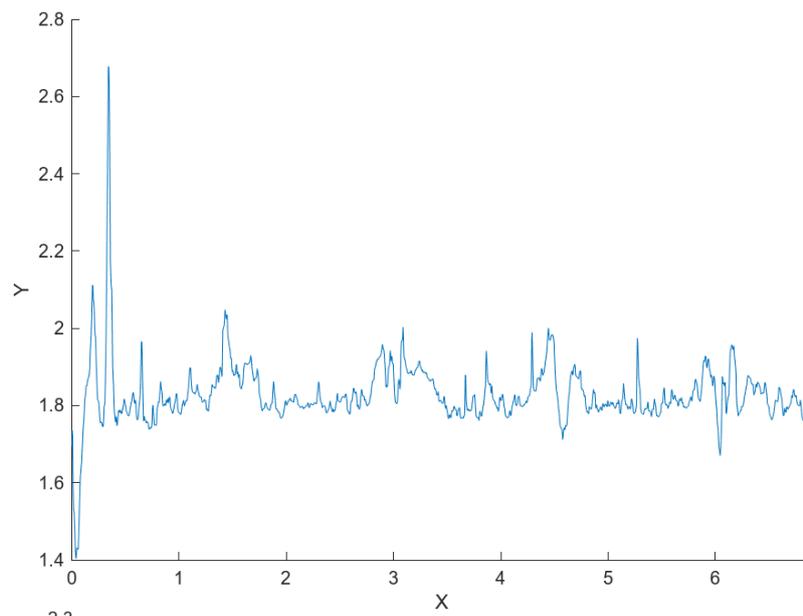


6. ANEXO II: Anchura del melt pool.

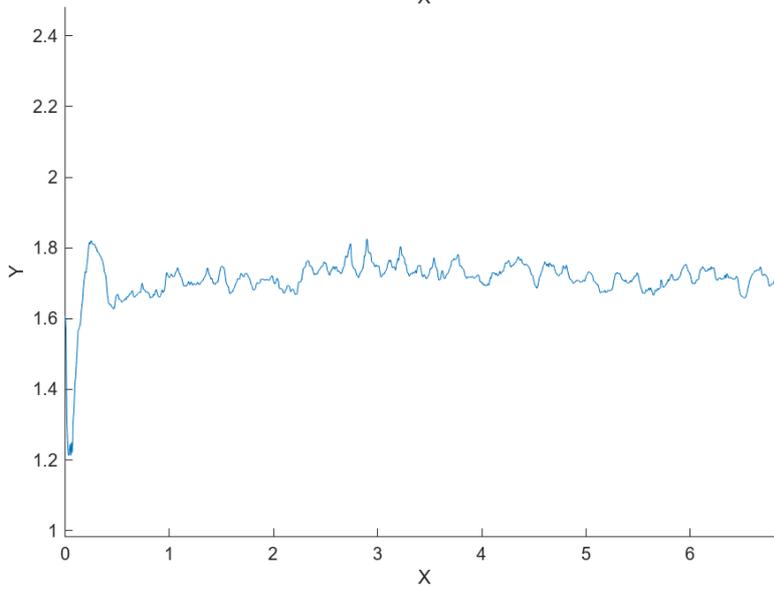
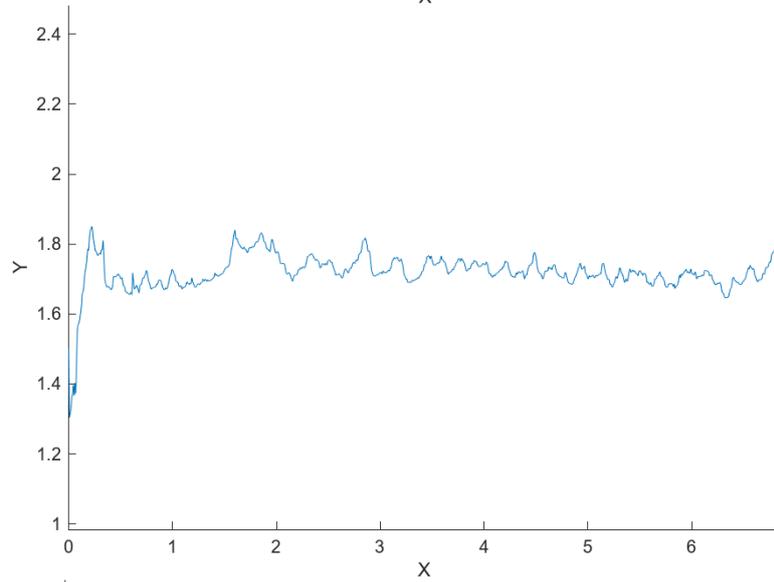
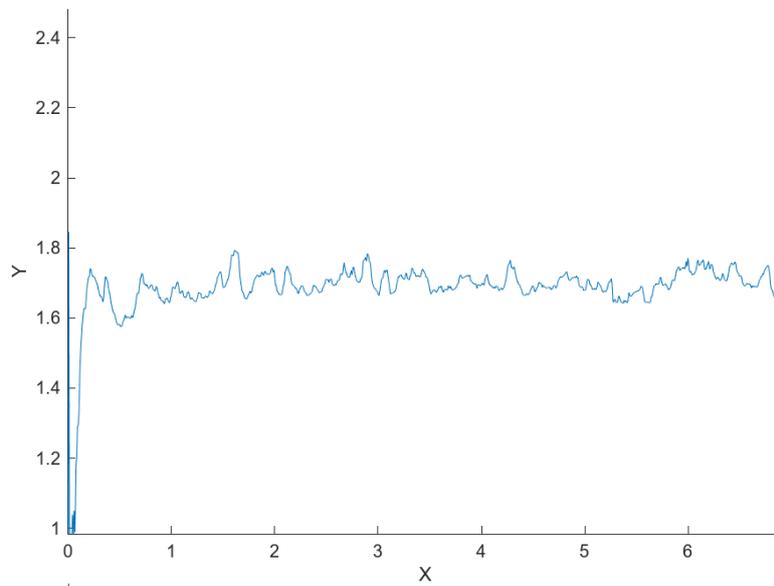
6.1. Referencia



