



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial

## Estudio teórico y experimental del acabado superficial en la deposición de gotas sobre superficies planas horizontales en procesos de impresión “material jetting”

**TRABAJO FIN DE GRADO**

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

**Autor:** Martín García Pérez  
**Director:** D. Félix Faura Mateu  
**Codirector:** D. Rosendo Zamora Pedreño



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. HISTORIA, ANTECEDENTES, ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>4</b>
2.1 Antecedentes.....	4
2.2 Estado del arte .....	6
2.3 Ventajas .....	7
2.4 Limitaciones .....	8
2.5 Aplicaciones .....	8
2.6 Futuro .....	10
<b>3. MATERIALES, EQUIPO Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>11</b>
3.1. Material.....	11
3.2. Equipos y software .....	15
3.2.1. Estación de impresión JetLab .....	15
3.2.2. Microscopio óptico .....	22
3.2.3. Software de tratamiento de imágenes.....	23
3.3. Metodología.....	24
3.3.1. Organización del estudio .....	24
3.3.2. Cálculo de números adimensionales.....	26
3.3.3. Estudio del Drawback.....	27
3.3.4. Medida experimental del ángulo de solidificación y del diámetro inicial de la gota generada.....	29
3.3.5. Obtención del paso ideal y su rugosidad asociada .....	32
3.3.6. Medida experimental para el cálculo de la rugosidad .....	32
3.3.7. Expresión de una medida.....	33
<b>4. ESTUDIO TEÓRICO</b> .....	<b>41</b>
4.1 Definición de variables.....	41
4.2 Estudio del paso óptimo .....	42
4.2.1. Determinación de la geometría de la gota solidificada.....	42
4.2.2. Solapamiento de gotas en el proceso de deposición.....	45
4.2.3. Cálculo del paso óptimo $W_{op}$ .....	45
4.3 Estudio de la rugosidad superficial.....	50
4.3.1. Modelización de la rugosidad en deposiciones horizontales.....	50
<b>5. ESTUDIO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>54</b>

5.1.	Estudio de la interacción entre gotas: <i>Drawback</i> .....	54
5.2.	Determinación del ángulo de solidificación .....	62
5.3.	Determinación del diámetro inicial de la gota D .....	65
5.4.	Cálculo del paso óptimo .....	66
5.5.	Cálculo de la rugosidad .....	67
<b>6.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
6.1	Sobre el <i>Drawback</i> .....	69
6.2	Paso real y paso teórico .....	71
6.3	Comparación de rugosidades teóricas y experimentales .....	74
6.4	Paso óptimo .....	81
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>86</b>
7.1.	Parámetros de estudio .....	89
7.1.1.	<i>Drawback</i> .....	89
7.1.2.	Paso óptimo .....	89
7.1.3.	Rugosidad .....	89
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>90</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>92</b>
A.1.	Medidas directas sobre sustratos de deposición .....	92
A.1.1.	Aplicación del Criterio de Chauvenet y cálculo de los intervalos de confianza. Placa 1. ....	93
A.1.2.	Aplicación del Criterio de Chauvenet y cálculo de los intervalos de confianza. Placa 2. ....	94
A.1.3.	Aplicación del criterio de Chauvenet y cálculo de los intervalos de confianza. Placa 3. ....	95
A.1.4.	Aplicación del criterio de Chauvenet y cálculo de los intervalos de confianza. Placa 4. ....	96
A.2.	Medidas indirectas sobre sustratos de deposición .....	97
A.2.1.	Método de propagación de varianzas. Placa 1 .....	97
A.2.1.	Método de propagación de varianzas. Placa 2 .....	101
A.2.2.	Método de propagación de varianzas. Placa 3 .....	105
A.2.3.	Método de propagación de varianzas. Placa 4 .....	109

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Propiedades físicas de la parafina 1260.....	12
Tabla 3. 2. Características de los experimentos I .....	24
Tabla 3.3. Características de los experimentos II .....	24
Tabla 3.4. Características de los experimentos III.....	25
Tabla 3.5. Objetivos, variables medidas y resultados I .....	25
Tabla 3.6. Objetivos, variables medidas y resultados II .....	25
Tabla 3.7. Objetivos, variables medidas y resultados III.....	25
Tabla 3.8. Radio y distancia entre centros.....	26
Tabla 3.9. Valores de los números adimensionales que afectan al proceso.....	27
Tabla 3.10. Coeficiente k(n) del criterio de Chauvenet .....	34
Tabla 5.1. Diámetro sobre el sustrato $D_s$ .....	55
Tabla 5.2. Distancia entre centros teórica y real en $\mu\text{m}$ .....	56
Tabla 5.3. Mediciones .....	57
Tabla 5.4. Primera iteración .....	57
Tabla 5.5. Segunda iteración .....	58
Tabla 5.6. Cuantificación del Drawback .....	58
Tabla 5.7. Mediciones. ....	59
Tabla 5.8.....	59
Tabla 5. 9.....	59
Tabla 5.10.....	60
Tabla 5.11. Mediciones .....	60
Tabla 5.12. Primera iteración .....	60
Tabla 5.13.....	61
Tabla 5.14. Mediciones .....	61
Tabla 5.15. Primera iteración .....	62
Tabla 5.16.....	62
Tabla 5.17. Influencia del Drawback en el error de impresión.....	62
Tabla 5.18. Medida de parámetros en placa 1 .....	63
Tabla 5.19. Medida de parámetros en placa 2 .....	64
Tabla 5.20. Medida de parámetros en placa 3 .....	64
Tabla 5.21. Medida de parámetros en placa 4 .....	64
Tabla 6.1. Relación de superposición. ....	70
Tabla 6.2. Error de impresión. Placa 1 .....	72
Tabla 6.3. Error de impresión. Placa 2 .....	72
Tabla 6.4. Error de impresión. Placa 3 .....	72
Tabla 6.5. Error de impresión. Placa 4 .....	72
Tabla 6.6. Rugosidades, placa 1. ....	74
Tabla 6.7. Rugosidades, placa 2. ....	74
Tabla 6.8. Rugosidades, placa 3. ....	74
Tabla 6.9. Rugosidades, placa 4. ....	75
Tabla 6.10. Valores promedio de los cuatro experimentos.....	75
Tabla 6.11. Influencia de $W_x$ y $D_c$ en el modelo experimental de rugosidad. Valores medios.....	78
Tabla 6.12. Error relativo del modelo de predicción del paso óptimo. ....	85
Tabla 6.13. Error relativo. Rugosidad mínima teórica frente a experimental. ....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tipos de tecnologías de fabricación .....	1
Figura 2.1. Procesos de fabricación aditiva según el proceso de obtención del modelo .....	5
Figura 2.2. Conversión de modelo CAD a formato STL.....	7
Figura 2.3. Gotas de soldadura en dispositivos electrónicos .....	9

Figura 3.1. Diferentes regímenes en función de las propiedades del fluido en impresión DOD .....	14
Figura 3.2. Regímenes dominantes en la impresión DOD.....	15
Figura 3.3. Equipo de impresión empleado. Principales características técnicas .....	16
Figura 3.4. Componentes del sistema de impresión y de visualización.....	16
Figura 3.5. Tecnología CS (Izquierda) y tecnología DOD (Derecha) .....	17
Figura 3.6. Funcionamiento del piezoeléctrico.....	17
Figura 3.7. Ejemplo de señal aplicada .....	18
Figura 3.8. Generación de gotas (DOD).....	18
Figura 3.9 Esquema del dispensador .....	19
Figura 3.10. Señal de tipo bipolar.....	20
Figura 3.11. Señal compleja .....	20
Figura 3.12 Interfaz del programa de control .....	21
Figura 3.13. Microscopio óptico del Dpto. de Ingeniería de Materiales y Fabricación.....	23
Figura 3.14. Microscopio óptico y monitor del Dpto. de Ingeniería de Materiales y Fabricación. ....	23
Figura 3.15. Medida de radio y distancia entre gotas .....	26
Figura 3.16. Drawback entre dos gotas .....	27
Figura 3.17. Experimento .....	28
Figura 3.18. Experimento .....	29
Figura 3.19. Medida de radio y altura .....	30
Figura 3.20. Método alternativo .....	31
Figura 3.21. Medida del ángulo de solidificación .....	32
Figura 3.22. Medida experimental de la rugosidad .....	33
Figura 3.23. Distribución t de Student.....	36
Figura 4.1. Análisis del paso y de la relación de superposición .....	42
Figura 4.2. Geometría de la gota solidificada.....	43
Figura 4.3. Relaciones trigonométricas .....	44
Figura 4.4. Variación del solapamiento en función del paso adoptado .....	46
Figura 4.5. Modelo para el cálculo del paso óptimo $W_{op}$ .....	47
Figura 4.6. Volumen $V$ .....	47
Figura 4.7. Mitad del triángulo (a) y sector circular (b) .....	48
Figura 4.8. Representación geométrica del perfil superior .....	50
Figura 4.9. Definición de $R_a$ .....	52
Figura 5.1. Condiciones de operación del experimento.....	54
Figura 5.2. Tres gotas .....	55
Figura 5.3. Cordones horizontales para cuantificación del Drawback .....	55
Figura 5.4. Interpolación de círculos .....	56
Figura 5.5. Distancia entre centros o paso $W_x$ .....	56
Figura 5.6. Interpolación de círculos .....	58
Figura 5.7. Interpolación de círculos .....	60
Figura 5.8. Interpolación de círculos .....	61
Figura 5.9. Parámetros experimentales de impresión para la generación de gotas que permitan la medición del ángulo de solidificación.....	63
Figura 5.10. Ángulo de solidificación .....	65
Figura 5.11. Diámetro de la gota generada.....	66
Figura 5.12. Paso óptimo.....	67
Figura 5.13. Rugosidad mínima .....	68
Figura 6.1. Influencia de la temperatura en la relación entre $\theta$ y $\eta_x$ .....	70
Figura 6.2. Pasos teórico y real para los diferentes cordones depositados. Valores medios .....	73
Figura 6.3. Error de deposición (%) en cada placa. ....	73
Figura 6.4. Modelo teórico vs experimental.....	75
Figura 6.5 Valores teóricos y experimentales de rugosidad para diferentes pasos de impresión. ....	76
Figura 6.6.Condiciones de experimentación de la referencia 7. ....	77
Figura 6.7. Comparación de los modelos teórico y experimental. Valores medios de las 4 placas.....	77
Figura 6.8. Variación de la rugosidad en el modelo experimental. Valores medios.....	78
Figura 6.9. Variación de $D_c$ y $W_x$ en cada deposición. Valores medios. ....	79
Figura 6.10. Medición de $D_c$ y $W_x$ . Placa 1, paso teórico 32 $\mu\text{m}$ .....	80

Figura 6.11. Medición de $D_c$ y $W_x$ . Placa 1, paso teórico 40 $\mu\text{m}$ .....	80
Figura 6.12. Medición de $D_c$ y $W_x$ . Placa 1, paso teórico 48 $\mu\text{m}$ .....	80
Figura 6.13. Medición de $D_c$ y $W_x$ . Placa 1, paso teórico 56 $\mu\text{m}$ .....	80
Figura 6.14. Medición de $D_c$ y $W_x$ . Placa 1, paso teórico 64 $\mu\text{m}$ .....	80
Figura 6.15. Placa 1. Paso teórico 32, 40, 48, 56, 64 $\mu\text{m}$ .....	81
Figura 6.16. Fenómenos transitorios. Paso teórico 32 $\mu\text{m}$ .....	82
Figura 6.17. Variación de $D_c$ a causa de fenómenos transitorios. Paso teórico 32 $\mu\text{m}$ .....	82
Figura 6.18. Representación gráfica de la variación de $D_c$ por fenómenos transitorios. Paso teórico 32 $\mu\text{m}$ . .....	83
Figura 6.19. Rugosidad experimental vs rugosidad óptima predicha por el modelo teórico .....	83
Figura 6.20. Columna con paso teórico de 24 $\mu\text{m}$ . .....	84
Figura 7.1. Rugosidad de la placa de acero inoxidable 316 L. Medidas N-S y E-O .....	88

## NOMENCLATURA

Símbolo	Parámetros
$\mu$	Viscosidad dinámica
$\rho$	Densidad
$\gamma$	Tensión superficial
Re	Número de Reynolds
We	Número de Weber
Ohn	Número de Ohnesorge
Bo	Número de Bond
x	Longitud característica
$d_n$	Diámetro de la boquilla
g	Constante de la gravedad
v	Velocidad de caída de la gota
T	Tiempo transcurrido desde la expulsión de una gota hasta su deposición
$\tau$	Tiempo de impresión
V	Velocidad del sustrato
f	Frecuencia de deposición de gotas
N	Número de gotas expulsadas o eyectadas
S	Desplazamiento del sustrato
$L_x$	Ancho máximo de la sección superpuesta entre dos gotas
$W_x$	Paso en la dirección "x" ( <i>Scan step</i> )
$D_s$	Diámetro de propagación sobre el sustrato
$\eta_x$	Relación de superposición en la dirección "x"
$R_b$	Radio de propagación de la gota
$D_c$	Diámetro del casquete esférico
$R_c$	Radio del casquete esférico
$\phi$	Índice de cuantificación del <i>Drawback</i>
D	Diámetro de la gota generada en la boquilla
R	Radio de la gota generada en la boquilla
$\theta$	Ángulo de solidificación entre gota y sustrato
h	Altura del casquete esférico
a	Ancho del casquete esférico
$W_{op}$	Paso ideal u óptimo en la dirección "x"
$R_a$	Rugosidad superficial
R'	Radio de la gota inicial. Método alternativo
z	Distancia entre centros. Método alternativo
$R_j$	Radio de la gota superior. Método alternativo
y	Distancia entre centro de la gota y sustrato
$D_y$	Longitud del cordón horizontal
m	Número de gotas del cordón horizontal



ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL ACABADO SUPERFICIAL EN  
LA DEPOSICIÓN DE GOTAS SOBRE SUPERFICIES PLANAS  
HORIZONTALES EN PROCESOS DE IMPRESIÓN “MATERIAL JETTING”

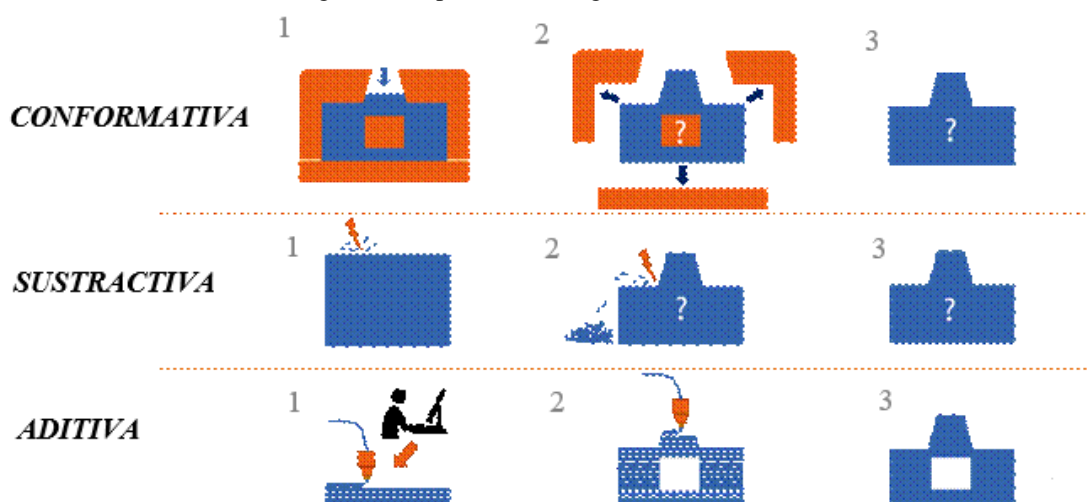




## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Los procesos de fabricación conocidos como fabricación aditiva o *Additive Manufacturing* han abierto nuevas vías para la producción de una serie de componentes o productos aprovechando las ventajas que ofrece con respecto a otro tipo de tecnologías o procedimientos convencionales. La fabricación aditiva abarca un amplio rango de procesos, con la base común de adición o aporte de material, pero con diferencias significativas entre ellos. Se trata de un conjunto de tecnologías relativamente nuevas, por lo que el camino a recorrer para conseguir explotar totalmente sus ventajas es todavía largo, pero su gran potencial hace que una gran cantidad de investigadores e ingenieros de todo el mundo aúnen esfuerzos para el desarrollo completo de estas tecnologías, por lo que se augura un futuro esperanzador, en el que se consiga la universalización de estos procesos en la industria de la fabricación.

Figura 1.1. Tipos de tecnologías de fabricación



Fuente: <http://fabricacionaditiva.online/3.htm>

Este trabajo se centrará en una de sus variantes, la fabricación aditiva por deposición de microgotas. Los procesos basados en la deposición de microgotas tienen un amplio abanico de aplicaciones en una gran variedad de áreas y su peso en la industria va adquiriendo cada vez más, una mayor magnitud con el avance de las nuevas tecnologías que sirven de apoyo a este tipo de fabricación. La mayor parte de las aplicaciones asociadas a la deposición de microgotas requieren de una gran precisión dimensional, como pueden ser la formación de conexiones y microsoldaduras en componentes electrónicos de pequeño tamaño (Gibson y otros) [2]. Por tanto, será fundamental garantizar unos valores de acabado superficial y precisión dimensional adecuados para este tipo de aplicaciones. Este trabajo se centra en el estudio teórico y experimental del acabado superficial de la deposición de microgotas o *material jetting*, concretamente sobre superficies planas horizontales.

En el capítulo 2 se hará una introducción en el ámbito de los procesos de fabricación aditiva, concretamente en la deposición de microgotas. Se analizará la evolución de estos procesos a lo largo de su historia, sus campos de aplicación, así como sus limitaciones y ventajas frente a otros tipos de procesos de fabricación. También tratará el estado actual en el que se encuentra la deposición de microgotas, así como posibles futuras líneas de investigación hacia las cuales puede orientarse este tipo de procesos una vez superadas esas limitaciones, en definitiva, el “estado del arte”.

En el capítulo 3 se expondrá el material utilizado y sus características físicas, los diferentes equipos a usar durante la experimentación en el laboratorio, así como la metodología a seguir para la consecución de los objetivos propuestos. Los capítulos 4 y 5 se centrarán, respectivamente, en el estudio teórico y experimental del proceso en las condiciones que se han planteado. Primeramente, comprobaremos si el fluido de trabajo, bajo las condiciones de impresión impuestas en el laboratorio, cumple con los requisitos que hacen que este sea un “fluido imprimible”. Para ello caracterizaremos el movimiento del fluido a partir de una serie de números adimensionales y observaremos que estos se encuentran en el rango de valores adecuados que permiten una buena impresión (Derby y otros, 2010) [3]. Una vez asegurada la imprimibilidad del fluido en esas condiciones se procederá con la medida de los ángulos de solidificación  $\theta$  y del diámetro de la gota generada  $D$ , para ello se realizará la deposición de varias gotas de manera individual sobre el sustrato, y se llevarán a cabo una serie de medidas geométricas que nos permitirán conocer los parámetros mencionados.

Conocidos todos los parámetros y variables que influyen en el proceso de deposición en este trabajo, se comprobará si existe la presencia del fenómeno conocido como *Drawback*, en el cual dos gotas superpuestas que impactan sobre una superficie sólida pueden unirse o conectarse, total o parcialmente, produciendo un retroceso o contracción volumétrica, lo que podría afectar sustancialmente al proceso de deposición de microgotas. Para comprobar si se produce o no dicho fenómeno se realizará un experimento que consistirá en la impresión de filas de 20 microgotas, se comparará la longitud real, medida con un software de análisis de imagen, con la longitud ideal prevista. Basándonos en estudios existentes, se comprobará si la influencia del *Drawback* resulta o no despreciable (Ashgriz y otros, 2019) [9].

Posteriormente se revisarán y estudiarán una serie de artículos de diferentes autores para la utilización de un modelo que nos permita predecir el paso o distancia entre centros de las gotas depositadas que proporcione un valor mínimo de rugosidad. Para poder usar estos modelos de forma idónea será necesario determinar los parámetros

que influyen en la deposición de gotas sobre superficies planas horizontales (frecuencia, temperatura de la gota, temperatura del sustrato, etc...), así como los rangos de operación de estos que permitan una deposición adecuada. Una vez obtenido el valor del paso ideal se procederá con la determinación teórica de la rugosidad superficial de la deposición, para ello se utilizará un modelo geométrico propuesto por L. Qi y otros, concretamente el que se centra en la topografía de la superficie o capa superior de la deposición. Se realizarán una serie de experimentos en el laboratorio con el fin de comprobar si los valores predichos por el modelo se adaptan a los resultados obtenidos experimentalmente (Qi, L y otros, 2015) [7].

Se realizará una batería de experimentos de deposición de cordones horizontales variando el paso y se medirán los parámetros necesarios que nos permitan obtener los datos suficientes para contrastar la validez de los modelos teóricos elegidos. Para comprobar la validez del modelo de predicción de la rugosidad será necesario medir la rugosidad superficial real que presentan las deposiciones, para lo cual se usará un modelo convencional. Conocidos los valores de rugosidad experimental y teóricos se comprobará si la diferencia entre ambos modelos es significativa, o si, por el contrario, los valores arrojados por el modelo teórico se corresponden con la realidad. Del mismo modo se procederá a comprobar si el paso óptimo obtenido a partir del modelo de la referencia 6 se corresponde con el paso real que proporciona un menor valor de rugosidad.