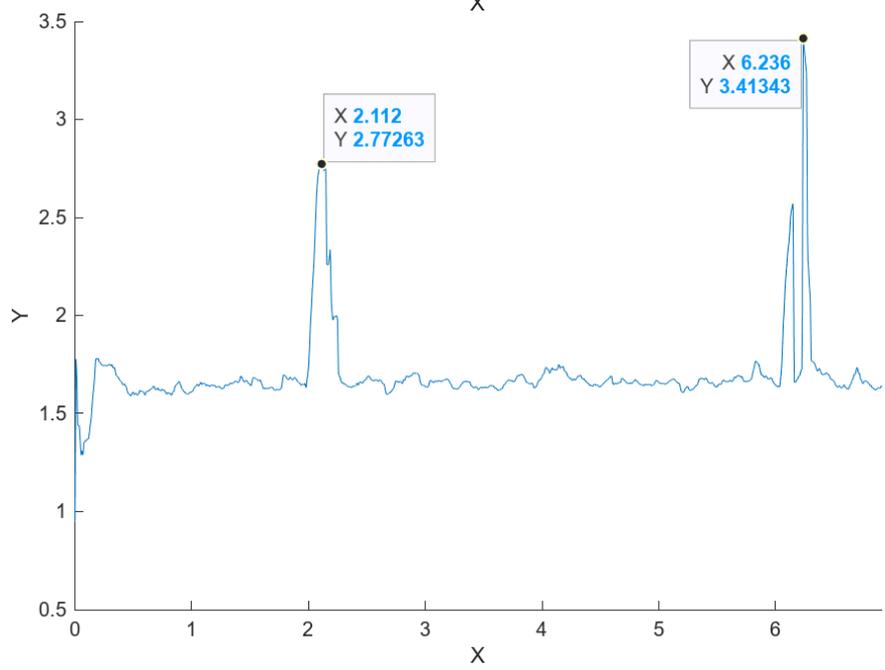
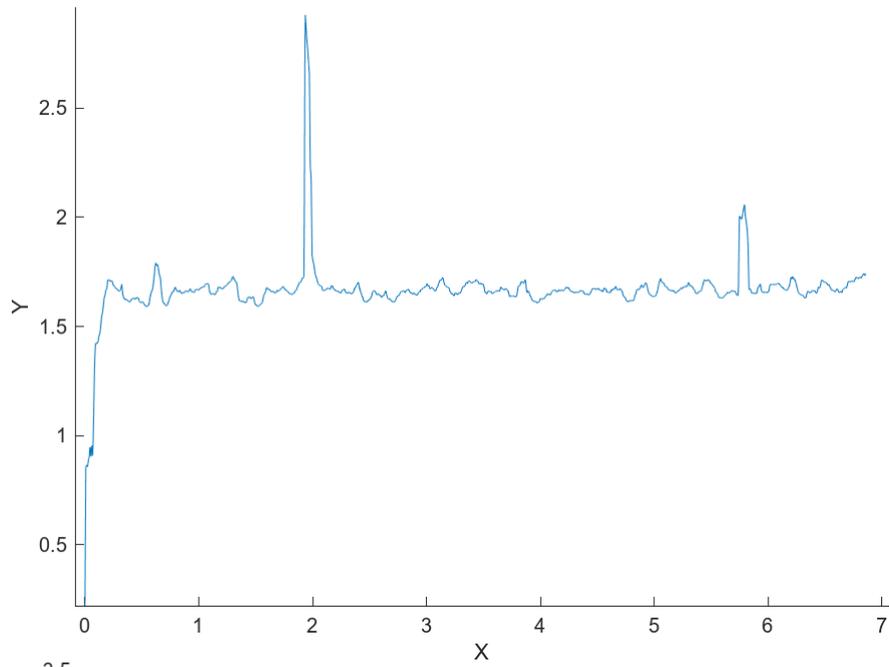
6.2. Defecto ranuras