El capítulo 6 se centrará en la comparación y discusión de los resultados teóricos y experimentales estudiados y expuestos en los capítulos anteriores. Se confirmará si los modelos teóricos se han ajustado a la realidad y en caso de que no, se tratará de explicar o de justificar las posibles causas que han generado esas diferencias. Finalmente, en el capítulo 7 se expondrán las conclusiones a las que nos han llevado los resultados obtenidos durante la realización de este trabajo.

## **CAPÍTULO 2**

### **HISTORIA, ANTECEDENTES, ESTADO DEL ARTE**

#### **2.1 Antecedentes**

Los orígenes de la fabricación aditiva pueden parecer difíciles de definir, se puede constatar que en los años 1950 y 1960 la fabricación aditiva comenzó a gestarse con el nacimiento de las tecnologías de inyección de tinta, sin embargo, no fue hasta 1980 con el desarrollo de ciertas tecnologías asociadas (computadoras, láseres, controladores, etc...) cuando de verdad la fabricación aditiva alcanzó cotas verdaderamente importantes. En la década de los 80 se presentaron simultáneamente diferentes patentes para fabricar un objeto 3D añadiendo selectivamente capas de material. En 1986 surgieron tres empresas importantes que patentaron tres procesos. Helisys patentó el proceso LOM (Laminado de objetos de fabricación), Cubital patentó Solid Ground de curado SGC, y DTM la sinterización selectiva por láser. En el año 1989 Scott Crump patentó el proceso de modelado por deposición fundida (FDM). Ese mismo año un grupo de investigadores del MIT patentó el proceso de impresión 3D (3DP), el grupo no fundó una empresa, sino que otorgó licencias a diferentes empresas para la aplicación de esta tecnología.

En 1994 Sanders desarrolló el proceso de tecnología de inyección de material fundido para depositar gotas directamente sobre el sustrato, donde dicho material se endurece y se convierte en la pieza en sí, es decir, la fabricación aditiva por deposición de microgotas que es objeto de nuestro estudio. En 2001 la compañía Objet utilizó esta técnica para imprimir resinas fotocurables en forma de microgotas. Muchas de las tecnologías que se han ido patentando desde la década de los 80 han acabado en fracaso, sin embargo, la gran mayoría ha fracasado no por causa de las características tecnológicas del proceso, sino por la mala calidad en el modelo de negocio.

Figura 2.1. Procesos de fabricación aditiva según el proceso de obtención del modelo

TIPO	TECNOLOGÍAS	MATERIALES
Foto-Polimerizado	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros
	Fotopolimerización por proyección por máscara (DLP)	Resinas líquidas
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (PLA, ABS, etc.), aleaciones eutécticas de metales, productos comestibles
Impresión	Inyección de material (Material jetting)	Ceras, fotopolímeros o metales
	Inyección de aglutinante (Binder jetting)	Cualquier material en polvo (Usualmente metales y cerámicos, aunque también maderas)
Fusión en lecho de polvo	Sinterizado Selectivo por láser (SLS-DMLS)	Materiales en forma de polvo, principalmente metales y aleaciones, materiales compuestos, cerámicos, termoplásticos y elastómeros termoplásticos.
	Fundido selectivo por láser (SLM)	
	Fusión por haz de electrones (EBM)	
Laminación	Laminated Object manufacturing (LOM)	Láminas de termoplásticos, papel/cartón, fibra de carbono y otros materiales compuestos o metales (chapas).
	Selective Deposition Lamination (SDL)	
Depositado mediante energía dirigida	Laser cladding	Materiales en polvo o compactados, principalmente metales y aleaciones.
	Fusión de iones (IFF)	

Fuente: <http://www.atiga.es/web/wp-content/uploads/2017/03/Estado-del-Arte-Fabricaci%C3%B3n-Aditiva.pdf>

Las primeras patentes fueron desarrolladas en Europa, Estados Unidos y Japón casi de manera simultánea. En los primeros años las empresas punteras se situaban en los Estados Unidos, sin embargo, con el paso de los años industrias europeas como la alemana han sabido abrirse camino. De igual modo, la industria japonesa supo adaptarse muy bien a los nuevos tiempos y grandes empresas como Sony establecieron filiales para el desarrollo de tecnología de fabricación aditiva, girando alrededor de los procesos de fotopolimerización. En otras partes de Asia, como China y Corea, existen empresas en pleno desarrollo. Destaca un país en particular, Israel, siendo una de las máquinas más antiguas desarrollada por la compañía israelí Cubital, esta máquina incluyó tecnología que no se encontraba en otras máquinas anteriores y que sirvió de referencia para innovaciones posteriores. Una de las empresas más nuevas en esta industria, Objet, está utilizando con éxito la tecnología de deposición de gotas para generar estructuras tridimensionales a partir de la deposición de resinas fotocurables (Gibson y otros, 2008) [2].

La fabricación aditiva es un tipo de tecnología de fabricación basada en la combinación y/o superposición de materiales capa por capa, por tanto, se trata de procesos de adición de material. Es un tipo de tecnología relativamente moderna, cuya nomenclatura o terminología no está completamente desarrollada, de este modo diferentes autores se refieren a esta tecnología de manera diferente, se expondrán a continuación algunos de esos nombres. Así pues, uno de los primeros nombres usados fue el de prototipado rápido, *rapid prototyping*, ya que esta tecnología en sus inicios fue concebida para la creación de prototipos o modelos en la industria, sin embargo, con el

paso de los años la calidad de los productos obtenidos fue aumentando progresivamente y muchos de los componentes o piezas fabricadas tienen ya las propiedades mecánicas necesarias que permiten su uso como pieza o producto final, de este modo el término de *rapid prototyping* cayó en desuso. Otro término muy usado en la década de los 90 fue el de fabricación automatizada (*Autofab*), este término fue popularizado por Marshall Burns en sus publicaciones, el cual se decantaba por esta nomenclatura debido al importante peso que tiene la automatización en este proceso en la fabricación de los productos. El uso de ordenadores y microcontroladores permiten el control sobre los actuadores, además de monitorizar las variables del sistema. Sin embargo, este término resulta impreciso puesto que esta característica es compartida con una amplia cantidad de procesos de fabricación, como puede ser el mecanizado por control numérico computarizado (CNC). Otro término muy popular y el más usado fuera del ámbito científico es el de impresión 3D, este término fue acuñado por investigadores del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) para referirse a un proceso que desarrollaron y que se basaba en este tipo de tecnología. La popularidad de este término viene asociada a la idea de la impresión en una tercera dimensión, visualmente fácil de comprender para cualquier persona, incluso sin conocimiento alguno acerca del tema de estudio (Hoath S.D) [1]. Finalmente se llegó a la conclusión de que el nombre o término más adecuado con el que referirse a esta tecnología sería el de Fabricación Aditiva, ya que hace referencia al carácter aditivo de esta tecnología, que consiste en añadir material para formar capas sucesivas de material generando una tercera dimensión, en contraste a otro tipo de procesos o tecnologías de fabricación convencionales basadas en la retirada de material hasta alcanzar la forma deseada, como puede ser el mecanizado convencional. Este término fue popularizado por Terry Wohlers, un importante e influyente consultor de la industria especializada en este campo, en sus trabajos y publicaciones (Gibson y otros) [2].

## 2.2 Estado del arte

Con el paso de los años se ha ido desarrollando un tipo de tecnología, que se puede encuadrar dentro de los procesos de fabricación aditiva, pero que no consiste exactamente en la adición de material por capas, sino mediante deposición de gotas de material fundido, lo que se conoce como fabricación aditiva por deposición de microgotas. La deposición de microgotas consiste en dispersar el material fundido, que puede ir desde metales hasta ceras o parafinas, en pequeñas gotas que se hacen pasar a partir de una microboquilla. Existen diferentes tecnologías, por lo que se realizará una pequeña profundización de este tema en el capítulo 3. Una vez generadas esas microgotas, estas se depositan sobre un sustrato en movimiento, la deposición de estas gotas, así como los diferentes parámetros que influyen en esta deposición, se puede controlar mediante sistemas de control numérico. De esta manera se pueden ir generando líneas y capas a partir de la deposición continua de gotitas, una vez generada una capa esta puede actuar como nuevo sustrato y seguir depositándose microgotas en ella, generando finalmente una estructura tridimensional de volumen variable en función del número de capas depositadas o generadas. Esta tecnología tiene su origen en los procesos de inyección de tinta, los cuales se remontan en torno a 50 años atrás. Las impresoras de inyección continua y las impresoras tipo DOD se introdujeron al mercado en los años 70 y 80 del pasado siglo para la impresión de información variable en las etiquetas de los productos y en papel [1]. Pero como se ha mencionado anteriormente, la tecnología de impresión de gotas se ha desarrollado de manera considerable en los últimos tiempos. Se ha conseguido generar presiones mucho más altas dentro de la

cámara de formación de gotas permitiendo trabajar con materiales con viscosidades mucho más elevadas que las tintas convencionales, consiguiendo incluso que materiales fundidos puedan llegar a imprimirse, impensable no hace mucho tiempo atrás (Gibson y otros) [2].

### 2.3 Ventajas

Desde un punto de vista general, sin hacer hincapié en la deposición de microgotas, la fabricación aditiva ha supuesto una revolución en la fabricación de productos. En primer lugar, hay que tener en cuenta la velocidad de fabricación que caracteriza a la fabricación aditiva, esta velocidad no solo se centra en el proceso de fabricación de la propia pieza, sino que abarca todo el proceso de desarrollo del producto debido al gran apoyo que suponen las herramientas de programación y de CAD 3D para definir la geometría de las estructuras a imprimir y a la transferencia de datos relativamente fluida entre los diferentes dispositivos. Otra ventaja importante de la fabricación aditiva es la construcción de la pieza en un solo paso, mientras que otros procesos de fabricación requieren de diferentes etapas. Del mismo modo, la cantidad de procesos y recursos que se requieren para la fabricación de una pieza se reduce de manera importante frente a otros procesos como pueden ser el moldeo o el mecanizado CNC, por tanto, los talleres que adoptan la fabricación aditiva adquieren una tecnología más limpia, ágil y sobre todo más versátil [2].

Figura 2.2. Conversión de modelo CAD a formato STL



Fuente: Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (Brent). Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.

Por otro lado, cada proceso de fabricación aditiva tiene una serie de ventajas y desventajas frente a los demás. En cuanto a los procesos de impresión directa, en los que se engloba la deposición de gotas, se tiene que algunas ventajas son el bajo coste, la alta velocidad, la escalabilidad y la fácil construcción de piezas utilizando diferentes materiales, así como la impresión en diferentes colores. Del mismo modo, las máquinas de impresión directa tienen un coste bastante más barato que otras máquinas de fabricación aditiva, sobre todo aquellas que usan láseres, como por ejemplo la fabricación aditiva por sinterización mediante láser. Así mismo, se puede variar el número de boquillas en la propia máquina, pudiendo variar desde decenas hasta miles, por tanto, se puede producir la deposición de material de manera mucho más rápida, aumentando la velocidad del proceso y por tanto la productividad de la línea. Esta facilidad en la escalabilidad es una característica que la distingue de los procesos que

requieren láseres, puesto que el añadir uno de estos resulta mucho más complejo (Gibson y otros) [2].

## 2.4 Limitaciones

La fabricación por deposición de microgotas también presenta una serie de desventajas o limitaciones que han estancado el desarrollo de esta tecnología. La primera de estas limitaciones es la formación de material líquido, la presencia de partículas sólidas o la excesiva viscosidad del líquido puede provocar una deposición defectuosa, así como un atasco en la boquilla. Otra de las limitaciones que nos encontramos es la dificultad para generar microgotas de manera correcta, pequeñas modificaciones en el material pueden cambiar drásticamente el comportamiento en la formación de microgotas y, por ende, de la deposición.

También es importante controlar la deposición de las gotas, lo cual supone un desafío verdaderamente importante. El sustrato se mueve, acción que ha de tenerse en cuenta para calcular adecuadamente la trayectoria de la gota. Una mala ubicación, así como variaciones en la velocidad y el tamaño de las gotas influirá en las características de la deposición. Del mismo modo se ha de tener en cuenta la presencia de las denominadas gotas “satélite”, que se desprenden de la gota principal durante el vuelo, aumentando el área de la deposición y generando límites mal definidos en la estructura obtenida. Todo esto resulta difícil de controlar puesto que se trabaja con tamaños del orden de micras. Otras limitaciones que se pueden presentar son, por ejemplo, el número limitado de materiales con los que podemos trabajar, el excesivo coste de las máquinas frente a otras usadas en procesos de fabricación convencionales y las mejorables propiedades mecánicas, porosidad, precisión dimensional y calidad superficial de las piezas obtenidas frente a otro tipo de procesos de fabricación (Gibson y otros) [2].

## 2.5 Aplicaciones

Una de las áreas de aplicación más importantes para esta tecnología es la de la generación de gráficos o dibujos. También existen otras aplicaciones con gran potencial como es el caso de la construcción de estructuras tridimensionales, así como otros campos de aplicación más novedosos, tales como la generación de tejidos biológicos o la ingeniería de tejidos.

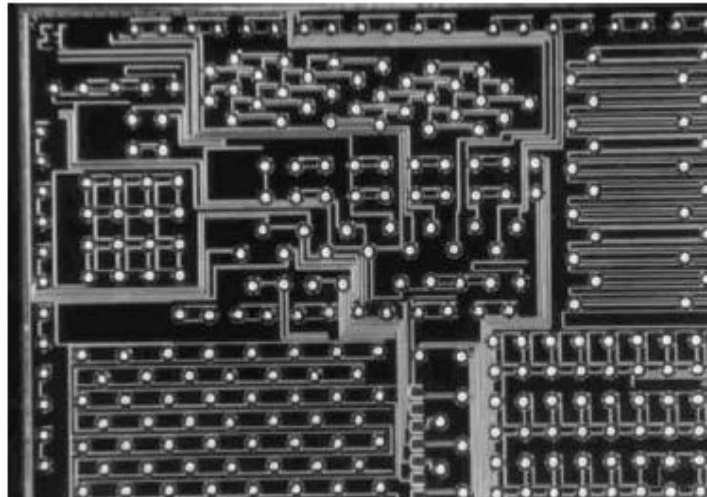
Como se ha mencionado anteriormente, una de las aplicaciones más importantes de esta tecnología es el mercado de la generación de gráficos o dibujos, que consiste en la formación de una imagen coloreada en un sustrato, generalmente papel. Algunos de los factores que influyen son el tiempo de secado, la capacidad de impresión o imprimibilidad de la tinta, la longevidad de la tinta en la cámara de almacenamiento, así como la seguridad y el coste. Aunque el requisito principal sin duda alguna es la latencia de la tinta, es decir, que esta esté lista para realizar la impresión en cualquier momento. La latencia describe el tiempo que puede permanecer la tinta inactiva en la boquilla antes de que ya no sea posible la expulsión. En estas aplicaciones se puede obviar la presencia de una estructura tridimensional, ya que la altura de la deposición resulta insignificante frente a las dimensiones laterales del depósito, considerándose la



componente tridimensional cuando la altura de la deposición sea similar a las dimensiones laterales.

En este contexto se pueden situar el uso de materiales inorgánicos para generar elementos conductores, como pueden ser electrodos. Aunque los electrodos se pueden preparar utilizando tintas poliméricas, se prefieren las tintas que contienen metal debido a los mejores niveles de conductividad que se obtienen, de esta forma se usan tintas basadas en la suspensión de nanopartículas y sales metálicas disueltas en un solvente. De igual modo, el uso de materiales cerámicos como material de impresión permite la generación de estructuras tridimensionales que tienen una gran demanda en áreas tan diversas como el arte y la odontología. Otra aplicación importante es la generación de láseres y pantallas basándose en la fabricación de puntos cuánticos, que son nanocristales semiconductores. Se puede aplicar esta tecnología para la fabricación de transistores, así como en pequeños juegos electrónicos de gama baja. Así mismo también se pueden usar para la fabricación de dispositivos electrónicos de alto rendimiento.

Figura 2.3. Gotas de soldadura en dispositivos electrónicos



Fuente: Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (Brent). Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.

La capacidad de la impresión de inyección de tinta para dispensar volúmenes de picolitro de líquido en lugares definidos, combinada con el uso eficiente del material y la naturaleza de la deposición sin contacto, ha llevado a un interés considerable para su uso en aplicaciones biológicas. El uso de esta tecnología para la fabricación de matrices de biomacromoléculas queda reflejado en la fabricación de microarrays de ADN para estudiar la expresión génica y microarrays de proteínas. También se encuentra en alza la generación de biosensores para el cuidado y seguimiento de la salud del paciente.

Otro campo de aplicación importante es la ingeniería de tejidos. La impresión de material biológico nos proporciona la posibilidad de poder construir geometrías tridimensionales complejas para poder cultivar nuevos tejidos para aplicaciones médicas. Este cultivo va orientado a la disponibilidad de nuevos tejidos para injertos y trasplantes con información genética del propio receptor, reduciendo así la probabilidad de que se produzca el rechazo (Gibson y otros, Capítulo 2) [2].

## 2.6 Futuro

La tecnología por deposición de microgotas tiene ventajas clave para determinadas aplicaciones, aunque bien es cierto que existen algunas restricciones. Algunas son intrínsecas al proceso y parece que no se van a poder resolver a corto-medio plazo, sin embargo, otras pueden resolverse siempre que exista una buena financiación en el desarrollo y fabricación de nuevos dispositivos de impresión. Los investigadores en el mundo académico han expandido el uso de la impresión a materiales como la cerámica y los metales, proporcionando así posibles aplicaciones adicionales para la tecnología. Sin embargo, a pesar de su gran potencial, el crecimiento de la impresión se ha visto obstaculizado significativamente por los desafíos técnicos inherentes al proceso de impresión. Algunas de las mejoras que podrían llevarse a cabo serían reducir el coste de esta tecnología. Algunos autores defienden que los costes de la tecnología de inyección de tinta son pequeños en comparación con otros sistemas de fabricación aditiva, incluyendo los beneficios de una gran escalabilidad y flexibilidad, así como una reducción importante de los residuos. Sin embargo, el precio de un sistema de desarrollo comercial de tinta con cabezal de impresión, sistema electrónico y sistema de inyección puede alcanzar entorno a los 100.000 dólares, por lo que hace que no se encuentre al alcance de todo el mundo. Si algún día los costes de impresión y de su tecnología se reducen su uso se generalizará. Otra limitación es el tipo de fluidos a imprimir, cuando la tecnología sea capaz de manejar una gama más amplia de fluidos el desarrollo de la generación de estructuras tridimensionales adquirirá una mayor utilidad.

Se espera que en un futuro cercano se reduzca la complejidad para poder trabajar con la deposición de microgotas y no sea necesario convertirse en expertos de la materia cuando se quiera desarrollar un nuevo producto, de igual modo, reduciendo esta complejidad se permitirá un acercamiento de esta tecnología a las industrias permitiendo así un mayor desarrollo y una mejor implementación en el mercado (Gibson y otros) [2].

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIALES, EQUIPO Y METODOLOGÍA**

#### **3.1. Material**

La tecnología de la fabricación aditiva se desarrolló originalmente para materiales poliméricos y ceras, aunque con el paso de los años se ha producido la introducción de composites, metales y cerámicos. Entre los materiales más estudiados y prometedores para las aplicaciones futuras se encuentran los polímeros, cerámicos y metales. Se introducirá a continuación una breve exposición a cerca de estos materiales y su uso en la fabricación aditiva. Los polímeros abarcan una enorme clase de materiales con diferentes propiedades mecánicas y aplicaciones. Solo una pequeña parte de todos estos materiales son usados en las máquinas de impresión actuales, aun así, los polímeros son los materiales usados en casi la totalidad de la industria.

En cuanto a los materiales cerámicos se ha producido un avance significativo en términos de impresión de estructuras tridimensionales. Se realizaron una serie de experimentos con mezcla de polvo de circonio, solvente y otros aditivos. Sin embargo, se realizaron experimentos donde se imprimieron capas y la deposición resultante fue desigual, con crestas y valles en toda la superficie. Si hablamos de materiales metálicos la mayor parte de la aplicación se ha centrado en la formación de trazas, conexiones y soldaduras. Liu y Orme [16] presentaron una visión general del proceso de deposición de gotas de soldadura en la industria electrónica. El bajo punto de fusión que presentan

las aleaciones de estaño - plomo las hace ideales para este tipo de aplicaciones. Se han llevado a cabo algunos trabajos en la fabricación de estructuras puramente tridimensionales con metales tales como cobre o aluminio, pero el punto de fusión puede llegar a ser lo suficientemente alto como para dañar significativamente los componentes del sistema de impresión.

En este trabajo el material a usar será parafina 1260 A fabricada por *The International Group, Inc.* Se ha decidido el uso de un material de este tipo por las buenas prestaciones que presentan las parafinas en general, ya contrastadas en experimentos anteriores realizados por el área de Fabricación de la UPCT, como por ejemplo el bajo punto de fusión del material. Algunas de las características físicas más importantes del material vienen recogidas en la siguiente tabla.

Tabla 3.1 Propiedades físicas de la parafina 1260

Propiedades físicas de la parafina 1260 A						
Temperatura de fusión	Densidad	Calor específico	Conduct. térmica	Calor latente de fusión	Viscosidad dinámica	Tensión superficial
K	kg/m <sup>3</sup>	J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	W·(m·K) <sup>-1</sup>	J/kg	Pa·s	N/m
342.4	771.0	2560.0	0.237	226 x 10 <sup>3</sup>	0,0054	0,0224

Fuente: The International Group, Inc.