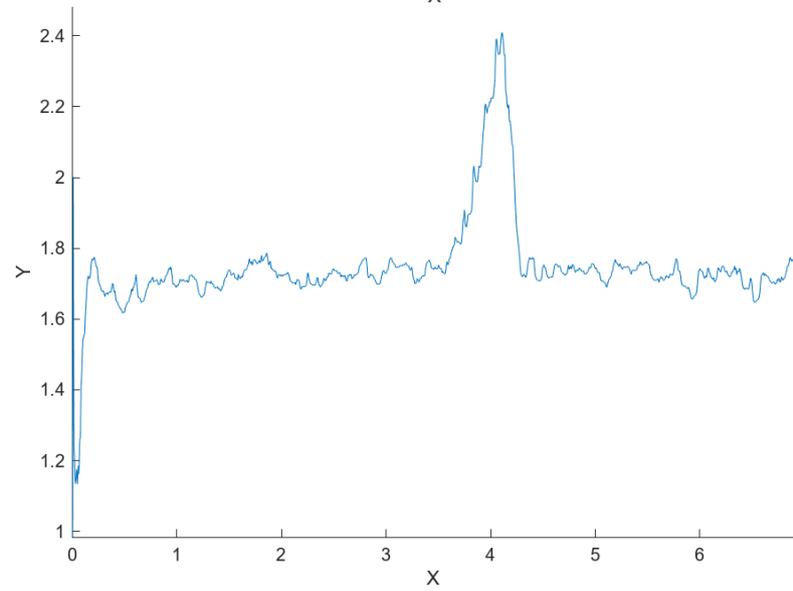
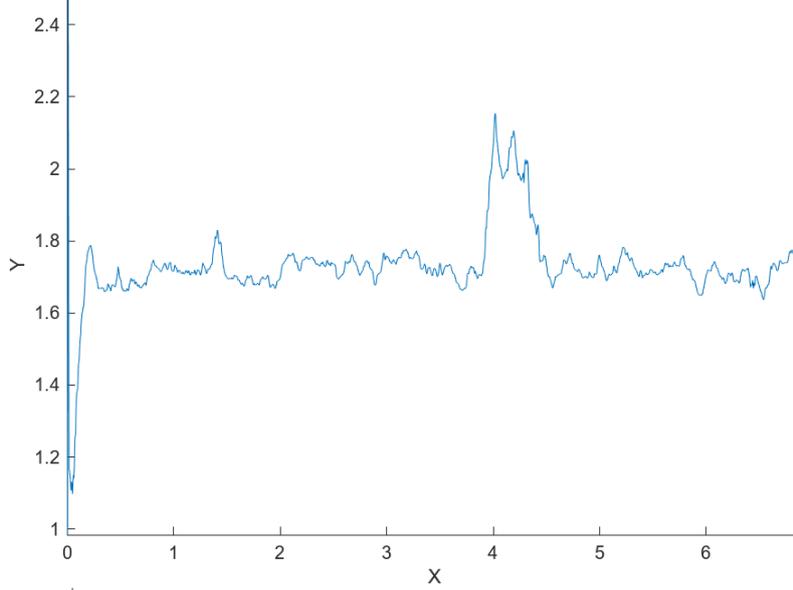
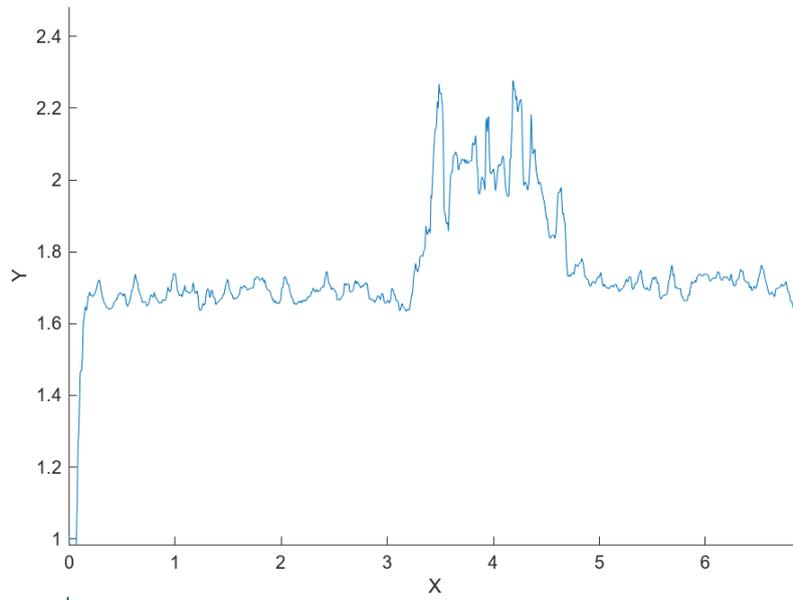
6.3. Defecto rugosidad



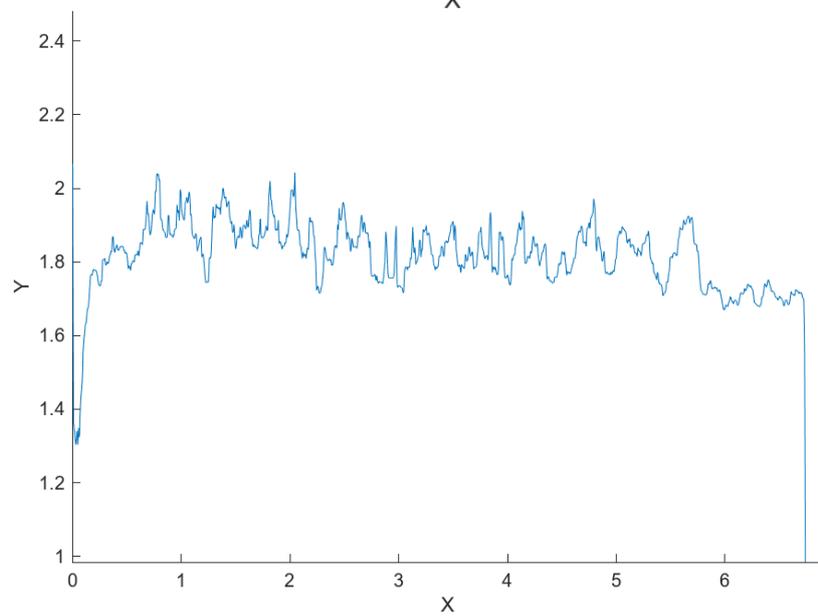
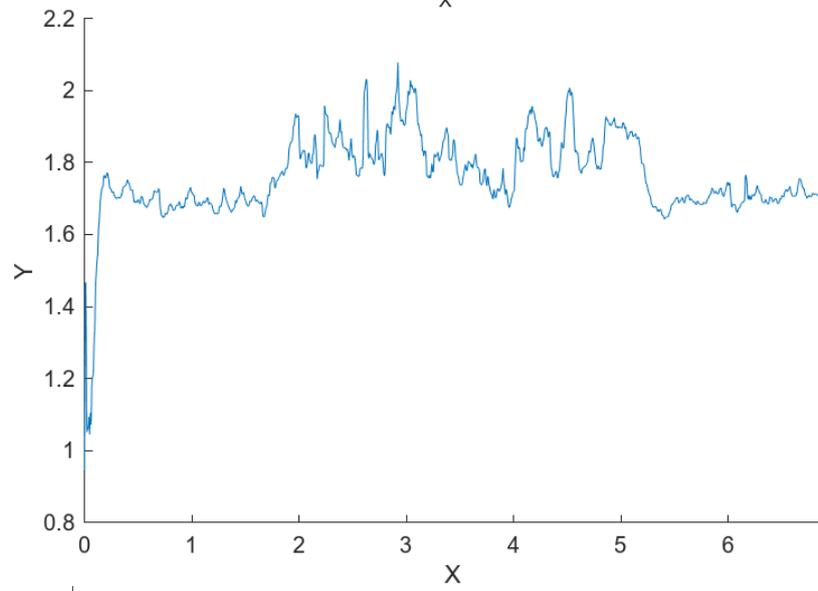
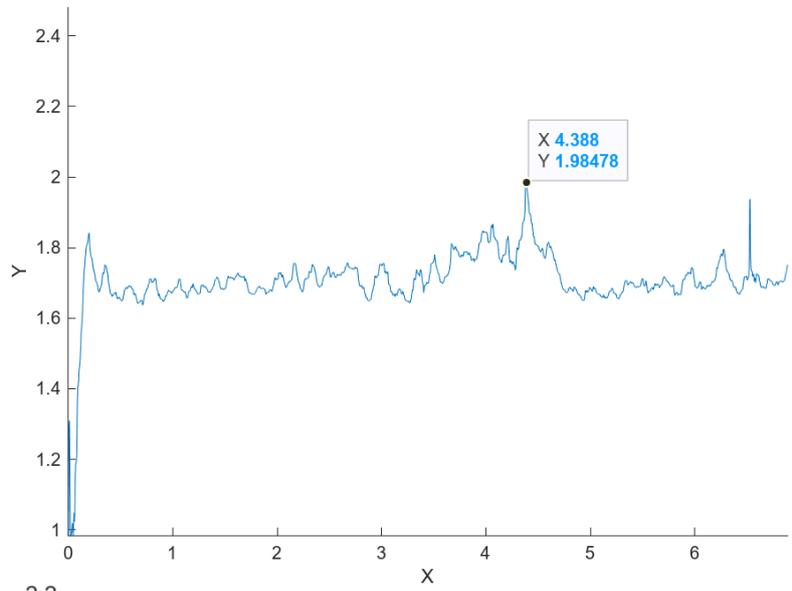
6.4. Defecto de viruta