Como se verá posteriormente, la generación de gotas se realiza a partir de tecnología *drop on demand* (DOD). Se trata de un proceso complejo, en el cual el comportamiento del fluido es de gran importancia para asegurar la viabilidad del proceso de impresión. Por ello resulta necesario caracterizar el comportamiento del fluido a partir de algunos números adimensionales, los cuales resultan de gran utilidad en el campo de la mecánica de fluidos. Existe una gran cantidad de números adimensionales, pero para el caso que nos ocupa, se ha establecido que los números adimensionales verdaderamente útiles son los conocidos como números de Reynolds, Weber y Ohnesorge.

$$Re = \frac{v\rho x}{\mu} \quad (3.1)$$

$$We = \frac{v^2\rho x}{\gamma} \quad (3.2)$$

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{(\gamma\rho x)^{1/2}} \quad (3.3)$$

$$Z = \frac{1}{Oh} \quad (3.4)$$

Donde  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\gamma$  son propiedades del fluido, densidad, viscosidad dinámica y tensión superficial respectivamente,  $v$  es la velocidad de la gota y  $x$  es la longitud característica de esta, que será su diámetro. (Gibson, I. y otros) [3].

Los primeros trabajos orientados a entender los mecanismos de formación de microgotas fueron realizados por Fromm [10]. Fromm identificó el número de Ohnesorge como el número adimensional que agrupaba todas las constantes físicas necesarias para caracterizar la formación de gotas. Concretamente utilizó el parámetro  $Z$ , definido en la ecuación 3.4. Fromm propuso que un valor de  $Z > 2$  proporcionaba una generación de gotas adecuada. Posteriormente los investigadores Reis & Derby [11] consiguieron mejorar lo propuesto por Fromm y llegaron a la conclusión de que para conseguir una generación de gotas estables era necesario que el valor de  $Z$  oscilara entre 1 y 10. Según estos autores, si  $Z < 1$  la importancia del término de disipación viscosa era lo suficientemente elevada como para impedir la eyección de las gotas, por el contrario si  $Z > 10$  se producía la generación de gotas satélite.

De igual modo Duineveld y otros [12] propusieron que la gota debe tener la suficiente energía como para superar la barrera de tensión superficial en la interfase fluido/aire en la boquilla. Esa velocidad mínima se puede expresar en términos de la tensión superficial, el diámetro de la boquilla y la densidad del fluido.

$$v_{min} = \left( \frac{4\gamma}{\rho d_n} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

La ecuación 3.5 se puede reformular usando el número de Weber. Duineveld llegó a la conclusión de que dicho número debería ser mayor que cuatro para que la gota tuviese la suficiente energía que permitiese su eyección fuera de la boquilla.

$$We = v_{min} \left( \frac{\rho d_n}{\gamma} \right) > 4 \quad (3.6)$$

Del mismo modo pueden surgir problemas de salpicaduras a la hora de impactar la gota con el sustrato. Stow & Hadfield [17] establecen la siguiente desigualdad:

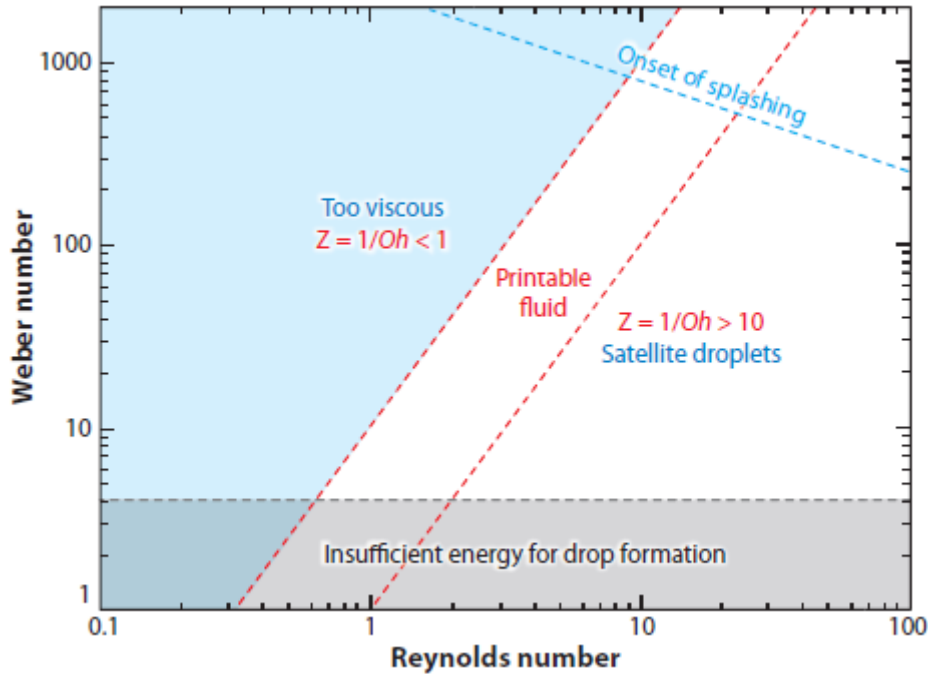
$$We^{1/2} Re^{1/4} > f(R) \quad (3.7)$$

Estos investigadores demostraron que para valores de  $f(R) > 50$  el riesgo de salpicaduras se hace considerable. Todo lo anterior se puede combinar para formar una gráfica que ilustra las diferentes regiones posibles en la impresión DOD. Estas regiones vienen determinadas por las relaciones entre los números de Weber y Reynolds, situados en el eje de ordenadas y abscisas respectivamente. Se observan las diferentes regiones que se han definido con las ecuaciones anteriores:

- Región de energía insuficiente para la formación de gotas (*Ec. 3.6.*).
- Región en la que los términos viscosos son demasiado grandes para permitir una correcta expulsión de la gota.
- Región en la que se forman gotas satélites.

- Región en la cual se cumplen las condiciones para una generación de gotitas idónea.
- Región en la que se generan salpicaduras (*Ec. 3.7*).

Figura 3.1. Diferentes regímenes en función de las propiedades del fluido en impresión DOD

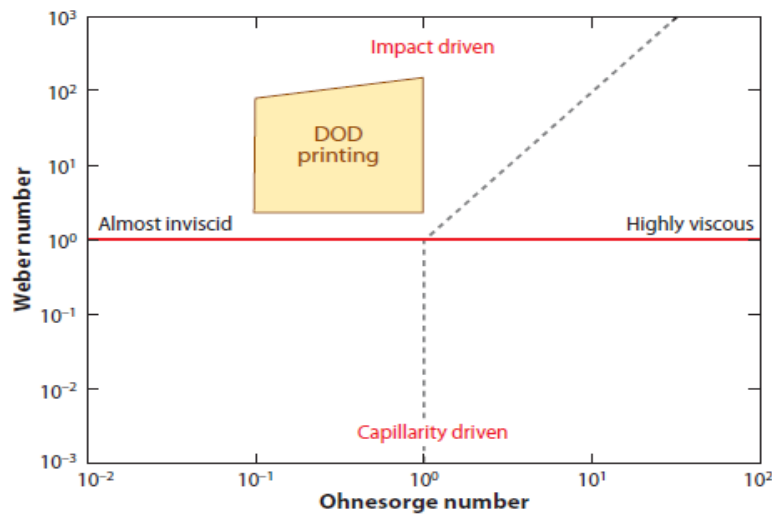


Fuente: Derby, B. & Reis, N. Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions. MRS Bull. 28, 815–818 (2003).

Como se ha mencionado anteriormente, los principales números adimensionales en la deposición de microgotas son los números de Reynolds, Weber y Ohnesorge, pero también se puede considerar el conocido como número de Bond,  $B_o = \rho g x^2 / \gamma$ . Este número trata de cuantificar la influencia de las fuerzas gravitacionales en el movimiento. Sin embargo, y como se razonará posteriormente, esta influencia puede considerarse despreciable, ya que las fuerzas dominantes serán las de inercia y las capilares. Schiaffino & Sonin [14] propusieron que el comportamiento de la gota al impactar puede dividirse en dos regímenes: un régimen de impacto en el cual dominan las fuerzas inerciales y un régimen en el proceso de deposición sobre el sustrato o sobre una gota depositada previamente, en el que predominan las fuerzas de capilaridad. Además, caracterizaron la resistencia de la gota a expandirse en el sustrato a partir del número de Ohnesorge, y definieron otros dos regímenes: un régimen viscoso y otro no viscoso (Derby, B. y otros) [3].

Todo lo expuesto anteriormente aparece representado gráficamente en la *figura 3.2*, donde se pueden observar los diferentes regímenes de impacto de la gota en el sustrato en función de los números de Weber y Ohnesorge, así como una región determinada en la cual suelen encontrarse los fluidos propios de la impresión DOD [14].

Figura 3.2. Regímenes dominantes en la impresión DOD



Fuente: Schiaffino, S. & Sonin, A. A. Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers. Phys. Fluids 9, 3172–3187 (1997).

## 3.2. Equipos y software

### 3.2.1. Estación de impresión JetLab

En primer lugar, se expondrá una breve descripción de los componentes principales de la máquina de impresión usada en el trabajo y a continuación se analizarán con mayor detalle. El objetivo es introducir los aspectos básicos acerca de la instrumentación utilizada en el trabajo. De este modo podemos distinguir los siguientes componentes principales de la máquina de impresión:

- Micro dispensador de chorro de tinta o microchorro: se trata de un generador de gotas accionado piezoeléctricamente.
- Tubos, conectores y depósito: incluye los componentes encargados del almacenamiento y distribución del material de trabajo.
- Equipamiento electrónico: este tipo de impresoras necesitan de un piezoeléctrico para la producción de gotas.
- Controladores de presión: un correcto control de la presión en el depósito resulta necesario para evitar que el fluido escape constantemente por la boquilla debido a la acción de la gravedad.
- Cámara de observación y monitor de video para permitir la visualización adecuada del proceso de formación y deposición de la gota usando la sincronización entre un LED y la caída de la gota.

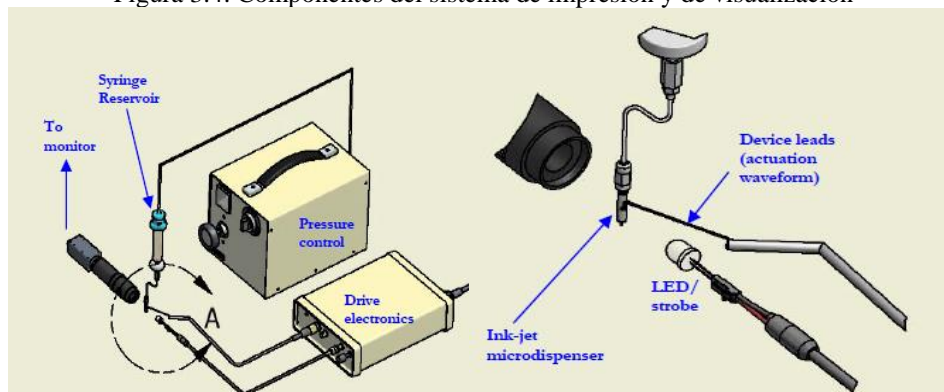
Figura 3.3. Equipo de impresión empleado. Principales características técnicas



Subsystem	Standard	Optional
X-Y travel	160 X 120 mm printable area	210 X 260 mm printable area (4xl)
Velocity / Acceleration	50 mm/s / 1500 mm/s <sup>2</sup>	
Accuracy / Repeatability	±30µm unidirectional / ±20µm	±25µm / ±5µm (4xl-A)
Computer	Panel PC; monitor, keyboard and mouse; Windows 7; USB 2.0 & Ethernet ports; DVDRW	
Pneumatics	Precision pressure/vacuum regulator with digital readout for jet operation; three state pneumatic control	Electronic control; pressure/vacuum regulator and three state pneumatics
Vision	Horizontal camera at 15° for jet setup, print observation, alignment to features	Vertical camera for alignment, inspection Drop and fiducial image analysis software
Printheads & Jetting Devices	Select one or more (not included in base price)	Choose from PH-41, PH-41H & PH-47 xl versions: Mounts all MicroFab standard printheads; Interchangeable
Complex Print Jobs	Script file: nesting, repetition with offsets, wait states, maintenance, & TTL controls; arbitrary printing resolution and direction	
Print Modes	Print-on-the-Fly and Point-to-Point	
Jet Drive Electronics	JetDrive™ V: bipolar and arb mode	

Fuente: [www.microfab.com](http://www.microfab.com)

Figura 3.4. Componentes del sistema de impresión y de visualización



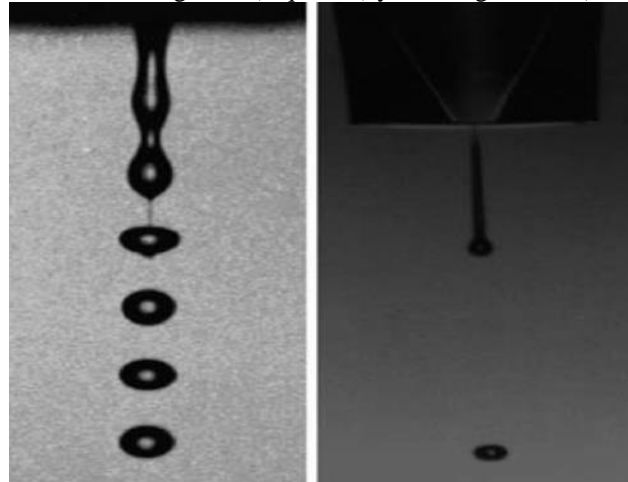
Fuente: Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up General Notice. (2012).



### 3.2.1.1. Principio de operación

A grandes rasgos existen dos métodos para la formación y proyección de las gotas. En función de cómo se expulsa el líquido de la boquilla se puede distinguir entre aquellas impresoras que expulsan el líquido como una columna continua de líquido (CS) o aquella que lo hace como gotas discretas (DOD). En la siguiente imagen se puede observar la diferencia entre ambas [2].

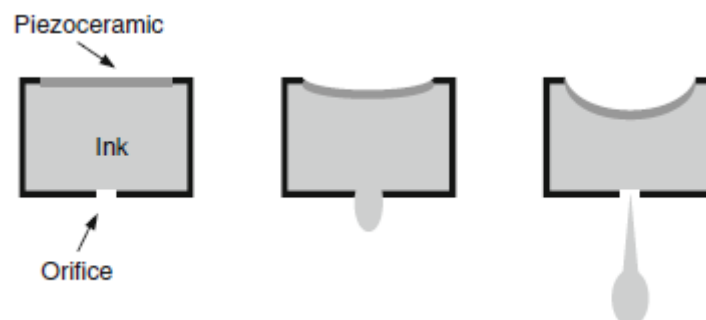
Figura 3.5. Tecnología CS (Izquierda) y tecnología DOD (Derecha)



Fuente: Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (Brent). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.

La máquina de impresión con la que se realizó este trabajo está basada en la tecnología DOD, en la cual las gotas individuales se forman directamente desde la boquilla de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro y se depositan a una temperatura de 85  $^{\circ}\text{C}$ . Para generar esas gotas son necesarios pulsos de presión individuales en la boquilla, para crear estos pulsos de presión se utilizan diferentes elementos como pueden ser actuadores térmicos, electrostáticos, acústicos y piezoeléctricos [2]. Concretamente, la impresora utilizada en el trabajo se basa en un piezoeléctrico para la generación de gotas.

Figura 3.6. Funcionamiento del piezoeléctrico

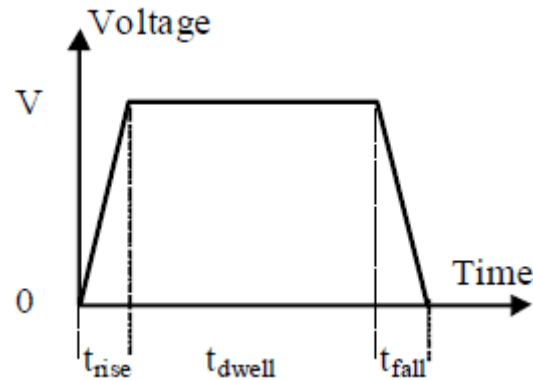


Fuente: Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (Brent). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.

Al aplicarse una diferencia de voltaje, se genera un campo eléctrico entre los electrodos antes mencionados. Este campo eléctrico provoca que el piezoeléctrico se deforme en la región cercana a los electrodos. La señal de voltaje tiene una forma como

la de la figura 3.7, en esta aparece una señal muy simple que se caracteriza por una forma trapezoidal que se aplica a uno de los electrodos, el otro permanece conectado a tierra. La deformación del piezoeléctrico ocurre durante los tiempos de subida y bajada de la onda, mientras la señal permanece constante la deformación es nula [18].

Figura 3.7. Ejemplo de señal aplicada



Fuente: Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up General Notice. (2012).

La deformación del piezoeléctrico reduce el volumen del depósito donde se encuentra el material fundido, provocando la rotura del equilibrio y las salidas de las gotas desde la boquilla a causa de diferentes ondas de presión expansiva y compresiva que se generan a partir de dicha deformación. Modificando la duración, la amplitud y otros parámetros de la onda se pueden generar gotas de diferentes tamaños. La siguiente secuencia de imágenes muestra a la perfección como se genera la gota en la boquilla. En primer lugar, se observa como en la condición de equilibrio el fluido se encuentra enrasado en la boquilla y todavía no ha comenzado a producirse la gota. En la segunda imagen se produce la llegada de la onda de presión expansiva generada por el piezoeléctrico, provocando el cese de esa condición de equilibrio. Una vez que la onda de compresión alcanza la boquilla el líquido emerge, como se observa en la tercera imagen. Cuando se produce la llegada de otra onda de expansión al orificio se produce la rotura del fluido y este sale de la boquilla alcanzando la forma esférica característica por efectos de la tensión superficial [18].

Figura 3.8. Generación de gotas (DOD)

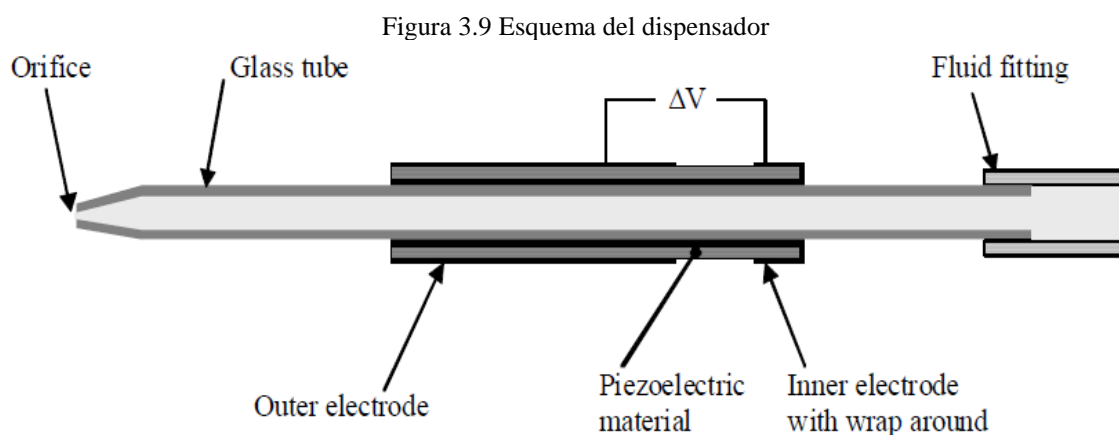


Fuente: Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up General Notice. (2012).

Hoy en día la tecnología DOD basada en piezoeléctrico es la más usada en las máquinas de impresión, debido al menor tamaño de gota que se consigue y a la mayor precisión frente a la impresión por modo continuo (CS). Además, el piezoeléctrico resulta más respetuoso con componentes sensibles de la máquina que los calentadores térmicos, ya que el calentamiento que producen puede llegar a resultar perjudicial [2].

### 3.2.1.2. Dispensador

Los dispensadores fabricados por *MicroFab* se accionan con un piezoeléctrico. El piezoeléctrico se encuentra unido a un tubo de vidrio con una boquilla y un orificio, el tubo se monta en una carcasa protectora y se une a un accesorio. El actuador anular tiene electrodos en las superficies exterior e interior. El electrodo interno se envuelve alrededor de la superficie exterior para facilitar la conexión eléctrica; Los cables de calibre pequeño se sueldan al electrodo externo y alrededor del electrodo interno; los cables están colocados juntos en un conector que coincide con el cable de salida de la caja electrónica *JetDrive™* de *MicroFab* [18].



Fuente: Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up General Notice. (2012).

### 3.2.1.3. Almacenamiento y distribución de fluidos

- Conductos y conexión al dispositivo

Se trata simplemente de conductos de teflón o en casos especiales se pueden usar conductos de materiales resistentes a químicos si el fluido de trabajo así lo requiere. Las conexiones de estos conductos son simples juegos de rosca macho y hembra [18].