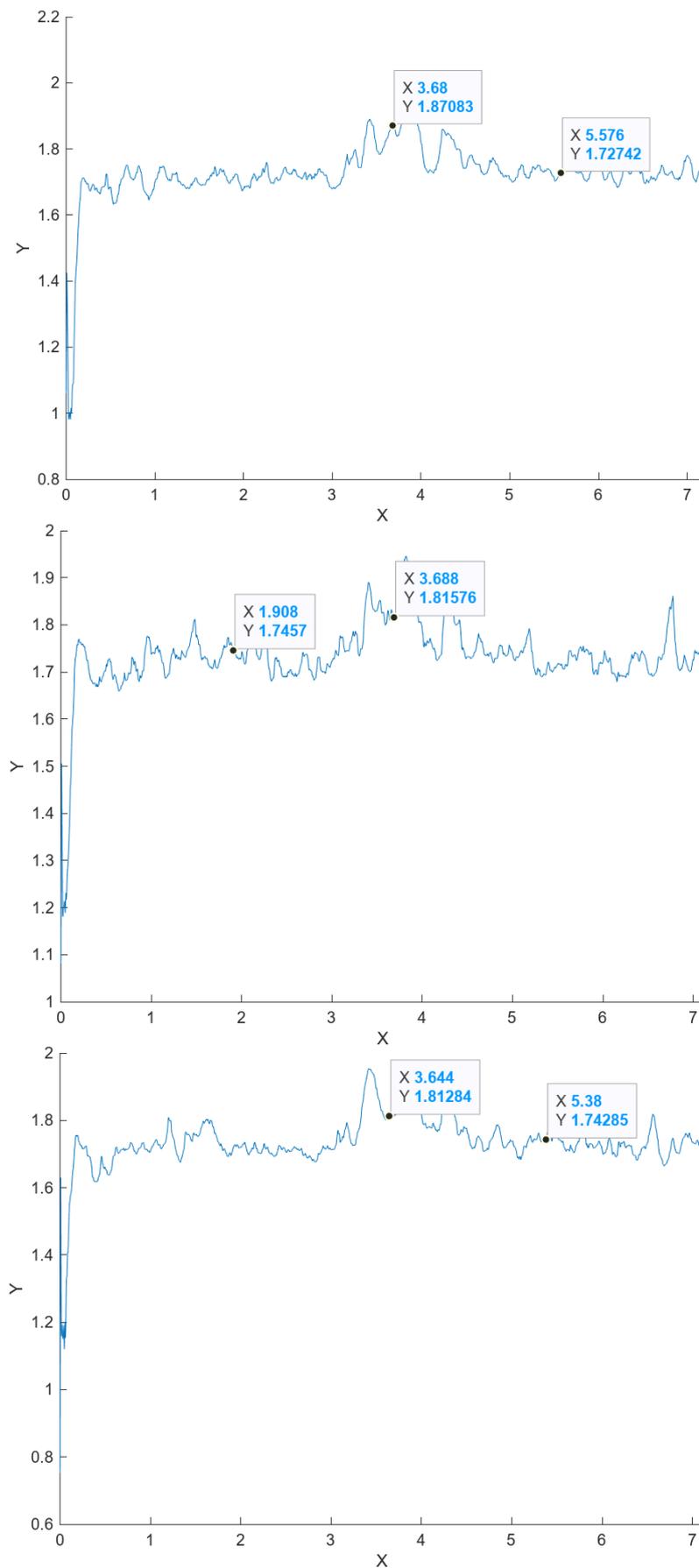
6.5. Defecto de polvo metálico sobre sustrato



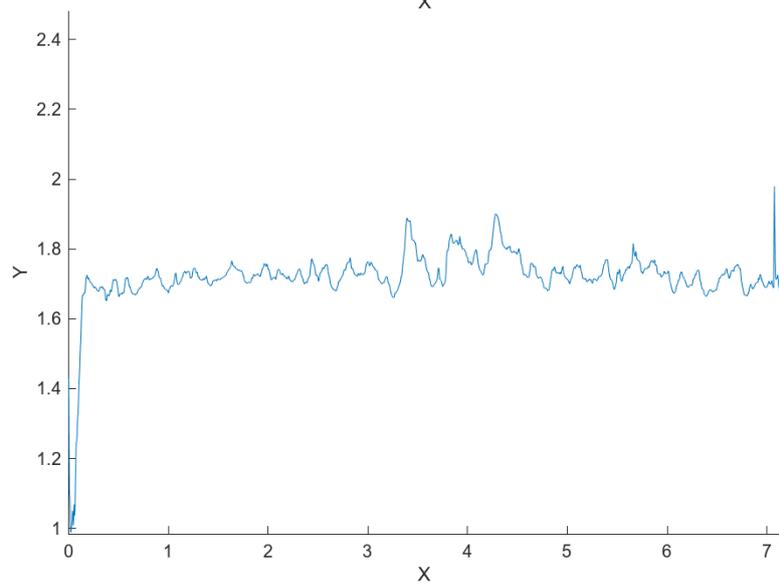
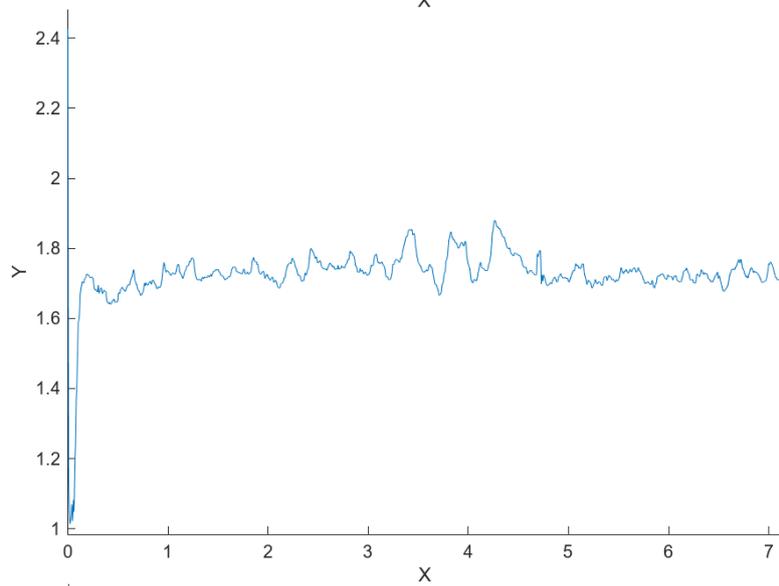
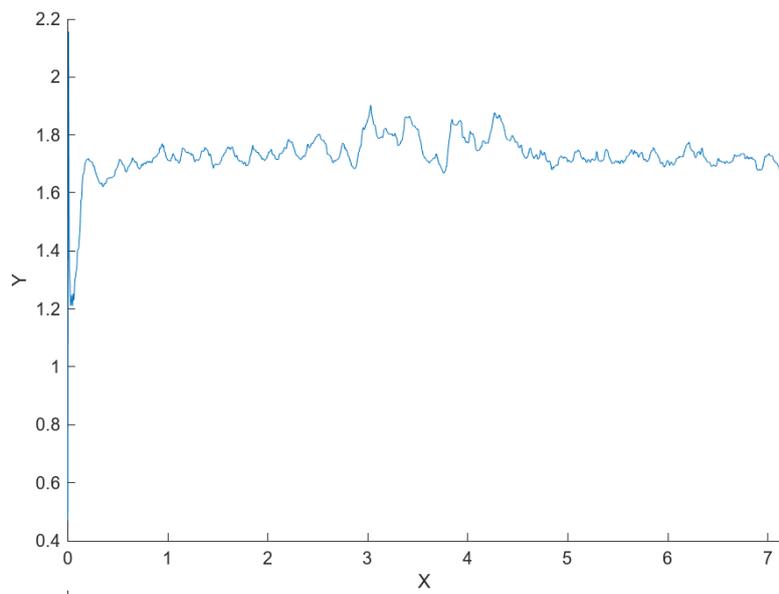
6.6. Defecto de aceite