- Depósito de almacenamiento de material
- Filtro

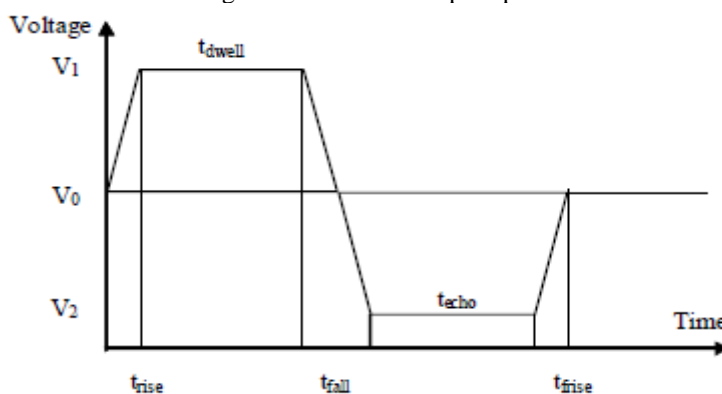
En determinadas impresoras se encuentran presentes una serie de filtros con el objetivo de retener partículas que podrían obstruir el orificio por el que se eyectan las gotas. Es importante señalar que el material del que se compone el filtro debe ser compatible y químicamente inerte ante el material de impresión [18].

### 3.2.1.4. Electrónica de accionamiento

- Tipos de señales

El objetivo principal de esta circuitería electrónica es la generación de la señal voltáica que se aplica sobre el piezoeléctrico. Las señales que se aplican pueden adquirir diferentes valores y características, incluso puede ocurrir que una señal que ha resultado adecuada para generar gotas correctamente no sirva al día siguiente, por lo que la variabilidad de estas señales es enorme, pudiendo llegar a resultar tedioso a la hora de trabajar con estas impresoras debido al proceso de calibración que hay que realizar para ajustar la onda de voltaje para que se generen las gotas correctamente. Algunas señales pueden tener una forma muy simple, como la mostrada en la *figura 3.7*, sin embargo, no es lo habitual. Por regla general, el tipo de señales que suelen proporcionar una adecuada generación de gotas son de tipo “bipolar”, las cuales incluyen un pulso negativo, como la mostrada en la *figura 3.10*.

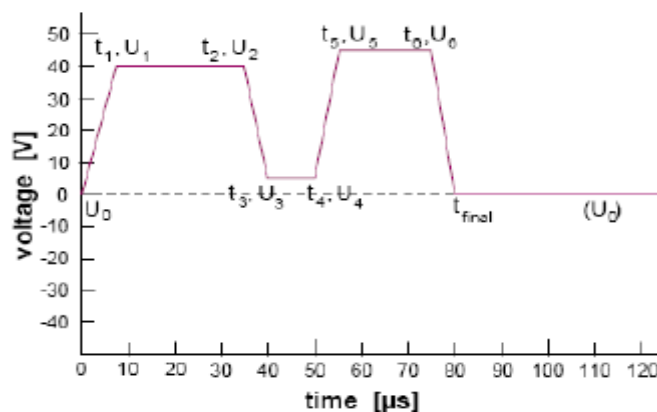
Figura 3.10. Señal de tipo bipolar



Fuente: Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up General Notice. (2012).

La forma de dichas señales puede complicarse todavía más, esto ocurre normalmente cuando se intenta minimizar la formación de gotas satélites, o bien para la generación de gotas de diámetro menor o mayor que el diámetro del orificio de la boquilla. En estos casos el pulso negativo de la onda no tiene por qué alcanzar un valor negativo, como se ilustra en la *figura 3.11*.

Figura 3.11. Señal compleja



Fuente: Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up General Notice. (2012).

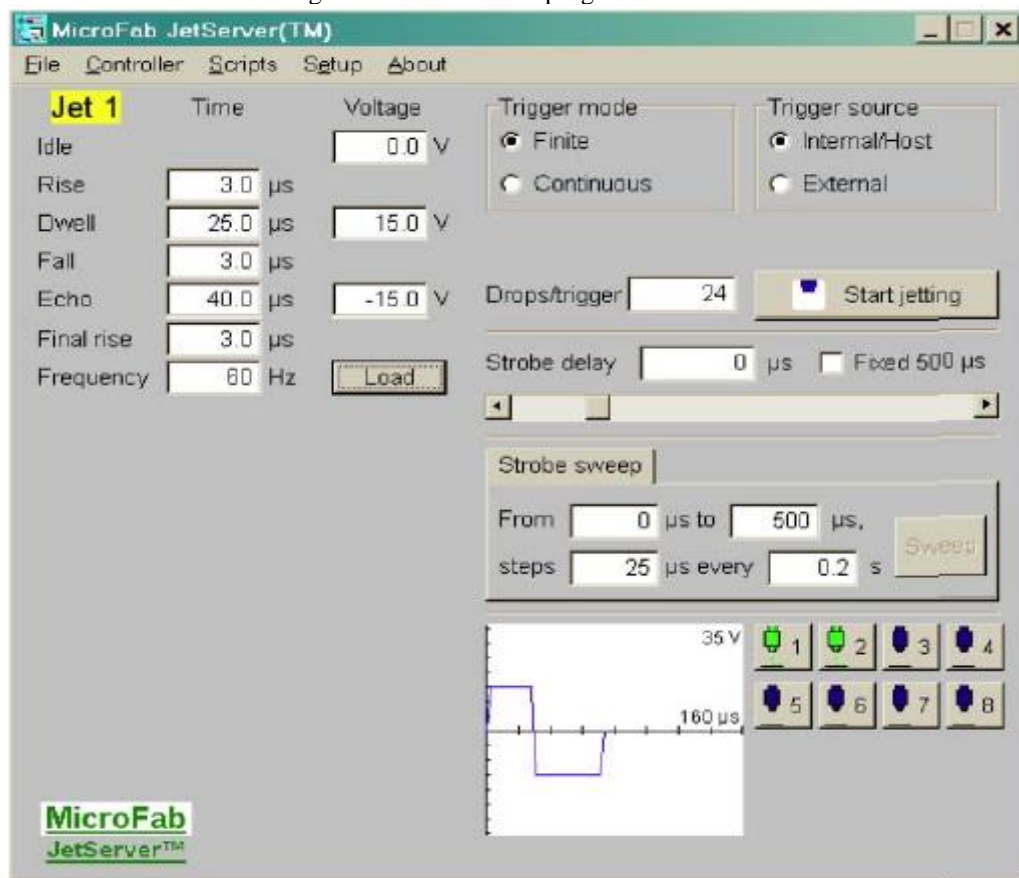
- Valores de voltajes y tiempos

Los tiempos representados en las imágenes anteriores se encuentran en el orden de los microsegundos, aunque los “tiempos de espera” y de “eco” pueden ser incluso de cientos de milisegundos. El control de los tiempos resulta fundamental para conseguir la estabilidad idónea en la generación de gotas. En cuanto a los valores de voltaje de la onda estos pueden ser muy variables de un experimento a otro, como ya se ha mencionado anteriormente. El tipo de onda o señal usada en este trabajo para evitar la generación de gotas satélites, por lo general, será del tipo compleja, como la mostrada en la *figura 3.11*. Los valores de la “meseta” superior rondan los 100V mientras que los de la “meseta” inferior rondan los 60-70 V.

### 3.2.1.5. Configuración de la señal

El programa de control asociado permite al usuario modificar la forma de la señal, así como la frecuencia de generación de caída y el número de gotas generadas. Como se observa en la siguiente figura, el programa permite la modificación de los distintos tiempos característicos de la onda. Del mismo modo aparece la opción de *strobe delay*, que nos permite variar el desfase existente entre los pulsos de luz generados por el LED y la dispensación de gotitas en la boquilla, con el objetivo de poder obtener un seguimiento completo del trayecto de la gota entre la boquilla y el sustrato.

Figura 3.12 Interfaz del programa de control



Fuente: Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up General Notice. (2012).

### 3.2.1.6. Controladores de presión

Para que el sistema de inyección funcione correctamente el fluido debe estar enrasado en la boquilla, justo en la separación boquilla-aire. Si la interfase fluido/aire se encuentra en el interior de la boquilla, las ondas de presión no tienen la suficiente energía para desplazar el fluido hacia delante y expulsarlo del orificio, si por el contrario la interfase se encuentra fuera de la boquilla se puede formar una “piscina” de fluido que impida la generación de gotas produciendo un colapso, siendo necesaria la parada de la máquina para limpiar el orificio embozado. Para conseguir esta condición de enrase, la tensión superficial y las fuerzas de presión hidrostática deben equilibrarse. Para mantener la interfase fluido/aire en las condiciones adecuadas se necesita una presión hidrostática negativa. Se podría lograr colocando el depósito de fluido por debajo del orificio, sin embargo, por razones constructivas se coloca por encima, por lo que para conseguir esa presión negativa o presión de vacío se utiliza una línea de vacío a partir de una toma disponible en el laboratorio. En caso de no existir la presencia de una línea de esas características sería necesario recurrir a una bomba de vacío.

### 3.2.1.7. Sistema de visualización. Cámara y monitor

Mientras se está produciendo la formación de las gotas resulta totalmente útil su observación y seguimiento para ser capaz de identificar problemas, así como para controlar las características de caída de la gota, como el diámetro, la dirección y la velocidad. Las cámaras de alta velocidad pueden servir para tal propósito, sin embargo, resultan demasiado caras, existiendo otra posibilidad mucho más económica. La visualización puede conseguirse utilizando la iluminación sincronizada.

Esta tecnología consiste en un diodo emisor de luz (LED) que está ubicado en el lado opuesto de la cámara, con la boquilla dispuesta entre ambos. El LED se enciende mediante un pulso que se encuentra a la misma frecuencia que la generación de caída de las gotas, y por tanto sincronizado con ella. A partir de un retardo ajustable (*strobe delay* antes mencionado) se puede “congelar” la caída a lo largo de la trayectoria de la gota para permitir su observación, como aparece en la *figura 3.5*. Cabe destacar que en la iluminación estroboscópica no se observa una gota individual, lo que en realidad se observa es una colección de gotas que se superponen en la imagen que el usuario observa en el monitor. La duración del pulso que activa el LED debe ser muy corta, en torno a 5  $\mu$ s, con el objetivo de conseguir la captación de la gota. Cuando se trabaja con altas frecuencias de generación de gotas se generan demasiados pulsos de luz y provocan que las gotas no se capten adecuadamente.

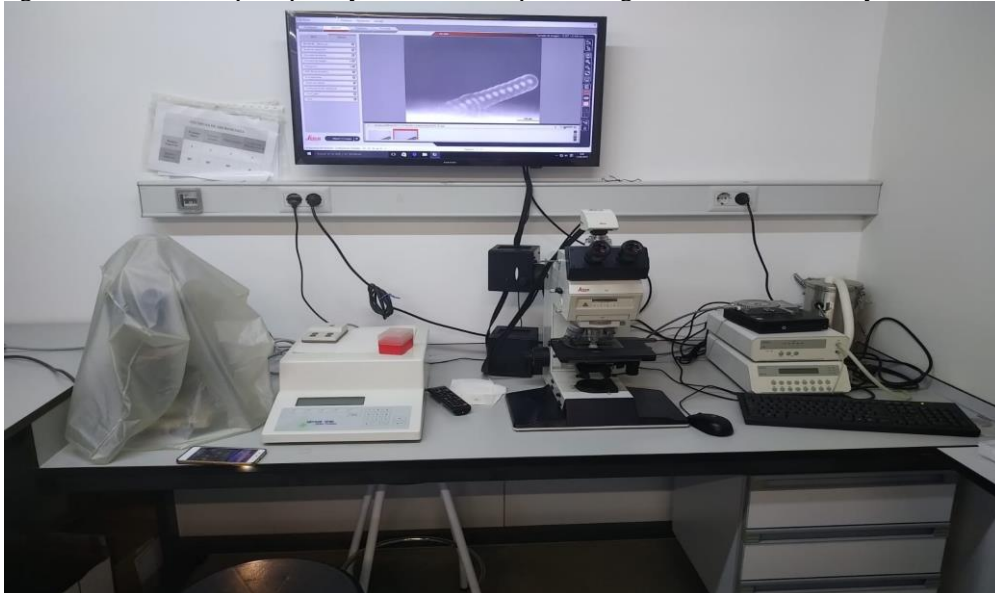
### 3.2.2. Microscopio óptico

Se hará uso de un microscopio óptico Leica presente en el laboratorio del área de Ingeniería de Materiales. El uso de este instrumento resulta totalmente indispensable para la correcta observación de las deposiciones, además nos permite tomar las capturas de imágenes que posteriormente se analizarán con el software de tratamiento de imágenes. El microscopio se encuentra conectado a un ordenador que permite la visualización de las imágenes en tiempo real, un pequeño tratamiento de estas y su captura a partir de un software.

Figura 3.13. Microscopio óptico del Dpto. de Ingeniería de Materiales y Fabricación



Figura 3.14. Microscopio óptico y monitor del Dpto. de Ingeniería de Materiales y Fabricación



### 3.2.3. *Software de tratamiento de imágenes*

El software utilizado es Image-ProPlus 4.1, este software permite el tratamiento de las imágenes obtenidas en el laboratorio a partir del microscopio. Con las herramientas que nos proporciona el software podemos realizar las medidas directas de diferentes parámetros, como el radio de las gotas, la distancia entre centros, etc.

### 3.3. Metodología

#### 3.3.1. Organización del estudio

En el presente apartado, se muestra la planificación de los experimentos realizados en el desarrollo del trabajo. Todas las deposiciones realizadas en este trabajo se han hecho sobre placas de material metálico cuidadosamente pulido, concretamente acero inoxidable 316 L. Primeramente, se ha realizado en una placa individual la deposición de cuatro cordones horizontales de veinte gotas cada uno con un paso o distancia entre centros de 40  $\mu\text{m}$ . El objetivo de estas deposiciones es la cuantificación de lo que se conoce en la bibliografía [9] como índice de *Drawback* y que se explicará con posterioridad en el apartado 3.3.3.

A fin de obtener los parámetros necesarios relacionados con la topología superficial se han realizado otros cuatro experimentos. Cada uno de ellos en una placa diferente y en las mismas condiciones de trabajo. Para cada placa se ha realizado, en primer lugar, la deposición de tres gotas individuales separadas una distancia lo suficientemente elevada (200 micras) para no producirse ningún fenómeno de interacción entre gotas. El objetivo es la obtención del ángulo de solidificación y el diámetro inicial de la gota generada. Teniendo en cuenta que la resolución del cabezal de impresión es de 8 micras, se ha modificado el paso en múltiplos de 8, permitiendo obtener morfologías verticales, inclinadas y horizontales. Comenzando por un paso de 0 y finalizando en 24 micras se ha ido desplazando el cabezal según lo descrito anteriormente, permitiendo obtener columnas verticales e inclinadas formadas por 12 gotas cada una. Partiendo de un paso de 32 hasta 64 micras, se han depositado cuatro cordones horizontales de 15 gotas cada uno, con el objetivo de determinar cuál es la influencia de este en la topología superficial.

Las tablas que se muestran a continuación reflejan la estructura llevada a cabo en los experimentos:

Tabla 3. 2. Características de los experimentos I

Placa 5	Deposición individual	Paso ( $\mu\text{m}$ )	N.º de gotas
	3	200	1
	Cordones	Paso ( $\mu\text{m}$ )	N.º de gotas/cordón
	4	40	20

Tabla 3.3. Características de los experimentos II

Experimentos	Tipo de deposición
Placa 1	Individual Cordones Columnas
Placa 2	
Placa 3	
Placa 4	



Tabla 3.4. Características de los experimentos III

PLACA $i$ ( $i = 1,2,3,4$ )	Deposición Individual	Paso ( $\mu\text{m}$ )	N.º de gotas
	3	200	1
	Columnas	Paso ( $\mu\text{m}$ )	N.º Gotas/columna
	4	0	12
		8	
		16	
		24	
	Cordones	Paso ( $\mu\text{m}$ )	N.º Gotas/cordón
	5	32	15
		40	
48			
56			
64			

Tabla 3.5. Objetivos, variables medidas y resultados I

<i>Drawback</i>		
Objetivo	Variables medidas	Resultados
Cuantificar la influencia del <i>Drawback</i>	Longitud real de los cordones $D_y$	Índice de cuantificación del <i>Drawback</i> $\phi$
	Diámetro sobre el sustrato $D_s$	

Tabla 3.6. Objetivos, variables medidas y resultados II

Gotas individuales		
Objetivos	Variables medidas	Resultados
Caracterizar geoméricamente la gota generada	Altura del casquete $h$	Diámetro de la gota generada $D$
	Ancho del casquete $a$	
	Radio del casquete $R_c$	Ángulo de solidificación $\theta$
	Distancia centro de la gota y sustrato $y$	

Tabla 3.7. Objetivos, variables medidas y resultados III

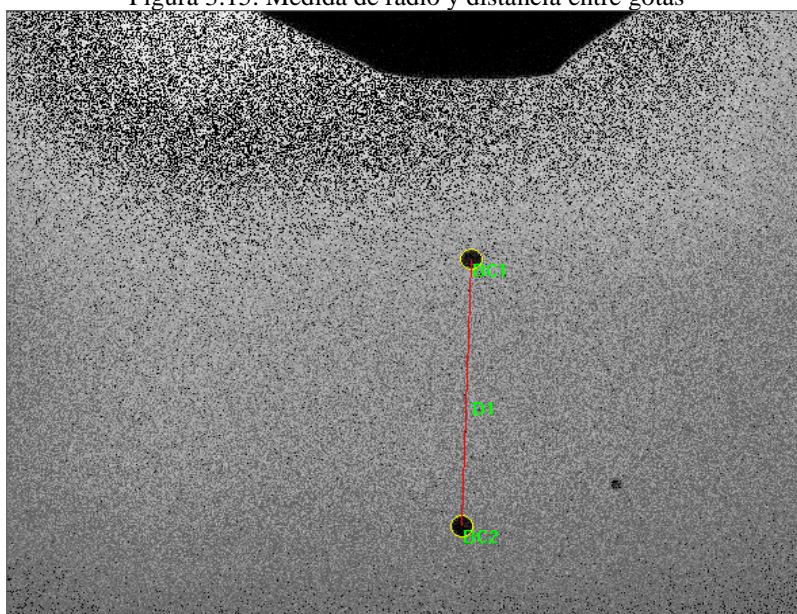
Cordones horizontales		
Objetivos	Variables medidas	Resultados
Validación de los modelos teóricos	Distancia entre centros $W_x$	Rugosidad experimental $R_a$
	Diámetro del casquete esférico $D_c$	

En el presente TFG nos centraremos en el estudio del *Drawback* y el estudio de la influencia del paso o *scan step* en cordones horizontales. El estudio de las columnas verticales e inclinadas aparece en otro TFG referenciado en la bibliografía y por ello no se adjunta ninguna tabla que detalle ese experimento [19].

### 3.3.2. Cálculo de números adimensionales

En primer lugar, debemos caracterizar el movimiento de la gota desde su salida por la boquilla hasta su deposición en el sustrato. Para ello se recurrirá a la obtención de los números adimensionales antes mencionados. Se realizó la deposición de gotas en el laboratorio y se captó una secuencia de imágenes espaciadas  $50 \mu\text{s}$  en el tiempo. Utilizando un software de tratamiento de imagen podemos superponer las dos imágenes más distanciadas en el tiempo, sabiendo que ambas están separadas por un intervalo de tiempo de  $300 \mu\text{s}$  y conociendo la distancia entre centros podemos obtener la velocidad de la gota (obviamos los efectos gravitacionales y de aceleración debido a la corta distancia entre boquilla y sustrato).

Figura 3.15. Medida de radio y distancia entre gotas



Del tratamiento de la imagen podemos obtener las medidas del radio de la gota, así como la distancia entre centros. Cabe destacar que se trata de datos estimativos puesto que la imagen carece de la suficiente resolución.

Tabla 3.8. Radio y distancia entre centros

	R ( $\mu\text{m}$ )	Distancia entre centros ( $\mu\text{m}$ )
BC1	34,62	90,92
BC2	35,70	

Para el radio de la gota tomaremos el valor medio entre los dos valores medidos. Con las ecuaciones expuestas en el apartado 3.1 podemos obtener los diferentes números adimensionales:

Tabla 3.9. Valores de los números adimensionales que afectan al proceso

T (s)	0,0003
V (m/s)	3,03
R (μm)	35,16
Re	30,43
We	22,23
Ohnesorge	0,15
Z	6,45
Bo	0,0017
$We^{1/2} \cdot Re^{1/4}$	11,07

Observamos que:

$$1 < Z < 10$$

$$Bo \ll 1$$

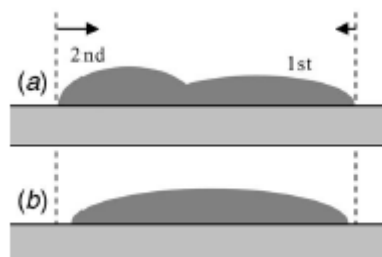
$$We^{1/2} \cdot Re^{1/4} < 50$$

Por tanto se cumplen las condiciones indicadas en el apartado 3.1 para una correcta impresión del fluido, lo cual se puede observar gráficamente en las figuras 3.1 y 3.2

### 3.3.3. Estudio del Drawback

Cuando se produce la deposición de las gotas sobre un sustrato, estas, en el equilibrio, tienden a alcanzar aquella forma que minimiza la energía superficial adquiriendo una forma característica de casquete esférico. Pero puede ocurrir que en el intervalo de tiempo en el que se alcanza esta forma final los bordes de las gotas se retraigan en la dirección del eje que une los centros de las diferentes gotas. A este fenómeno se le denomina retroceso, retracción o *Drawback* y puede tener gran influencia en los procesos de fabricación que requieren una gran precisión en la colocación de las gotas sobre un sustrato. La siguiente imagen ilustra a la perfección el fenómeno mencionado:

Figura 3.16. Drawback entre dos gotas



Fuente: Li, R., Ashgriz, N., Chandra, S., Andrews, J. R. & Williams, J. Drawback During Deposition of Overlapping Molten Wax Droplets. *J. Manuf. Sci. Eng.* **130**, 041011 (2008).