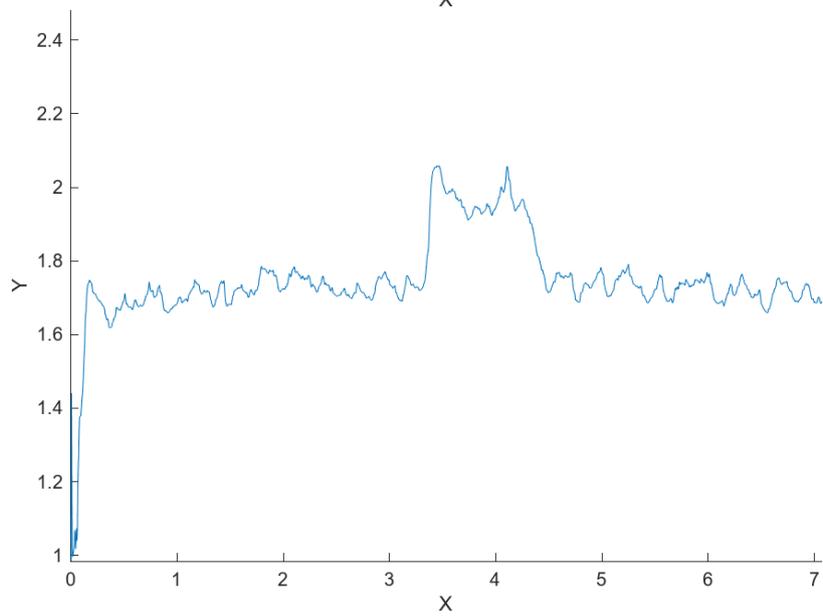
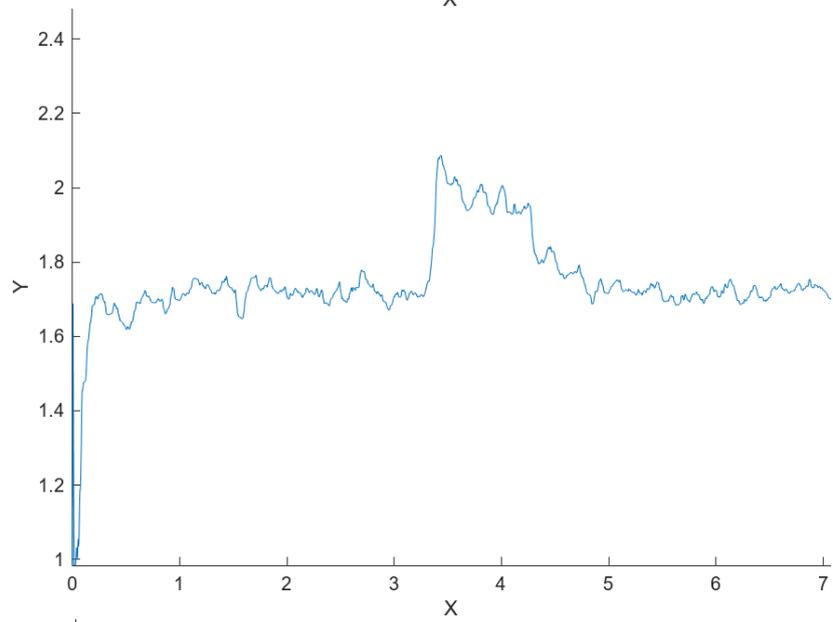
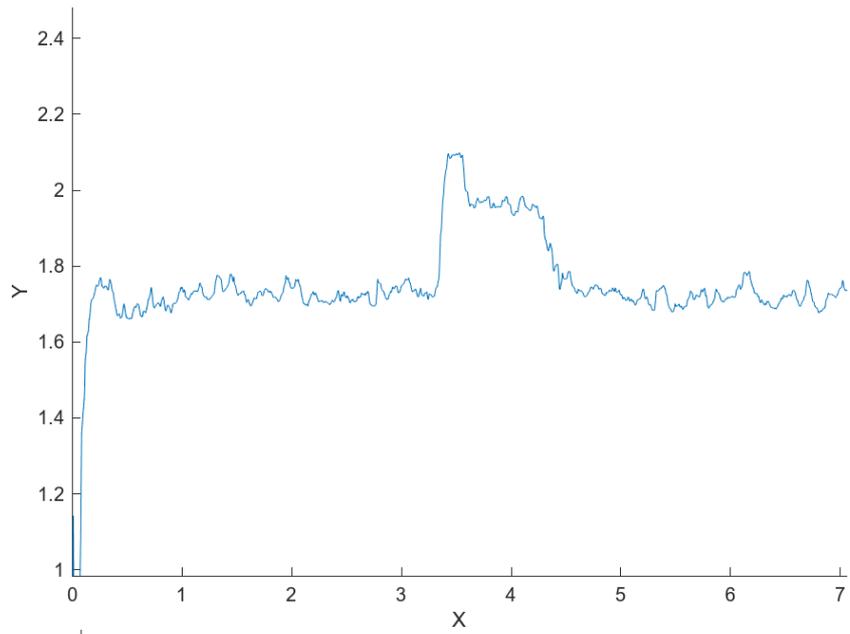


6.7. Defecto de altura

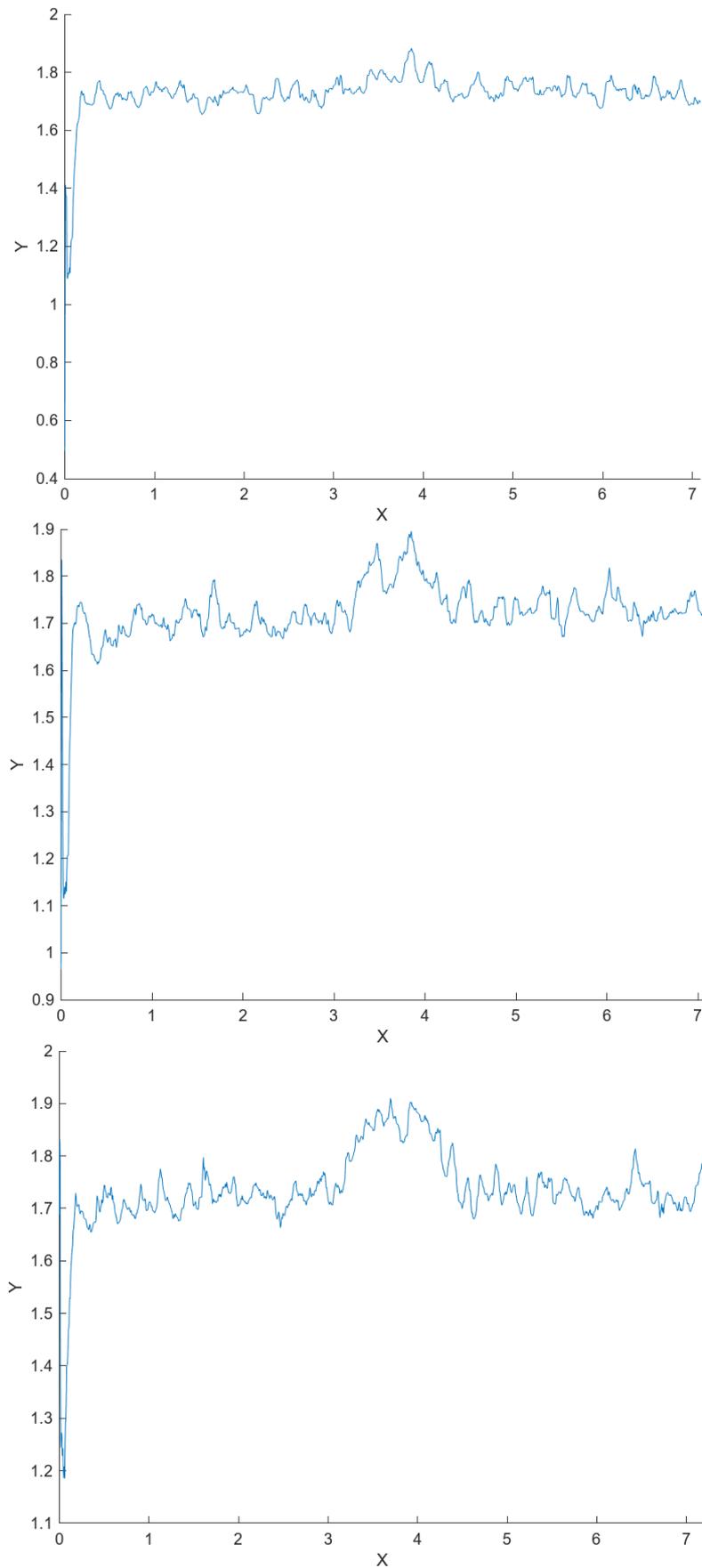


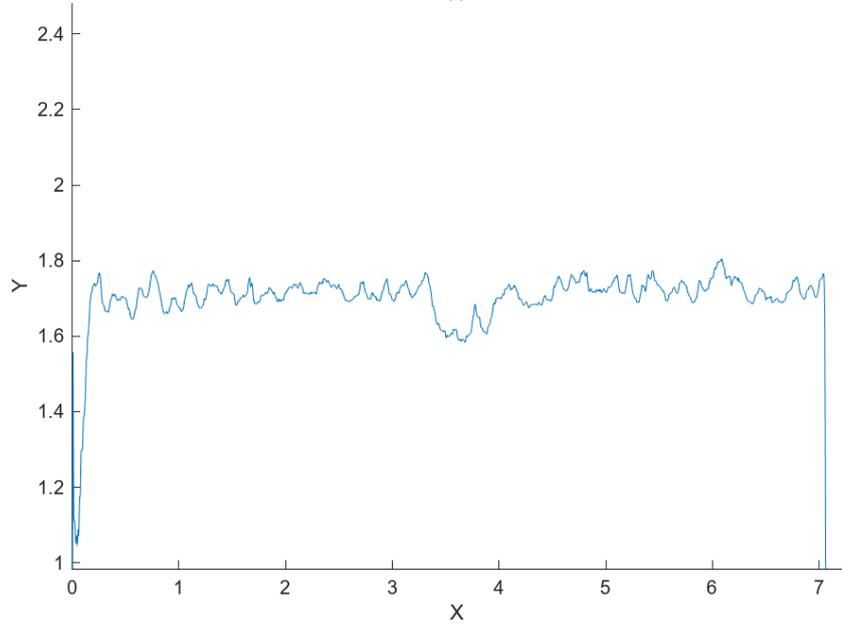
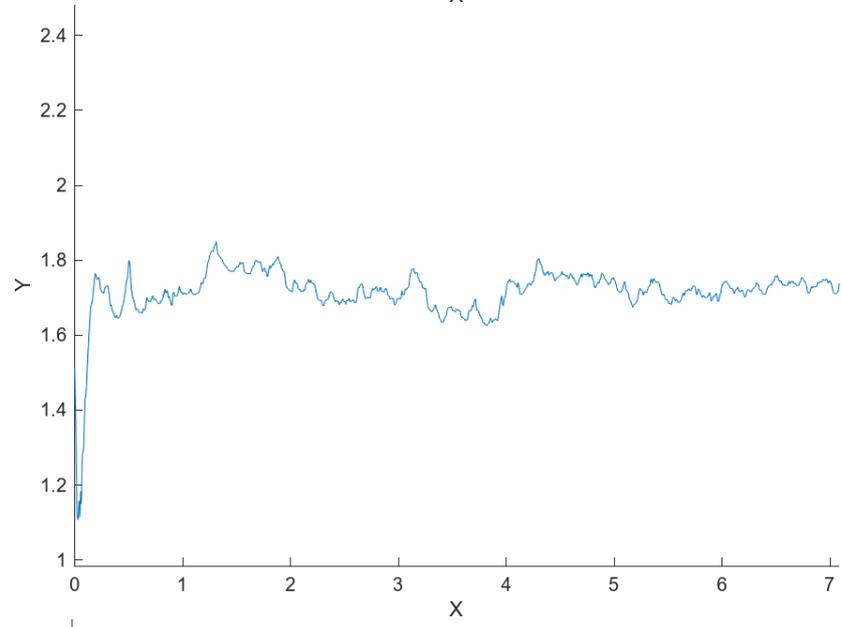
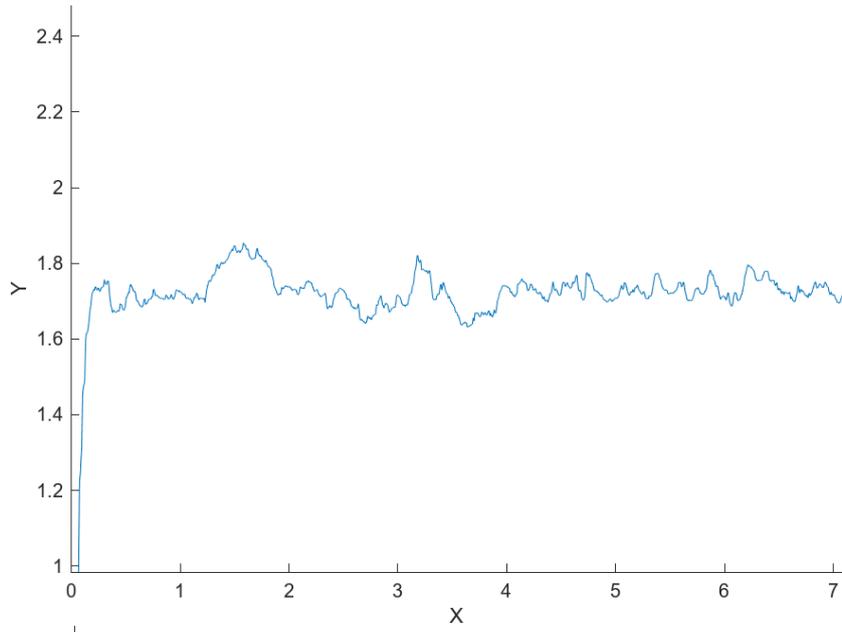
6.8. Defecto de variación de potencia