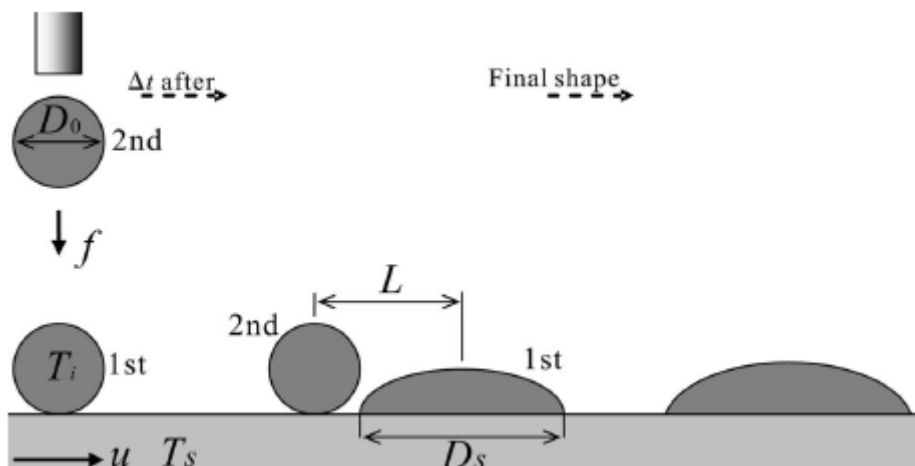
Dos gotas se depositan secuencialmente y se unen sobre el sustrato, una vez que la segunda gota alcanza su extensión máxima ambas se retraen (*Figura 3.16 (b)*). Se puede observar que la retracción no ocurre por igual en las dos gotas, sino que existe una diferencia debido a que la primera gota solidifica antes que la segunda, siendo esta última aquella que más se retrae.

El equipo de investigadores encabezado por Nasser Ashgriz propuso un método experimental que permitiese cuantificar la importancia del *Drawback* en una deposición horizontal de gotas [9]. El experimento consistió en la deposición de dos gotas de cera de manera consecutiva. Cuantificando el *Drawback* a partir de un coeficiente  $\phi$ .

$$\phi = \frac{D_y}{W_x + D_s} \quad (3.8)$$

Siendo  $D_y$  la longitud real que tiene la unión de ambas gotas,  $D_s$  es el diámetro de propagación de una gota sobre el sustrato y  $W_x$  el paso o distancia entre centros de ambas gotas. Lo ideal sería que  $\phi \cong 1$ , ya que implicaría que apenas se produce el fenómeno de *Drawback* y este se puede considerar despreciable por tener poca o nula influencia ( $\phi = 1$ ).

Figura 3.17. Experimento

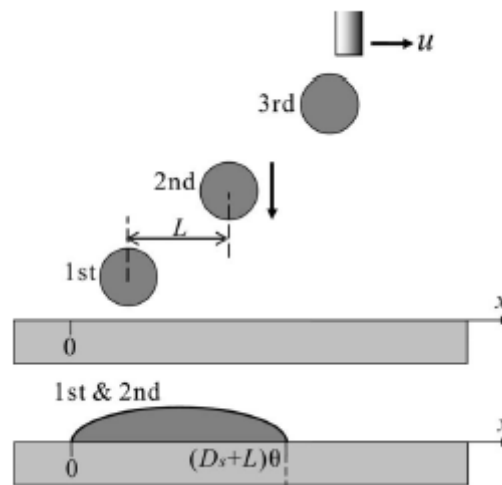


Fuente: Li, R., Ashgriz, N., Chandra, S., Andrews, J. R. & Williams, J. Drawback During Deposition of Overlapping Molten Wax Droplets. *J. Manuf. Sci. Eng.* **130**, 041011 (2008).

Se llegó a la conclusión que cuanto mayor sea la frecuencia de deposición de las dos gotas el valor de  $\phi$  se aleja de 1 y el *Drawback* tiene una influencia importante en la deposición, lo cual ocurre porque la primera gota no ha solidificado cuando la segunda se deposita y se produce la coalescencia entre las dos masas líquidas. Por el contrario, si la frecuencia de deposición es baja, la primera gota ya ha solidificado cuando la segunda se deposita, alcanzando  $\phi$  valores cercanos a la unidad. Nuestros experimentos se realizarán a frecuencias muy bajas, concretamente de 1 Hz, por lo que será de esperar que no se produzca *Drawback*, y si se produce, que no lo haga de manera significativa.

Nuestros experimentos consistirán en la deposición de líneas horizontales de 20 gotas, el procedimiento resulta similar al explicado anteriormente para dos gotas, tal como se puede ver en la siguiente figura:

Figura 3.18. Experimento



Fuente: Li, R., Ashgriz, N., Chandra, S., Andrews, J. R. & Williams, J. Drawback During Deposition of Overlapping Molten Wax Droplets. *J. Manuf. Sci. Eng.* **130**, 041011 (2008).

*Nota: en las figuras 3.17 y 3.18 la distancia entre centros  $W_x$  y el diámetro inicial de la gota generada  $D$  aparecen denominados como  $L$  y  $D_o$  respectivamente.*

Como se ha comentado, se realizarán cuatro cordones de 20 gotas y se obtendrá el valor de  $\phi$ . Para ello seleccionaremos un paso concreto que programaremos mediante *scripts* en nuestra impresora, se realizarán las pertinentes deposiciones y se observarán en el microscopio óptico. Una vez obtenidas las imágenes adecuadas en el laboratorio, estas se analizarán mediante el software de análisis de imagen y se obtendrá la longitud real de los cordones horizontales  $D_y$  y el diámetro de propagación sobre el sustrato  $D_s$ , el cual se medirá sobre las tres gotas individuales que se depositarán junto a los cordones horizontales. De forma que:

$$\phi = \frac{D_y}{D_s + (m - 1)W_x} \quad (3.9)$$

Siendo  $m$  el número de gotas que componen cada cordón, en nuestro caso  $m=20$ .

### 3.3.4. Medida experimental del ángulo de solidificación y del diámetro inicial de la gota generada

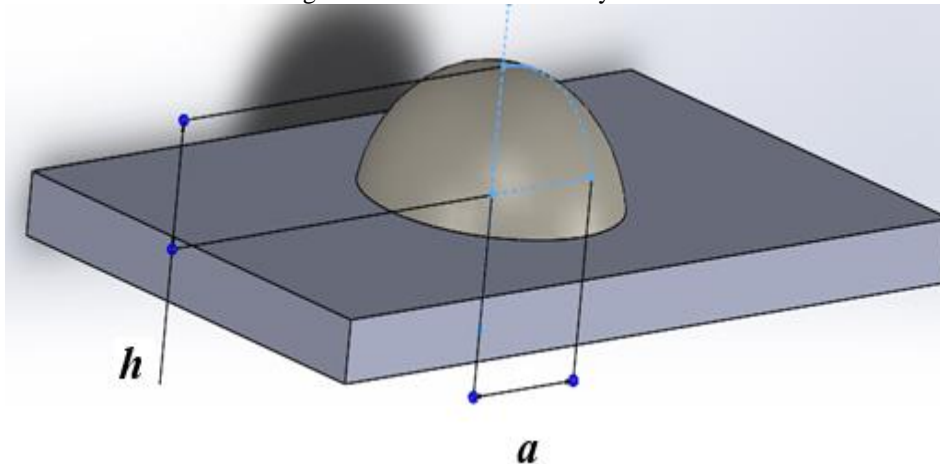
Para el cálculo teórico de la rugosidad y de la distancia entre centros o paso ideal  $W_{op}$  habrá que conocer previamente el valor del ángulo de solidificación entre gota y sustrato  $\theta$ , así como el diámetro inicial de la gota en la salida de la boquilla  $D$ , para ello, cada vez que vayamos a realizar algún experimento, como la deposición horizontal de 20 gotas en el estudio de *Drawback*, se realizará la deposición de 3 gotas individuales separadas una distancia de 200  $\mu\text{m}$  para asegurarnos de que no exista interacción alguna entre gotas. Una vez realizadas estas deposiciones llevaremos las placas que sirven como sustrato al microscopio y obtendremos las imágenes más adecuadas que nos

permitan obtener los parámetros buscados usando el software de tratamiento de imagen. Se obtendrá el ángulo de solidificación  $\theta$  y el diámetro  $D$  a partir de una serie de modelos geométricos que aplicaremos sobre las imágenes de esas tres gotas, y supondremos que dichos parámetros permanecen estacionarios para las gotas que se imprimirán en los cordones horizontales posteriores.

Como se ha mencionado, se aplicarán una serie de modelos geométricos que han sido desarrollados por el Área de Ingeniería de Fabricación de la UPCT con el objetivo de obtener el ángulo de solidificación y el diámetro inicial.

- Medida del radio de la gota generada:

Figura 3.19. Medida de radio y altura



A partir del software utilizado se realizó la medida de la altura  $h$  y el ancho  $a$  del casquete. Conocidas esas dos variables y sabiendo que el volumen de un casquete esférico de altura  $h$  y radio  $a$  es:

$$Volumen = \frac{\pi h}{6} (3a^2 + h^2) = \frac{4\pi R^3}{3} \quad (3.10)$$

Suponiendo que las gotas que salen de la boquilla tienen una geometría esférica ideal podemos obtener el valor del diámetro de la gota generada  $D$ :

$$D = 2R = \sqrt[3]{h(3a^2 + h^2)} \quad (3.11)$$

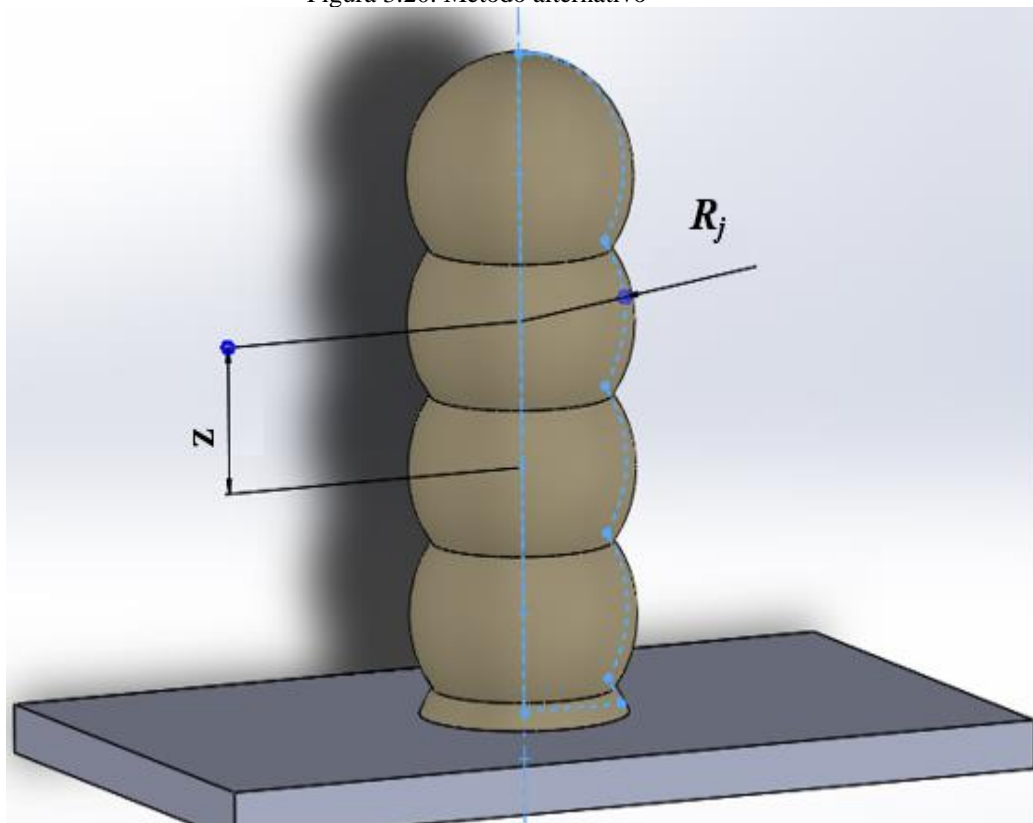
- Método alternativo para el cálculo del radio de la gota generada

Este método consiste en la medición del radio inicial de la gota generada  $R$  a partir del análisis geométrico de dos gotas de una columna vertical, concretamente la penúltima y la anterior a ella.

$$R' = 0,5(6R_j^2 \cdot z - 0,5z^3)^{\frac{1}{3}} \quad (3.12)$$

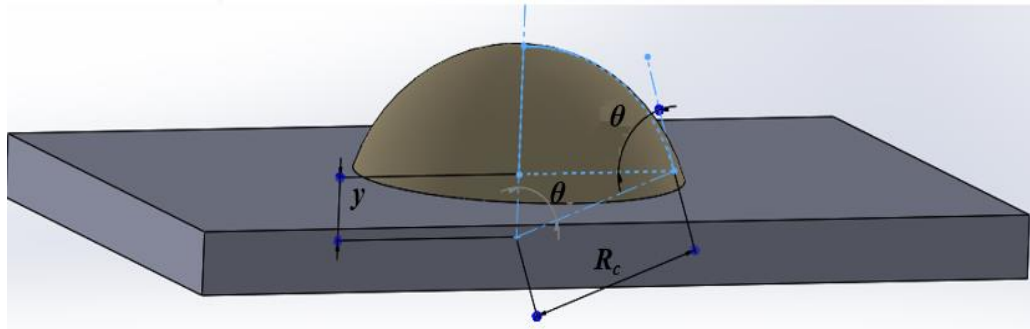
Siendo  $R_j$  el radio de la gota superior y  $z$  la distancia entre centros de las dos circunferencias. La denominación de  $R'$  se le da para diferenciarla del valor de  $R$  calculado por el primer método.

Figura 3.20. Método alternativo



- Medida del ángulo de solidificación entre gota y sustrato:

Figura 3.21. Medida del ángulo de solidificación



A partir de los mismos medios podemos obtener el ángulo de solidificación  $\theta$  entre gota y sustrato. Podemos obtener la circunferencia mediante interpolación a partir de 6 puntos y obtener su centro, conocido su posición y la del sustrato podemos calcular la distancia entre ambos  $|y|$ , así como el radio del casquete esférico  $R_c$ . Conocidos estos dos parámetros simplemente aplicamos trigonometría para obtener el ángulo de solidificación, de forma que:

$$\theta = \arccos \left( \frac{|y|}{R_c} \right) \quad (3.13)$$

### 3.3.5. *Obtención del paso ideal y su rugosidad asociada*

Conocidos el diámetro inicial  $D$  de la gota generada y el ángulo de solidificación entre gota y sustrato  $\theta$  se puede calcular el paso ideal  $W_{op}$  a partir del modelo que se propondrá más adelante en el apartado 4.2.3. Una vez se haya obtenido el paso ideal u óptimo se procederá a realizar el cálculo de la rugosidad que se corresponde con el paso predicho por el modelo anterior. Para ello utilizaremos el modelo teórico que se desarrollará posteriormente en el apartado 4.3.1.

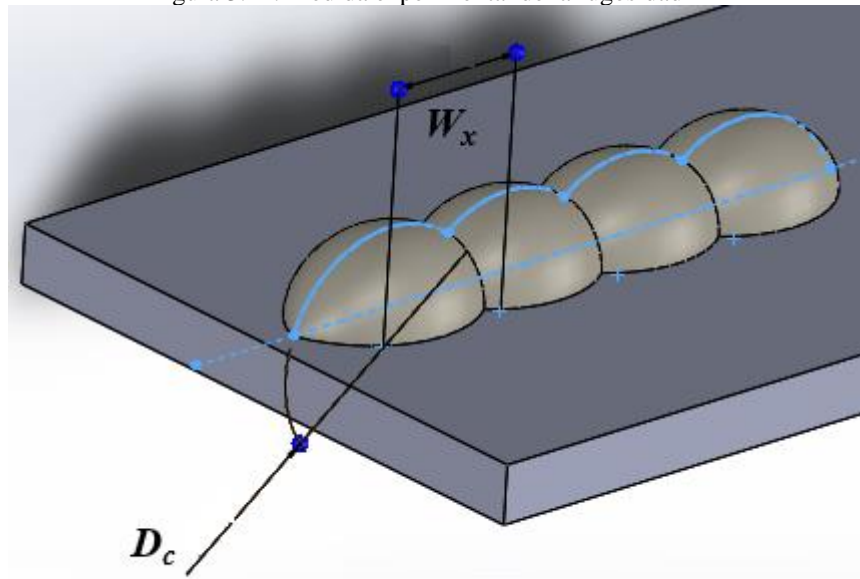
### 3.3.6. *Medida experimental para el cálculo de la rugosidad*

Para comprobar la validez del modelo teórico se deben realizar una serie de medidas de la rugosidad real que presentan los cordones horizontales que se han depositado en los experimentos. Para esta función, se iba a usar un rugosímetro del Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación, sin embargo, debido a las características fisicoquímicas del material empleado en el presente TFG resultó imposible su



utilización. En su lugar se recurrió a un modelo sencillo, el cual nos proporciona un valor de rugosidad  $R_a$ .

Figura 3.22. Medida experimental de la rugosidad



$$R_a = \frac{W_x^2}{3^{\frac{5}{2}} \cdot D_c} \quad (3.14)$$

Siendo  $W_x$  la distancia entre centros entre las gotas depositadas sobre el sustrato y  $D_c$  el diámetro del casquete esférico que se deposita sobre el sustrato. Para la medición de estos parámetros utilizaremos el software de tratamiento de imagen. Se realizarán las mediciones en cada uno de los cordones depositados en las cuatro placas, obteniéndose los valores de rugosidad con su variabilidad.

Una vez obtenidos los valores de rugosidad experimental se procederá a realizar la comparación con el modelo teórico. Para obtener los valores de rugosidad teórica se utilizará la expresión 4.49. Para poder utilizar esta expresión utilizaremos los valores de  $D$ ,  $\theta$  característicos de cada placa y el paso  $W_x$  correspondiente a cada cordón, lo cual se medirá con anterioridad.

### 3.3.7. Expresión de una medida

Resulta fundamental en un trabajo de esta índole una presentación correcta de las mediciones de los diferentes parámetros. Por todos es conocido que el valor verdadero de la magnitud a medir o mensurando siempre es desconocido debido a las imperfecciones que inevitablemente se producen durante el desarrollo del proceso de medida. Tal como indica el profesor D. Joaquín López Rodríguez en su libro “Fundamentos de metrología, tolerancias y ajustes en fabricación mecánica” [15] resulta habitual agrupar las causas de las imperfecciones en tres categorías:

- Instrumento o equipo de medida.
- Operador o sistema de adquisición de datos.
- Mensurando.

La presentación formal de una magnitud ha de realizarse como el valor medio de todas las medidas que se han realizado para cuantificarla, acompañado de un intervalo de confianza. Previamente se ha de aplicar un método que permita el rechazo de todas aquellas medidas que resulten inadecuadas por alguna razón, como un error de medición. A continuación, se presentarán los métodos que se han utilizado en este trabajo.

### 3.3.7.1 Selección de las mediciones reiteradas. Criterio de rechazo de Chauvenet

Como señala D. Joaquín López Rodríguez en su libro, antes de “proceder al cálculo del valor convencionalmente verdadero de una medida y de su incertidumbre asociada, resulta aconsejable llevar a cabo una filtración de los valores numéricos obtenidos en el proceso de medición para eliminar aquellos que se han obtenido de manera incorrecta debido a errores de tipo accidental” (algún fallo a la hora de realizar las medidas con el software, geometría anómala de una gota del cordón con respecto a las demás, etc.). El método más usado en metrología para tal fin es el que se denomina como “criterio de rechazo de Chauvenet”.

Este método consiste en el rechazo de todas aquellas medidas cuya probabilidad de aparición sean menor a  $\alpha = \frac{1}{2n}$ , siendo  $n$  el número de reiteraciones de la medida. El método supone que se deben rechazar todas aquellas medidas cuya desviación a la media sea superior al valor de  $k(n) \cdot s$  siendo  $k(n)$  un coeficiente que multiplica al estimador de la variabilidad, en este caso la desviación típica  $s$ . Este valor  $k(n) = k_{\alpha=1/2n}$  se obtiene a partir de la distribución normal, y su valor se puede obtener a partir de la siguiente tabla:

Tabla 3.10. Coeficiente  $k(n)$  del criterio de Chauvenet

$n$	$k(n)$	$n$	$k(n)$
2	1,15	15	2,13
3	1,38	20	2,24
4	1,54	25	2,33
5	1,65	30	2,40
6	1,73	40	2,48
7	1,80	50	2,57
8	1,86	100	2,81
9	1,92	300	3,14
10	1,96	500	3,29
		1000	3,48

Fuente: López Rodríguez, J. Fundamentos de metrología, tolerancias y ajustes en fabricación mecánica. (2017).

Para que la medida resulte válida y no se vea sometida a rechazo esta se deberá encontrar en un intervalo que viene dado por:

$$\bar{x} - k(n)s \leq x_i \leq \bar{x} + k(n)s \quad (3.15)$$

Para aplicar el criterio de Chauvenet habrá que tener en cuenta una serie de consideraciones:

- El criterio de Chauvenet se aplica de forma continuada hasta que no se rechace ninguna medida.
- El número máximo de rechazos aceptados es 1 si  $n$  es menor o igual a 10 y 2 si  $n$  se encuentra entre 10 y 20, siendo  $n$  el número de medidas realizadas.

La media muestral  $\bar{x}$  y la desviación típica  $s$  se calculan como:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.16)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.17)$$

### 3.3.7.2 Intervalos de confianza

Los intervalos de confianza establecen una gama de valores en los que incluir, con una determinada probabilidad denominada nivel de confianza  $(1-\alpha)$ , el valor verdadero de un parámetro de la población. El parámetro será la media  $\beta$ . Por ejemplo, si se extrae una muestra de tamaño  $n$  y se obtiene la media muestral  $\bar{x}$ , la probabilidad de que la media  $\beta$  se encuentre en el intervalo  $\bar{x} \pm k_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  es:

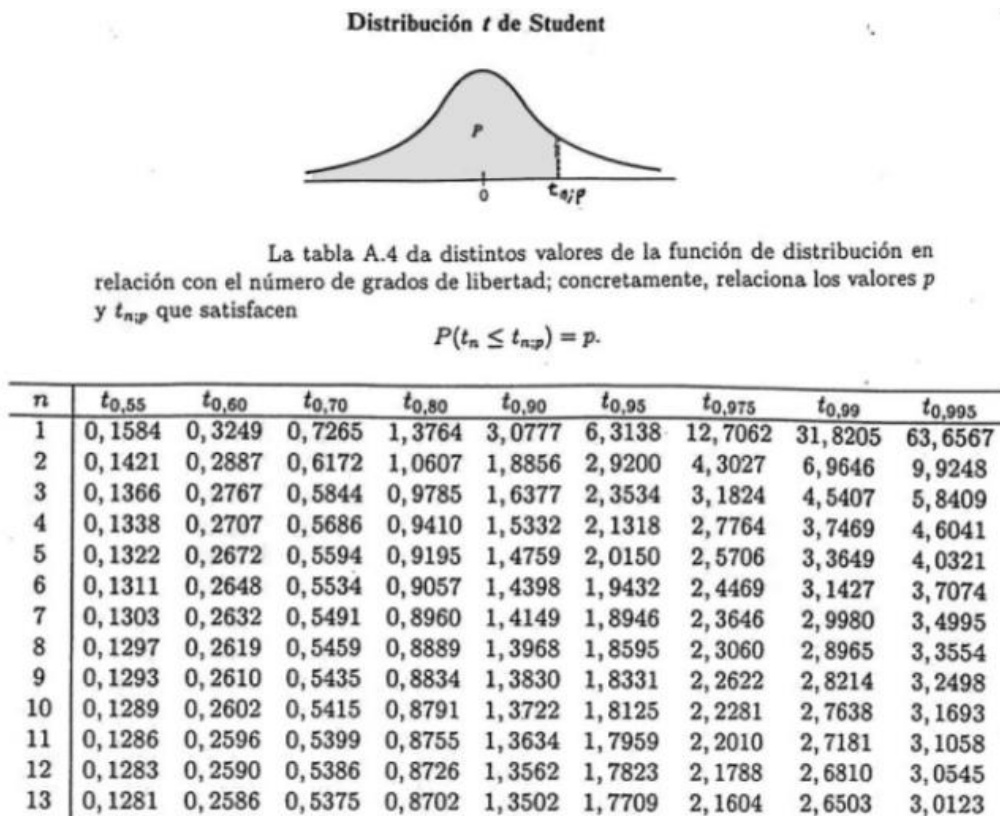
$$p\left(\bar{x} - k_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \beta \leq \bar{x} + k_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (3.18)$$

Se tiene que conocer, o al menos suponerla conocida, la desviación típica poblacional  $\sigma$ . Como no es posible, la expresión de la ecuación anterior se sustituye por:

$$p\left(\bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \beta \leq \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (3.19)$$

Donde  $s$  es la desviación típica muestral. El factor  $t$  es el coeficiente de una distribución de Student con  $n - 1$  grados de libertad.

Figura 3.23. Distribución  $t$  de Student.



Fuente: Slideshare

En este trabajo vamos a estimar estos intervalos para un nivel de confianza  $1-\alpha = 0,80$ . Como se trata de intervalos acotados tanto inferior como superiormente, a la hora de buscar en la tabla debemos acceder por la columna  $t_{0,90}$ , ya que  $1-\alpha/2 = 0,90$ .

En lo que a las filas se refiere, en la tabla el valor de  $n$  que aparece se corresponde con los grados de libertad  $n-1$ , siendo  $n$ , en realidad, el número de medidas realizadas. Estos intervalos de confianza sólo son aplicables a aquellas magnitudes que se miden directamente en el software de análisis de imagen, es decir,  $y$ ,  $R_c$ ,  $a$ ,  $h$ . Para aquellas medidas que son indirectas, es decir, que provienen de otras medidas efectuadas directamente se habrá de recurrir a lo que se conoce como propagación de varianzas. En resumen, las variables que se vean sometidas a este tratamiento se presentarán de la forma:

$$\bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{3.20}$$

### 3.3.7.3 Propagación de varianzas

Como ya se ha mencionado anteriormente, a algunas magnitudes no se les puede dar el tratamiento explicado en el punto anterior, por lo que se recurre a lo que se conoce como propagación de varianzas. En este caso de estudio, aquellas medidas que han de someterse al método de propagación de varianzas para obtener su variabilidad son el

paso, la rugosidad experimental y teórica, el ángulo de solidificación y el diámetro inicial de la gota generada. Puesto que puede resultar algo complejo y se trata de un proceso tedioso, a continuación, se va a explicar cómo se realiza la aplicación de este procedimiento.

### Ángulo de solidificación $\theta$

El resultado final de la medida  $\theta$  depende de otras medidas efectuadas individualmente. En este caso la medida se obtendrá a partir de las magnitudes  $R_c$  e  $y$ , de forma que:

$$\theta = f(y, R_c) \quad (3.21)$$

Se puede demostrar [15] que el resultado final de la medida será de la forma:

$$\theta = \bar{\theta} \pm U_\theta \quad \text{con } \bar{\theta} = f(\bar{y}, \bar{R}_c) \quad (3.22)$$

Siendo  $U_\theta$  la incertidumbre de la variable  $\theta$ , que se define como:

$$U_\theta = k_\theta \cdot u_\theta \quad (3.23)$$

$$u_\theta^2 = \left(\frac{\partial \theta}{\partial R_c}\right)^2 u_{R_c}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)^2 u_y^2 \quad (3.24)$$

Donde  $k_\theta$  depende de las condiciones de medida, y que en este caso supondremos de valor 3 [15].

Los valores de  $u_y$  y  $u_{R_c}$  se obtienen como:

$$u_y = \frac{U_y}{3} \quad (3.25)$$

$$u_{R_c} = \frac{U_{R_c}}{3} \quad (3.26)$$

Siendo  $U_y$  y  $U_{R_c}$  conocidos ya que se determinan previamente mediante el método explicado en el apartado anterior al ser medidas directas.

### Diámetro de la gota inicial $D$

A partir de la expresión 3.11:

$$D = f(a, h) \quad (3.27)$$

$$D = \bar{D} \pm U_D \quad \text{con } \bar{D} = f(\bar{a}, \bar{h}) \quad (3.28)$$

$$U_D = k_D \cdot u_D \quad (3.29)$$

$$u_D^2 = \left(\frac{\partial D}{\partial a}\right)^2 u_a^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial h}\right)^2 u_h^2 \quad (3.30)$$

$$u_D = \frac{U_a}{3} \quad (3.31)$$

$$u_h = \frac{U_h}{3} \quad (3.32)$$

Siendo  $U_a$  y  $U_h$  conocidos ya que se determinan previamente mediante el método explicado en el apartado anterior al ser medidas directas.

Distancia entre centros óptima  $W_{op}$

$$W_{op} = f(\theta, D) \quad (3.33)$$

$$W_{op} = \bar{W}_{op} \pm U_W \quad \text{con } \bar{W}_{op} = f(\bar{\theta}, \bar{D}) \quad (3.34)$$

$$U_W = k_w \cdot u_w \quad (3.35)$$

$$u_w^2 = \left(\frac{\partial W_{op}}{\partial D}\right)^2 u_D^2 + \left(\frac{\partial W_{op}}{\partial \theta}\right)^2 u_\theta^2 \quad (3.36)$$

$$u_\theta = \frac{U_\theta}{3} \quad (3.37)$$

$$u_D = \frac{U_D}{3} \quad (3.38)$$

### Rugosidad teórica $R_a$

El modo de proceder con la rugosidad resulta similar, siguiendo la ecuación 4.49 se obtiene que:

$$R_a = f(\theta, D, W_x) \quad (3.39)$$

$$R_a = \overline{R_a} \pm U_{Ra} \quad \text{con } \overline{R_a} = f(\overline{\theta}, \overline{D}, \overline{W_x}) \quad (3.40)$$

$$U_{Ra} = k_{Ra} \cdot u_{Ra} \quad (3.41)$$

$$u_{Ra}^2 = \left(\frac{\partial R_a}{\partial D}\right)^2 u_D^2 + \left(\frac{\partial R_a}{\partial \theta}\right)^2 u_\theta^2 + \left(\frac{\partial R_a}{\partial W_x}\right)^2 u_W^2 \quad (3.42)$$

$$u_W = \frac{U_W}{3} \quad (3.43)$$

### Rugosidad experimental $R_a$

El modo de proceder con la rugosidad resulta similar, siguiendo la ecuación 3.14 se obtiene que:

$$R_a = f(D_c, W_x) \quad (3.43)$$

$$R_a = \overline{R_a} \pm U_{Ra} \quad \text{con } \overline{R_a} = f(\overline{D}, \overline{W_x}) \quad (3.44)$$

$$U_{Ra} = k_{Ra} \cdot u_{Ra} \quad (3.45)$$

$$u_{Ra}^2 = \left(\frac{\partial R_a}{\partial D_c}\right)^2 u_{D_c}^2 + \left(\frac{\partial R_a}{\partial W_x}\right)^2 u_W^2 \quad (3.46)$$

$$u_W = \frac{U_W}{3} \quad (3.47)$$

En este caso el valor de  $U_W$  es una medida directa, puesto que se obtiene de la medición de la distancia entre centros de los diferentes cordones estudiados, y no a partir de una expresión o ecuación como ocurre con el modelo teórico de predicción de la rugosidad.



## CAPÍTULO 4 ESTUDIO TEÓRICO

### 4.1 Definición de variables

El objetivo principal de este trabajo es la determinación del paso a utilizar (*scan step*) en el proceso de impresión de líneas horizontales sobre superficies planas, para la obtención de una rugosidad superficial mínima. Para ello haremos uso de un modelo geométrico conocido que nos permita predecir con cierta precisión el paso que minimice la rugosidad de la línea depositada. Tras el estudio de diversos artículos y modelos se ha decidido por utilizar el modelo propuesto por Qi, L. y otros [6].

Suponiendo que la gota sale de la boquilla con una frecuencia de deposición  $f$  y con un diámetro  $D$ , y que el sustrato se mueve con una cierta velocidad  $V$ , de modo que se pueden establecer las siguientes ecuaciones:

$$S = \tau \cdot V = W_x \cdot N \quad (4.1)$$

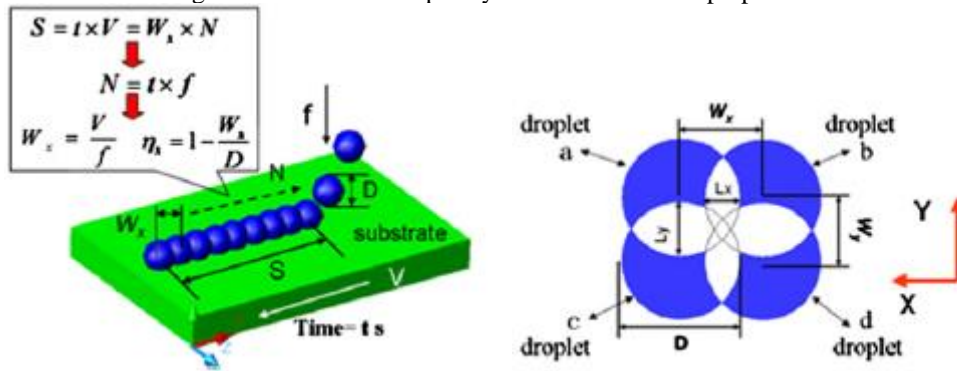
$$N = \tau \cdot f \quad (4.2)$$

Utilizando esas dos ecuaciones se pueden definir el paso en la dirección de deposición  $W_x$  y la relación de superposición o solape  $\eta_x$ :

$$W_x = \frac{V}{f} \quad (4.3)$$

$$\eta_x = \frac{L_x}{D_s} = \frac{D - W_x}{D_s} = 1 - \frac{W_x}{D_s} \quad (4.4)$$

Figura 4.1. Análisis del paso y de la relación de superposición



Fuente: Qi, L. et al. A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture. Int. J. Mach. Tools Manuf. 56, 50–58 (2012).

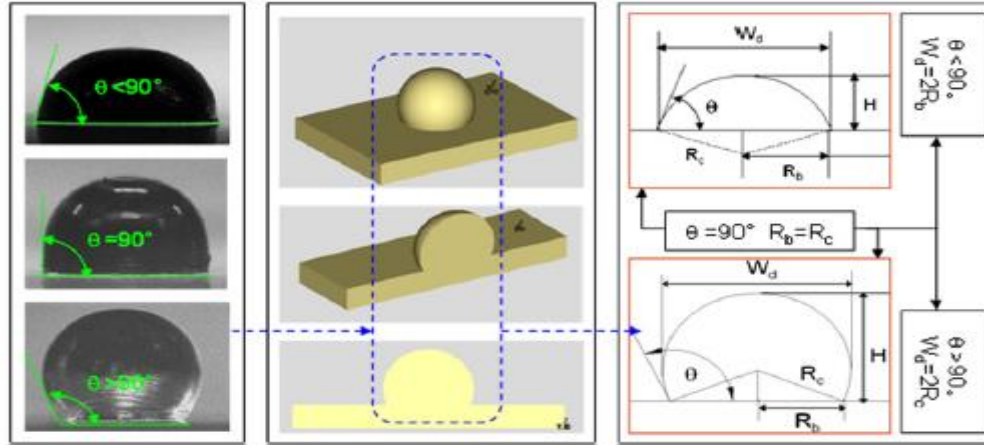
*Nota: En la figura 4.1 la nomenclatura utilizada define el diámetro sobre el sustrato y el tiempo de impresión como  $D$  y  $t$ . En el presente TFG se nombrarán como  $D_s$  y  $\tau$ . También aparece la deposición de gotas en 2 direcciones ( $x$  e  $y$ ). Nosotros nos centraremos únicamente en una dirección, por ejemplo, “ $x$ ”.*

## 4.2 Estudio del paso óptimo

### 4.2.1. Determinación de la geometría de la gota solidificada

Cuando la gota sale de la boquilla se puede considerar que se trata de una esfera ideal de diámetro  $D$ . Posteriormente, cuando la gota impacta contra el sustrato y solidifica sobre él, podemos considerar que se trata de un casquete esférico [6]. Este casquete esférico puede ser definido a partir de una serie de parámetros como el ángulo de solidificación  $\theta$ , el diámetro de la base del casquete  $D_s$ , la altura del casquete  $h$ , y los radios de  $R_b$  y  $R_c$  indicados en la siguiente figura.

Figura 4.2. Geometría de la gota solidificada



Fuente: Qi, L. et al. A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture. Int. J. Mach. Tools Manuf. 56, 50–58 (2012).

*Nota: Lo que nosotros llamamos  $D_s$  y  $h$  aparecen en la figura anterior como  $W_d$  y  $H$ .*

Como se muestra, se hace distinción entre dos geometrías diferentes en función del ángulo de solidificación, siendo la frontera entre ambas geometrías el valor de  $\theta = 90^\circ$ . Basándose en el principio de conservación de la masa, el modelo iguala el volumen de la gota inicial de diámetro  $D$  con el volumen del casquete esférico solidificado sobre el sustrato:

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3 = \frac{1}{6}\pi\left[R_c \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + R_c\right]\left[3(R_b)^2 + \left(R_c \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + R_c\right)^2\right] \quad (4.5)$$

$$\text{Volumen del casquete} = \text{Volumen de la esfera} \quad (4.6)$$

$$\frac{\pi h}{6}(3(R_b)^2 + h^2) = \frac{\pi D^3}{6} \quad (4.7)$$

$$D^3 = h(3R_b^2 + h) \quad (4.8)$$

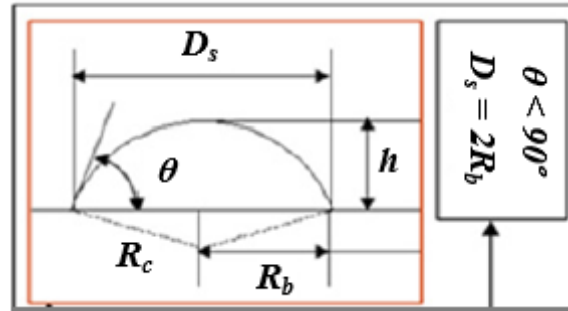
Considerando las diferentes relaciones geométricas indicadas a continuación:

$$\cos \theta = \frac{R_c - h}{R_c} \quad (4.9)$$

$$h = R_c(1 - \cos \theta) \quad (4.10)$$

$$R_c = \frac{R_b}{\sin \theta} \quad (4.11)$$

Figura 4.3. Relaciones trigonométricas



Fuentes: Qi, L. et al. A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture. Int. J. Mach. Tools Manuf. 56, 50–58 (2012).

Se deja todo en función de  $R_c$  y  $\theta$ :

$$\begin{aligned} R_c(1 - \cos \theta)(3R_b^2 + R_c^2(1 - \cos \theta)^2) &= D^3 \\ R_c(1 - \cos \theta)(3(R_c \sin \theta)^2 + R_c^2(1 - \cos \theta)^2) &= \\ = R_c^3(1 - \cos \theta)(3(1 - (\cos \theta)^2) + 1 + (\cos \theta)^2 - 2 \cos \theta) &= \\ = R_c^3(1 - \cos \theta)(4 - 2(\cos \theta)^2 - 2 \cos \theta) &= \\ = -2R_c^3(1 - \cos \theta)(\cos \theta - 1)(\cos \theta + 2) &= \\ = 2R_c^3(1 - \cos \theta)(1 - \cos \theta)(2 + \cos \theta) &= \\ D^3 = 2R_c^3(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta) & \end{aligned}$$

Se obtiene  $R_c$ :

$$R_c = \frac{D}{2} \left( \frac{4}{(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.12)$$

Y  $R_b$ :

$$R_b = \frac{D}{2} \left( \frac{4(\sin \theta)^3}{(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.13)$$

Por tanto, se puede obtener el diámetro  $D_s$ :

$$D_s = 2R_b = D \left( \frac{4(\sin \theta)^3}{(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } 0^\circ < \theta < 90^\circ \quad (4.14)$$

$$D_s = 2R_c = D \left( \frac{4}{(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } 90^\circ < \theta < 180^\circ \quad (4.15)$$

#### 4.2.2. Solapamiento de gotas en el proceso de deposición

De lo demostrado anteriormente se puede deducir a partir de que valores se producirá el solapamiento de las gotas depositadas, que permiten la generación de una línea continua de gotas. Por tanto, si el paso  $W$  es mayor que el diámetro de propagación  $D_s$  no se producirá solapamiento. Para que este se produzca se han de cumplir las siguientes condiciones:

$$W < 2R_b = D_s = D \left( \frac{4(\sin \theta)^3}{(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } 0^\circ < \theta < 90^\circ \quad (4.16)$$

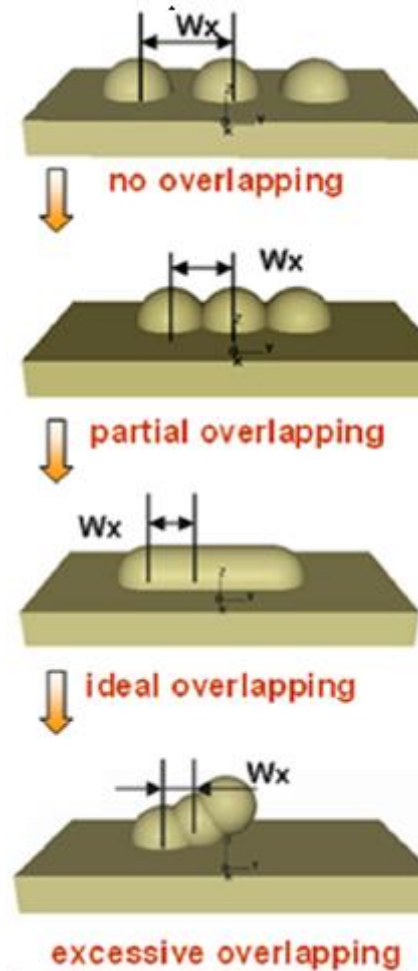
$$W < 2R_c = D_s = D \left( \frac{4}{(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } 90^\circ < \theta < 180^\circ \quad (4.17)$$

#### 4.2.3. Cálculo del paso óptimo $W_{op}$

El paso o *scanning step* resulta una variable fundamental a la hora de conseguir una deposición horizontal con la rugosidad idónea. La siguiente imagen muestra los diferentes escenarios que pueden llegar a producirse en la deposición de gotas en función del paso con el que se trabaje. En la primera imagen podemos observar claramente el caso  $W_x > D_s$ , por tanto, las gotas no llegan a interactuar y no se produce solapamiento, por tanto, no se genera una línea continua. En la segunda imagen se ha reducido el paso hasta que se produce un cierto solape, tenemos ahora una línea continua, pero el solapamiento entre gotas es muy limitado y la rugosidad que se obtiene en el cordón resulta bastante deficiente. En la cuarta imagen observamos como un paso excesivamente pequeño provoca una relación de solapamiento excesiva, llegando a producirse una superposición entre las diferentes gotas, provocando que se

genere una columna inclinada al entrar en contacto las gotas recién depositadas sobre las que ya han solidificado antes que sobre el propio sustrato.