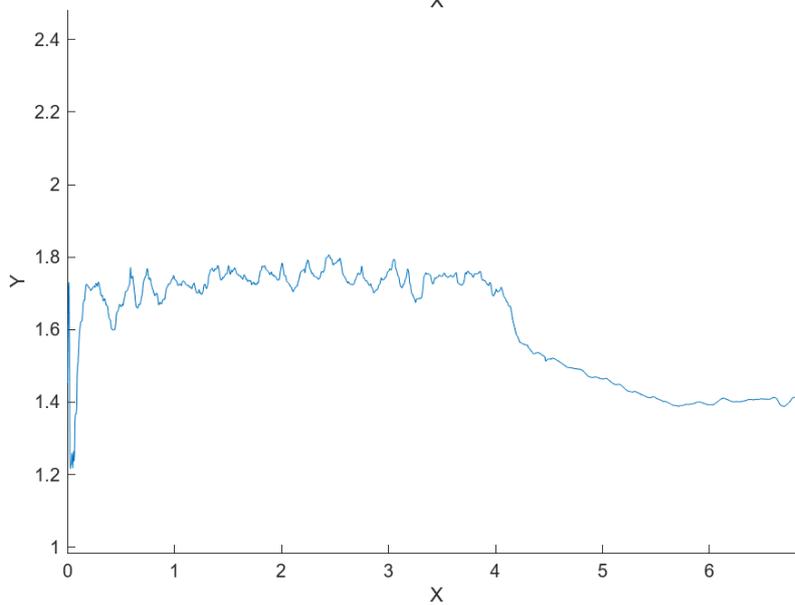
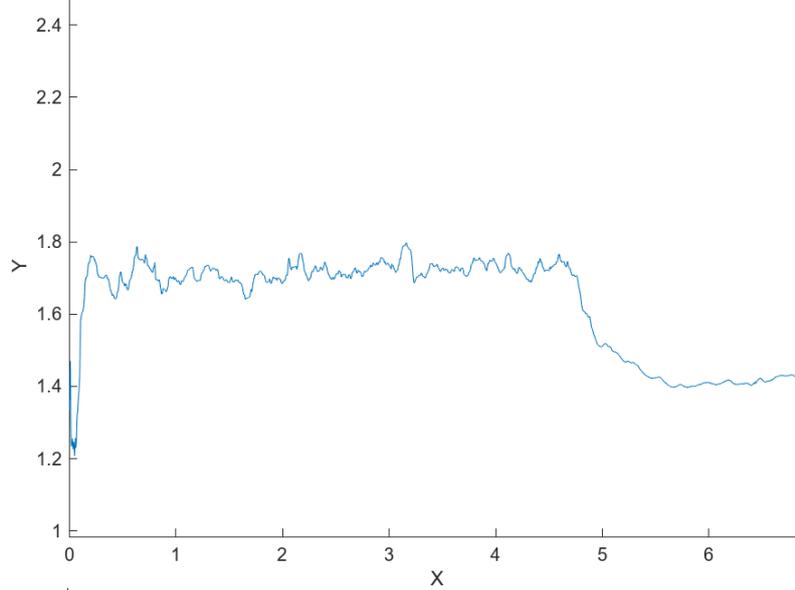
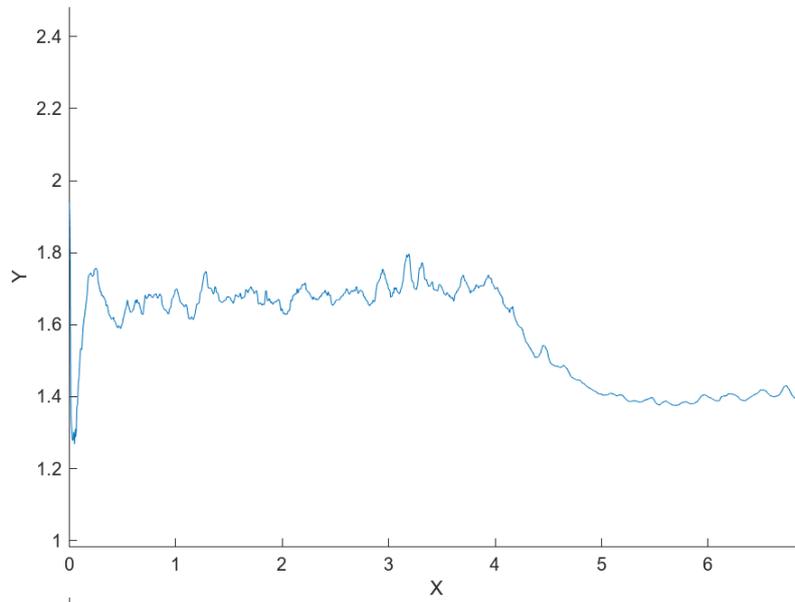


6.9. Defecto de variación de velocidad de avance





6.10. Defecto de variación de caudal



6.11. Defecto de inclinación