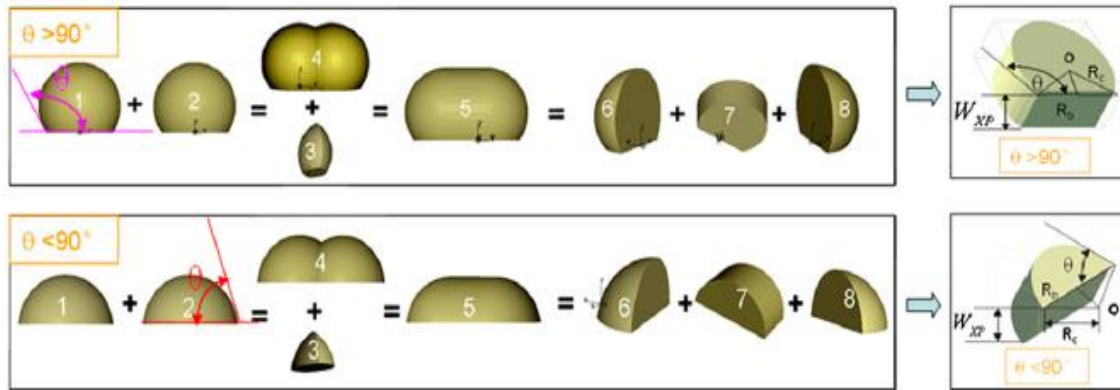
Figura 4.4. Variación del solapamiento en función del paso adoptado



Fuente: Qi, L. et al. A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 56, 50–58 (2012).

La situación ideal la encontramos en la tercera imagen, donde la distancia entre centros es tal que la rugosidad del cordón depositado resulta mínima. Para poder obtener una expresión analítica que nos permita predecir el paso ideal los autores proponen modelizar la unión entre dos gotas como figuras geométricas relativamente simples que nos permitan la igualdad de volúmenes. Este proceso queda ilustrado en la siguiente imagen:

Figura 4.5. Modelo para el cálculo del paso óptimo  $W_{op}$

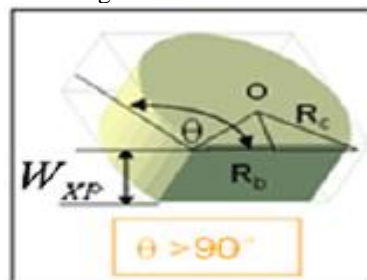


Fuente: Qi, L. et al. A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture. Int. J. Mach. Tools Manuf. 56, 50–58 (2012).

*Nota: En el modelo el paso óptimo recibe la denominación de  $W_{xp}$ . En el presente TFG al paso óptimo se le denomina como  $W_{op}$ .*

Se observa como la unión de dos gotas genera el volumen ideal (5), el cual se puede descomponer en dos tapas esféricas (6,8) y una especie de cilindro seccionado (7), que aparece detalladamente en la *figura 4.5*. El modelo supone que el volumen de la gota inicial de diámetro  $D$  es igual al volumen 7, cuyo espesor o profundidad es el paso ideal  $W_{op}$ .

Figura 4.6. Volumen 7



Fuente: Qi, L. et al. A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture. Int. J. Mach. Tools Manuf. 56, 50–58 (2012).

Denominamos *volumen A* al volumen que falta para completar el cilindro:

$$V_{gota} = V_7 \quad (4.18)$$

$$Volumen\ cilindro\ completo - Volumen\ A = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad (4.19)$$

$$Volumen\ del\ cilindro\ completo = \pi R_c^2 W_{op} \quad (4.20)$$

El *volumen A* lo podemos calcular suponiendo que el sector circular de radio  $R_c$  está compuesto por un triángulo de base  $R_b$  y altura  $h$  y por el propio *volumen A*, de forma que:

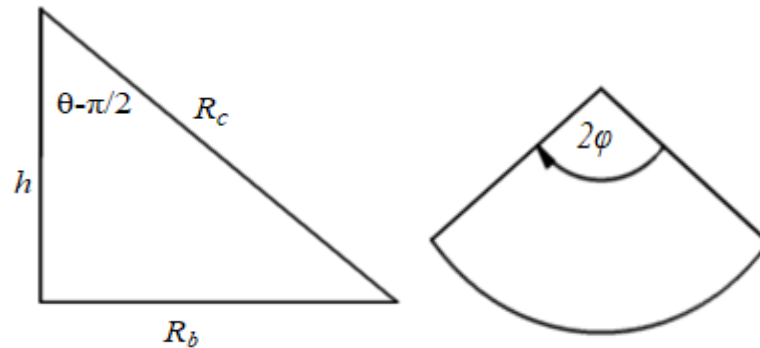
$$\text{Volumen } A = \text{Volumen sector circular} - \text{Volumen triángulo} \quad (4.21)$$

Mediante relaciones geométricas puedo obtener el valor de  $h$  y la relación entre  $R_b$  y  $R_c$ :

$$R_b = R_c \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.22)$$

$$h = \sqrt{R_c^2 - R_b^2} = R_c \sqrt{1 - \left(\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)\right)^2} \quad (4.23)$$

Figura 4.7. Mitad del triángulo (a) y sector circular (b)



El volumen del sector circular se puede expresar en función del ángulo  $\varphi$ :

$$\text{Volumen del sector circular} = \frac{2\varphi \cdot R_c^2}{2} \cdot W_{op} = W_{op} \cdot \varphi \cdot R_c^2 \quad (4.24)$$

Mientras que el ángulo  $\varphi$  se puede expresar en función del ángulo  $\theta$ :

$$\varphi = \pi - \theta \quad (4.25)$$



Por lo que combinando ambas ecuaciones se tiene el volumen del sector circular:

$$\text{Volumen del sector circular} = W_{op} \cdot R_c^2(\pi - \theta) \quad (4.26)$$

El volumen del triángulo de puede expresar como:

$$\text{Volumen del triángulo} = R_b W_{op} h = W_{op} R_b R_c \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.27)$$

$$\text{Volumen A} = W_{op} R_c^2(\pi - \theta) - W_{op} R_b R_c \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.28)$$

$$V_7 = \text{Volumen del sector circular} - \text{Volumen A} \quad (4.29)$$

$$V_7 = \pi R_c^2 W_{op} + R_b R_c \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) W_{op} - W_{op} R_c^2(\pi - \theta)$$

$$V_7 = W_{op} \left[ \pi R_c^2 - R_c^2(\pi - \theta) + R_b R_c \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

$$V_{gota} = V_7$$

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 = \left[ R_c^2 \theta + R_b R_c \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right] W_{op}$$

La expresión para el paso ideal queda por tanto como:

$$W_{op} = \frac{2\pi D^3}{3 \left[ R_c^2 \theta + R_b R_c \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]} \quad (4.30)$$

Sustituyendo los valores de  $R_c$  y  $R_b$  se obtiene la expresión definitiva del paso ideal en función de  $\theta$  y  $D$ :

$$W_{op} = \frac{2\pi D}{3 \left[ \left( \frac{4}{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{2}{3}} (\theta - \sin \theta \cos \theta) \right]} \quad (4.31)$$

Con  $0 < \theta < \pi$  en radianes.

### 4.3 Estudio de la rugosidad superficial

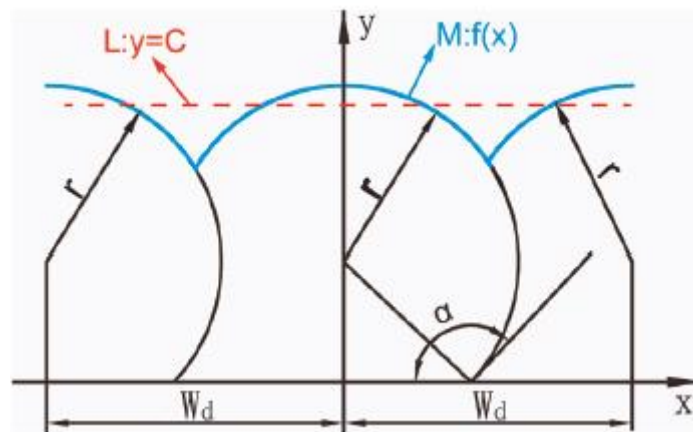
Qi, L., Zhong, S., Luo, J., Zhang, D. & Zuo, H. en uno de sus estudios [7] propusieron un modelo de predicción de la topografía superficial en deposiciones horizontales partir de la rugosidad media aritmética  $R_a$ . Para ello se basan en estudios anteriores [6] que demuestran que la calidad superficial de una deposición de este tipo depende o se ve afectada en gran cantidad por el paso o *scan step* ( $W_x$ ). Este estudio también propone otro modelo para calcular la rugosidad de superficies laterales en el caso de deposición vertical, sin embargo, el objeto de nuestro trabajo es el análisis y determinación de la rugosidad superficial de la superficie superior en la deposición horizontal de gotas.

#### 4.3.1. Modelización de la rugosidad en deposiciones horizontales

Estos autores realizan una serie de suposiciones importantes que permiten simplificar el desarrollo del modelo:

- La forma de las gotas depositadas es considerada como una corona esférica y la sección transversal del perfil es perfectamente simétrica.
- Mientras los parámetros del proceso se mantengan constantes ( $\theta$ ,  $W_x$ ), las gotas depositadas generan un perfil uniforme que se puede aproximar como una secuencia periódica de arcos de circunferencia.
- El perfil de una gota depositada no se ve afectada por la deposición de la siguiente gota.

Figura 4.8. Representación geométrica del perfil superior



Fuente: Qi, L., Zhong, S., Luo, J., Zhang, D. & Zuo, H. Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture. Int. J. Mach. Tools Manuf. 88, 206–213 (2015).

*Nota: En este modelo se le denomina  $\alpha$  al ángulo de solidificación entre gota y sustrato. En este trabajo dicho parámetro es denominado como  $\theta$ . De igual modo  $W_d$  es denominado como  $W_x$  en el presente TFG.*

El perfil se puede definir como una función  $f(x)$  tal que:

$$f(x) = \sqrt{r^2 - x^2} + r \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.32)$$

Donde  $r$  es el radio del arco. Usando la expansión de la serie de Taylor limitada al término de segundo orden la función puede aproximarse de la siguiente manera:

$$f(x) \cong r - \frac{x^2}{2r} + r \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.33)$$

Se puede definir la línea de mínimos cuadrados, la recta que mejor se ajusta a la función  $f(x)$  antes definida, como  $L$ :  $y = C$ . Esta línea, también conocida como línea media o línea central es aquella que divide al perfil en dos regiones de igual área a lo largo de la longitud  $l$  del perfil. Para poder calcular el valor de  $R_a$  resulta fundamental calcular el valor de dicha línea  $y$ . Para poder calcular el valor de  $y$  debemos definir primeramente lo que se conoce como la suma cuadrática  $Q(C)$  de las distancias entre los puntos del perfil y la línea  $C$ .

$$Q(C) = \int_{-\frac{W_x}{2}}^{\frac{W_x}{2}} (f(x) - C)^2 dx \quad (4.34)$$

El valor de  $C$  se puede calcular a partir de hacer que la suma cuadrática  $Q$  alcance su valor mínimo. Por tanto:

$$\frac{\partial Q}{\partial C} = 0 \quad (4.35)$$

Desarrollando la ecuación 4.34:

$$Q(C) = \int_{-\frac{W_x}{2}}^{\frac{W_x}{2}} (f(x)^2 + C^2 - 2Cf(x)) dx \quad (4.36)$$

$$Q(C) = I + II + III \quad (4.37)$$

$$I = \int_{-\frac{W_x}{2}}^{\frac{W_x}{2}} \left( r - \frac{x^2}{2r} + r \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right)^2 dx \quad (4.38)$$

$$II = \int_{-\frac{W_x}{2}}^{\frac{W_x}{2}} C^2 dx \quad (4.39)$$

$$III = \int_{-\frac{W_x}{2}}^{\frac{W_x}{2}} 2C \left( r - \frac{x^2}{2r} + r \sin \left( \theta - \frac{\pi}{2} \right) \right) dx \quad (4.40)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C} = \frac{\partial I}{\partial C} + \frac{\partial II}{\partial C} + \frac{\partial III}{\partial C} = 0 \quad (4.41)$$

Derivando cada sumando de la ecuación 4.41:

$$\frac{\partial I}{\partial C} = 0 \quad (4.42)$$

$$\frac{\partial II}{\partial C} = 2CW_x \quad (4.43)$$

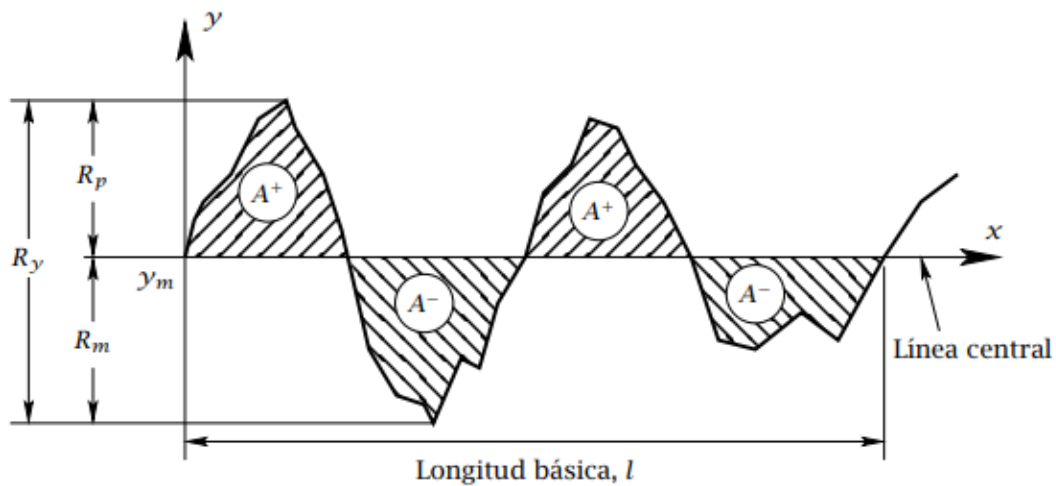
$$\frac{\partial III}{\partial C} = -2C \left[ W_x - \frac{1}{2r} \left( 2 \left( \frac{W_x}{2} \right)^3 \right) + r \sin \left( \theta - \frac{\pi}{2} \right) W_x \right] \quad (4.44)$$

De manera que si aplicamos la ecuación 4.41 podemos despejar el valor de C:

$$C = r + r \sin \left( \theta - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{W_x^2}{24} \quad (4.45)$$

Aplicando la definición de rugosidad aritmética media  $R_a$ :

Figura 4.9. Definición de  $R_a$



Fuente: López Rodríguez, J. Fundamentos de metrología, tolerancias y ajustes en fabricación mecánica. (2017).

$$R_a = \frac{1}{l} \int_{x_0}^{l+x_0} |y| dx \quad (4.46)$$

Siendo  $y$  las distancias desde el perfil  $f(x)$  a la línea media que se ha definido en el trabajo como  $C$ . Aplicando la definición se tiene que:

$$R_a = \frac{1}{W_x} \int_{-\frac{W_x}{2}}^{\frac{W_x}{2}} |f(x) - C| dx = \frac{W_x^2}{18r\sqrt{3}} \quad (4.47)$$

Donde  $r$  coincide con el valor de  $R_c$  definido en la ecuación 4.12:

$$R_c = \frac{D}{2} \left( \frac{4}{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.48)$$

De forma que existe una expresión que nos permite calcular el valor de  $R_a$  en función del ángulo de solidificación, el paso, y el diámetro inicial de la gota:

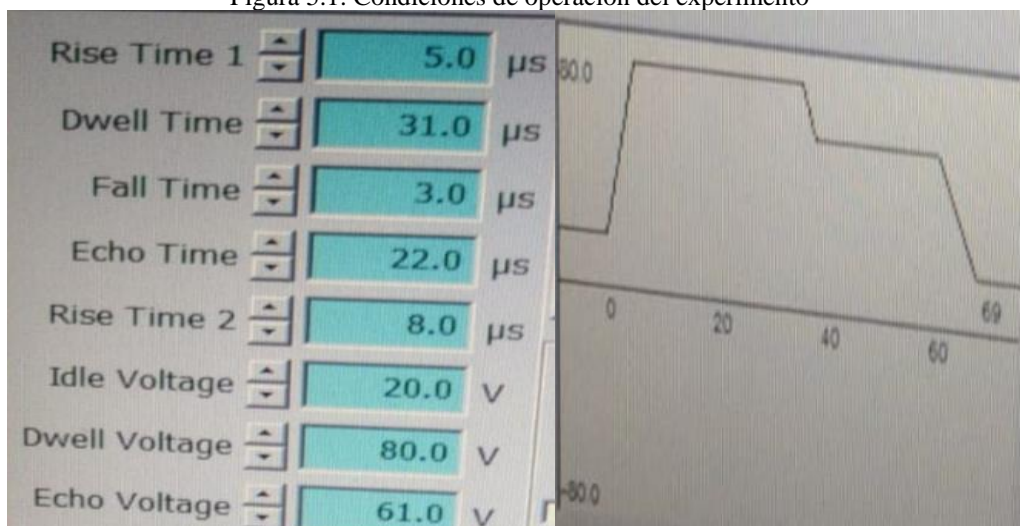
$$R_a = \frac{W_x^2}{9\sqrt{3}D \left[ \frac{4}{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)} \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (4.49)$$

## CAPÍTULO 5 ESTUDIO EXPERIMENTAL

### 5.1. Estudio de la interacción entre gotas: *Drawback*

Antes de abordar las cuestiones relativas al paso ideal y la rugosidad se procederá a analizar si se produce el fenómeno de *Drawback* en nuestras deposiciones. Como ya se comentó en el capítulo 4 se realizó la deposición de cuatro cordones de veinte microgotas con un paso horizontal de 40  $\mu\text{m}$ . Estas deposiciones se realizaron bajo las condiciones de operación que se adjuntan en la siguiente imagen.

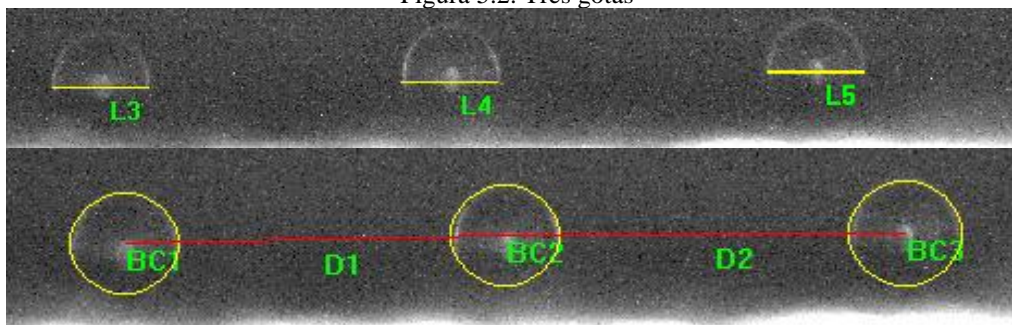
Figura 5.1. Condiciones de operación del experimento



Se realizó la deposición de tres gotas de manera individual para observar el valor del diámetro del casquete esférico que forma la gota sobre el sustrato. Las tres gotas fueron depositadas con un paso de 200  $\mu\text{m}$ , el objetivo es que la distancia entre ellas

fuera lo suficientemente alta para que no se produjesen fenómenos de atracción o repulsión en las gotas que pudiesen provocar cualquier alteración de la geometría.

Figura 5.2. Tres gotas



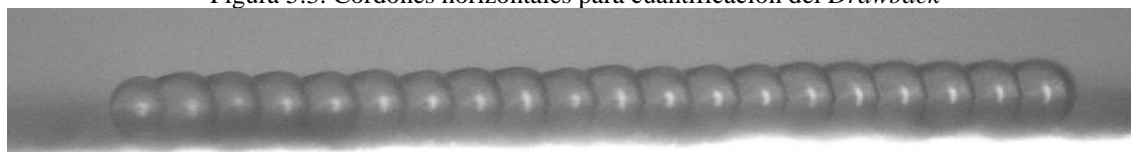
Se obtuvieron las imágenes con ayuda del microscopio y se midieron los diámetros sobre el sustrato con la ayuda del software de análisis de imagen. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 5.1. Diámetro sobre el sustrato  $D_s$

Gota	$D_s(\mu\text{m})$
Gota 1	65,24
Gota 2	64,25
Gota 3	65,24
$\overline{D}_s$	64,91

Conocido el diámetro podemos proceder a la cuantificación del *Drawback*, para ello se depositan los cuatro cordones antes mencionados como el que se puede observar en la siguiente figura:

Figura 5.3. Cordones horizontales para cuantificación del *Drawback*



**200 μm**

Para cuantificar el fenómeno debemos conocer el paso entre gotas. Teóricamente el paso debería ser de 40  $\mu\text{m}$ , sin embargo, a la hora de realizar la impresión la máquina deposita con un cierto error, que se debe cuantificar. Para ello usamos la herramienta de interpolación de circunferencias y obtenemos la distancia entre centros. Una vez conocidas las distancias entre los centros aplicamos el criterio de *Chauvenet* para

desechar aquellas medidas que resulten inaceptables y obtenemos el valor promedio de la distancia entre centros o paso. De igual modo, con la herramienta de análisis de imagen, obtenemos la longitud real del cordón depositado. Conocidos todos estos parámetros y variables podemos obtener o cuantificar el *Drawback*.

Para asegurar que el error que se produce en la deposición de gotas es debido únicamente a la máquina de impresión y no al *Drawback* se ha medido la distancia entre centros de tres gotas separadas a una distancia teórica de 200  $\mu\text{m}$ . Con esta distancia aseguramos que los fenómenos de atracción o repulsión no influirán en la distancia entre centros real entre gotas y, por tanto, se podrá confirmar si el error es únicamente debido a la máquina. A partir de la *figura 5.2* se pueden obtener las distancias reales entre centros, obteniéndose lo siguiente:

Tabla 5.2. Distancia entre centros teórica y real en  $\mu\text{m}$

Distancia entre centros	
Teórica	Real
200	231,67
200	242,18
Media	236,93

Siendo 236,93 el error de posición promedio, que se traduce en un porcentaje de error del 18,46%. Cuando se realice la deposición de los diferentes cordones horizontales, en los que el menor valor del paso hace que las gotas se solapen, se volverá a medir la distancia entre centros de las gotas y se comprobará si el porcentaje de error que se produce en dichas deposiciones es similar al obtenido anteriormente. En caso de similitud entre ambos valores se podrá afirmar que el error producido en las deposiciones es únicamente debido a la impresora y que no influyen fenómenos de atracción o repulsión entre gotas.

### Deposición 1

Figura 5.4. Interpolación de círculos



Figura 5.5. Distancia entre centros o paso  $W_x$

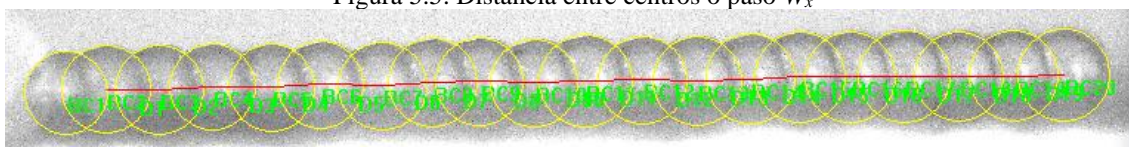




Tabla 5.3. Mediciones

Circunferencia ( $\mu\text{m}$ )	Radio ( $\mu\text{m}$ )	$W_x$ ( $\mu\text{m}$ )
BC1	36,90	-
BC2	39,21	47,12
BC3	39,87	47,52
BC4	38,71	52,72
BC5	38,63	43,57
BC6	38,71	55,70
BC7	39,13	44,23
BC8	39,54	42,52
BC9	38,88	48,46
BC10	38,80	45,86
BC11	41,02	45,86
BC12	39,37	50,41
BC13	39,70	48,77
BC14	39,87	47,80
BC15	40,53	44,18
BC16	40,03	45,14
BC17	40,69	47,45
BC18	39,54	49,42
BC19	39,87	48,77
BC20	40,53	44,49

*Nota: No se calculó la distancia entre centros de las dos primeras circunferencias ya que la primera gota se ve afectada por fenómenos transitorios que no estudian en este TFG. Esto se puede ver reflejado en la diferencia entre el radio de la primera gota y las demás.*

De lo expuesto en la tabla se pueden obtener dos conclusiones:

- El radio de las diferentes circunferencias debería ser igual, sin embargo, se cometen errores a la hora de aproximar las circunferencias mediante el software.
- Se observa que el paso es cuantitativamente diferente al paso esperado de 40  $\mu\text{m}$ . Teóricamente la variación del paso debería ser constante entre todas las gotas, sin embargo, se observa que el paso no permanece constante, lo cual es debido a los errores humanos y de los equipos que se producen durante el tratamiento de las imágenes.

Aplicando todo lo anterior obtenemos los siguientes valores en la primera iteración:

Tabla 5.4. Primera iteración

Primera iteración	
$\bar{W}_x$	47,37
s	3,27
k(n)	2,22
Límite sup.	54,62
Límite inf.	40,11

Se observa que sólo existe un valor de  $W_x$  que sobrepase el límite superior, concretamente la medida 55,699  $\mu\text{m}$ , por lo que eliminamos esa medida y volvemos a realizar una segunda iteración considerando que ahora tenemos 18 medidas. En este caso todos los valores se encuentran en el intervalo, por lo que podemos tomar como valor promedio para el paso el que aparece en la siguiente tabla.

Tabla 5.5. Segunda iteración

Segunda iteración	
$\overline{W_x}$	46,90
s	2,65
k(n)	2,12
Límite sup.	52,72
Límite inf.	41,09

En la tabla 5.6 ya aparecen recogidos los valores necesarios para calcular el índice de *Drawback* ( $\phi$ ). El valor de  $D_{y \text{ real}}$  se ha obtenido directamente a partir de medir la longitud del cordón depositado con el software de análisis de imagen, el valor de  $D_{y \text{ ideal}}$  se ha obtenido con la *ecuación 5.1*, mientras que el valor de  $\phi$  se ha obtenido como el cociente entre ambos valores, tal y como aparece reflejado en la ecuación 3..

$$D_{y \text{ ideal}} = D_s + (m - 1) \cdot W_x \quad (5.1)$$

Tabla 5.6. Cuantificación del *Drawback*

$D_{y \text{ real}}$ ( $\mu\text{m}$ )	925,99
$D_{y \text{ ideal}}$ ( $\mu\text{m}$ )	956,11
$\phi$	0,97

Se repite el procedimiento para las tres deposiciones restantes:

## Deposición 2

Figura 5.6. Interpolación de círculos

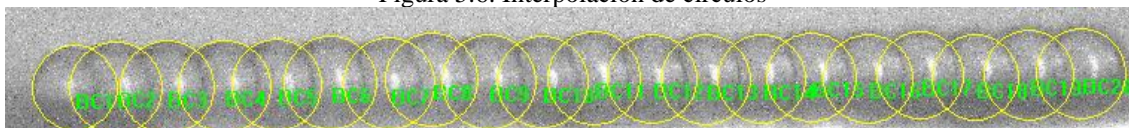


Tabla 5.7. Mediciones.

Circunferencia ( $\mu\text{m}$ )	Radio ( $\mu\text{m}$ )	$W_x$ ( $\mu\text{m}$ )
BC1	37,56	-
BC2	40,69	45,80
BC3	41,19	50,75
BC4	40,77	46,15
BC5	40,03	48,15
BC6	40,86	51,75
BC7	40,28	37,08
BC8	40,69	51,09
BC9	41,68	47,12
BC10	40,44	46,22
BC11	40,86	46,22
BC12	39,29	47,46
BC13	39,70	51,07
BC14	38,88	49,75
BC15	39,04	43,87
BC16	39,04	50,09
BC17	38,14	45,92
BC18	37,73	49,16
BC19	39,70	47,83
BC20	39,37	45,49

Tabla 5.8

Primera iteración	
$\bar{W}_x$	47,42
s	3,38
k(n)	2,22
Límite sup.	54,92
Límite inf.	39,92

Se observa que sólo existe un valor de  $W_x$  que no se encuentra en el intervalo, concretamente la medida 37,08  $\mu\text{m}$ , por lo que eliminamos esa medida y volvemos a realizar una segunda iteración considerando que ahora tenemos 18 medidas. En este caso todos los valores se encuentran en el intervalo, por lo que podemos tomar como valor promedio para el paso el que aparece en la siguiente tabla.

Tabla 5.9.

Segunda iteración	
$\bar{W}_x$	47,99
s	2,34
k(n)	2,20
Límite sup.	53,12
Límite inf.	42,86

Tabla 5.10

$D_y$ real	927,60
$D_y$ ideal	976,79
$\phi$	0,95

### Deposición 3

Figura 5.7. Interpolación de círculos

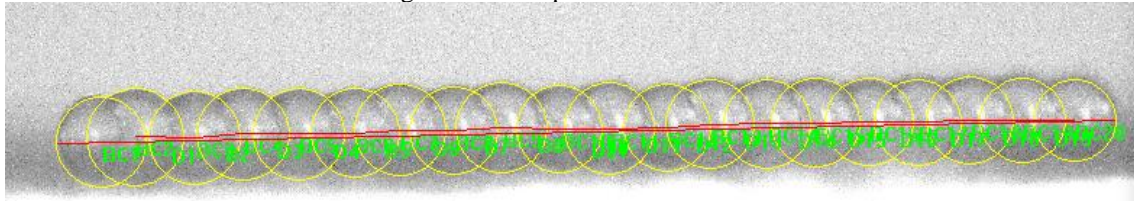


Tabla 5.11. Mediciones

Circunferencia ( $\mu\text{m}$ )	Radio ( $\mu\text{m}$ )	$W_x$ ( $\mu\text{m}$ )
BC1	41,02	-
BC2	44,40	54,37
BC3	41,85	43,62
BC4	41,93	51,07
BC5	41,19	51,08
BC6	40,12	41,27
BC7	41,68	49,09
BC8	39,79	43,88
BC9	41,43	52,41
BC10	39,21	45,47
BC11	41,19	45,47
BC12	39,62	52,72
BC13	40,03	39,02
BC14	40,03	51,73
BC15	40,03	44,16
BC16	39,70	48,77
BC17	39,37	44,49
BC18	39,04	47,16
BC19	38,55	48,11
BC20	37,07	47,45

Tabla 5.12. Primera iteración

Primera iteración	
$\bar{W}_x$	47,44
s	4,18
k(n)	2,22
Límite sup.	56,70
Límite inf.	38,18

Todas las medidas se encuentran en el intervalo calculado, no es necesaria una segunda iteración.

Tabla 5.13.

$D_y$ real	927,90
$D_y$ ideal	966,25
$\phi$	0,96

#### Deposición 4

Figura 5.8. Interpolación de círculos



Tabla 5.14. Mediciones

Circunferencia ( $\mu\text{m}$ )	Radio ( $\mu\text{m}$ )	$W_x$ ( $\mu\text{m}$ )
BC1	37,40	-
BC2	40,53	42,21
BC3	40,20	49,78
BC4	41,02	43,51
BC5	41,02	55,07
BC6	40,28	46,27
BC7	41,35	48,44
BC8	41,85	44,16
BC9	42,17	48,77
BC10	40,28	55,04
BC11	39,21	55,04
BC12	40,61	41,25
BC13	39,62	49,09
BC14	39,79	48,44
BC15	38,88	42,50
BC16	38,22	52,73
BC17	39,54	44,83
BC18	39,62	48,44
BC19	38,63	48,12
BC20	35,91	54,10

Tabla 5.15. Primera iteración

Primera iteración	
$\overline{W}_x$	48,30
s	4,53
k(n)	2,22
Límite sup.	58,36
Límite inf.	38,25

Todas las medidas se encuentran en el intervalo calculado, no es necesaria una segunda iteración.

Tabla 5. 16

Dy real	939,07
Dy ideal	982,70
$\phi$	0,96

El valor promedio del parámetro que cuantifica el efecto del *Drawback* en la deposición de cordones horizontales es el siguiente:

$$\phi_{promedio} \quad 0,9585$$

Conviene analizar, como se ha mencionado anteriormente, si las diferencias que se producen entre el paso teórico y el real son debidas a un error que acompaña al proceso de impresión o bien, se debe a la influencia del *Drawback* en la deposición. Comparamos el error de impresión que se produce en las cuatro deposiciones que se han realizado y el error que se obtiene a partir de los datos de la *tabla 5.2*.

Tabla 5.17. Influencia del *Drawback* en el error de impresión

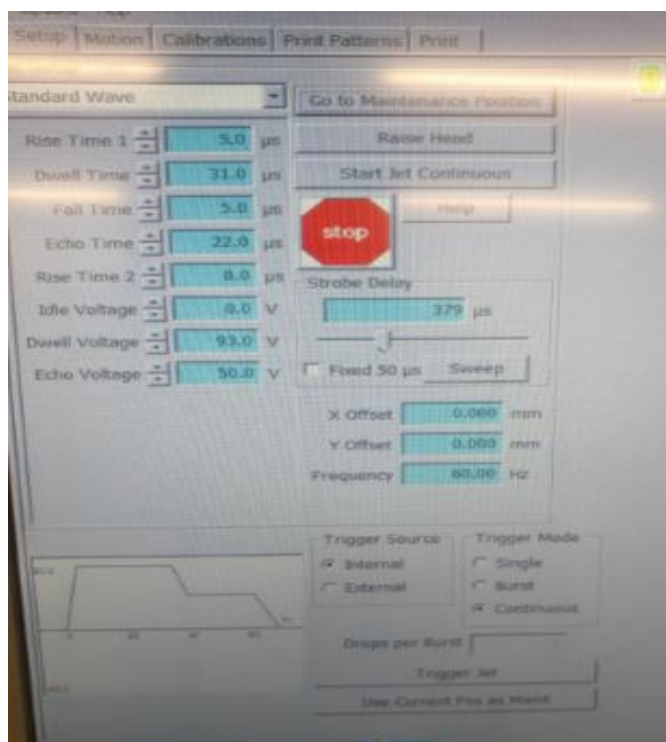
	Distancia entre centros ( $\mu\text{m}$ )		
	Teórica	Real	Error (%)
Deposiciones horizontales	40,00	47,63	19,08
Tres gotas individuales	200,00	236,93	18,46

Debido a que el error que se produce en la deposición de gotas individuales y en la deposición de cordones horizontales, donde las gotas se solapan unas con otras, es similar, se puede afirmar con cierta seguridad que el *Drawback* no influye en el error de deposición, en consecuencia, cuando en lo sucesivo nos refiramos a error de deposición se estará haciendo referencia al error cometido por la máquina de impresión.

## 5.2. Determinación del ángulo de solidificación

El experimento anterior, en el que se cuantificó el *Drawback*, no es adecuado para estudiar el paso ideal y la rugosidad. Esto es debido al hecho de que el ángulo de solidificación que presentaban las gotas bajo esas condiciones de operación era muy cercano a  $90^\circ$  lo que dificultaba extraordinariamente la correcta medición de los parámetros geométricos debido a que no se apreciaba el sustrato con cierta claridad. Por esta razón se tuvo que repetir el experimento bajo otras condiciones, que se adjuntan a continuación:

Figura 5.9. Parámetros experimentales de impresión para la generación de gotas que permitan la medición del ángulo de solidificación.



En este experimento se realizó la deposición de tres gotas de manera individual en cuatro placas diferentes. Se obtuvieron los ángulos de solidificación de cada una de las gotas siguiendo el procedimiento que se describe en el apartado 3.3.4, concretamente a partir de la ecuación 3.13.

Tabla 5.18. Medida de parámetros en placa 1

		Medidas placa 1		
MEDIA	Parámetros	Gota 1	Gota 2	Gota 3
34,84	h	34,97	33,95	35,61
47,77	a	48,44	48,19	46,67
50,22	R <sub>c</sub>	51,16	51,58	47,92
65,48	D	66,1	65,08	65,26
16,75	y	16,47	17,64	16,15
70,51	θ°	71,22	70,00	70,31
1,23	θ(rad)	1,24	1,22	1,23

Tabla 5.19. Medida de parámetros en placa 2

Medidas placa 2				
MEDIA	Parámetros	Gota 1	Gota 2	Gota 3
33,11	h	33,44	31,95	33,94
48,23	a	48,34	47,84	48,50
50,32	R <sub>c</sub>	51,46	51,58	47,92
64,42	D	64,78	63,16	65,32
18,30	y	17,97	19,47	17,47
68,67	θ °	69,56	67,82	68,62
1,20	θ (rad)	1,21	1,18	1,20

Tabla 5.20. Medida de parámetros en placa 3

Medidas placa 3				
MEDIA	Parámetros	Gota 1	Gota 2	Gota 3
35,00	h	35,11	35,77	34,11
47,59	a	47,67	47,34	47,76
50,19	R <sub>c</sub>	50,04	50,00	50,54
65,48	D	65,62	65,9	64,88
15,36	y	14,98	14,48	16,64
72,18	θ °	72,58	73,17	70,78
1,26	θ (rad)	1,27	1,28	1,24

Tabla 5.21. Medida de parámetros en placa 4

Medidas placa 4				
MEDIA	Parámetros	Gota 1	Gota 2	Gota 3
35,00	h	35,22	35,05	34,73
48,08	a	48,50	48,00	47,75
50,71	R <sub>c</sub>	51,41	50,35	50,37
65,86	D	66,36	65,84	65,38
17,41	y	16,61	18,35	17,28
69,91	θ °	71,15	68,63	69,94
1,22	θ (rad)	1,24	1,20	1,22

*Nota: A todas las mediciones les hemos aplicado el criterio de Chauvenet, los detalles aparecen en el anexo.*

**Placa 1:**

$$\theta = 70,51 \pm 0,023$$

**Placa 2:**

$$\theta = 68,67 \pm 0,03$$

**Placa 3:**

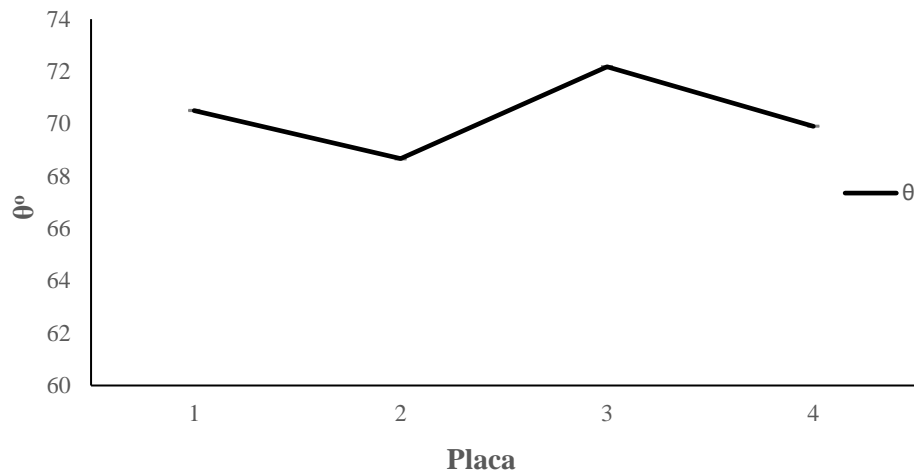
$$\theta = 72,18 \pm 0,024$$



**Placa 4:**

$$\theta = 69,91 \pm 0,019$$

Figura 5.10. Ángulo de solidificación



En consecuencia, el valor medio del ángulo de solidificación es:

$$\bar{\theta} = 70,32 \pm 0,024$$

### 5.3. Determinación del diámetro inicial de la gota D

El diámetro inicial de la gota generada  $D$ , es decir, el diámetro con el que se expulsa la gota de la boquilla se obtiene a partir del procedimiento descrito en el apartado 3.3.4, concretamente de la ecuación 3.11.

**Placa 1:**

$$D = 65,48 \pm 0,54$$

**Placa 2:**

$$D = 64,42 \pm 0,49$$

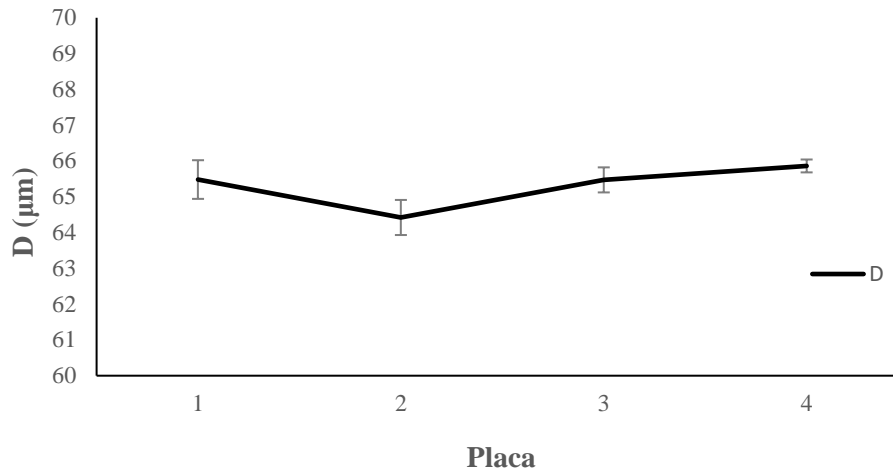
**Placa 3:**

$$D = 65,47 \pm 0,35$$

**Placa 4:**

$$D = 65,86 \pm 0,18$$

Figura 5.11. Diámetro de la gota generada



En consecuencia, el valor medio del diámetro de la gota generada es:

$$\bar{D} = 65,56 \pm 0,39$$

#### 5.4. Cálculo del paso óptimo

Una vez calculados el diámetro y el ángulo de solidificación de las gotas de cada placa se puede proceder con el cálculo del paso óptimo  $W_{op}$  a partir del modelo deducido en el apartado 4.2.3, concretamente usando la expresión 4.31.

**Placa 1:**

$$W_{op} = 61,10 \pm 0,56$$

**Placa 2:**

$$W_{op} = 60,48 \pm 0,54$$

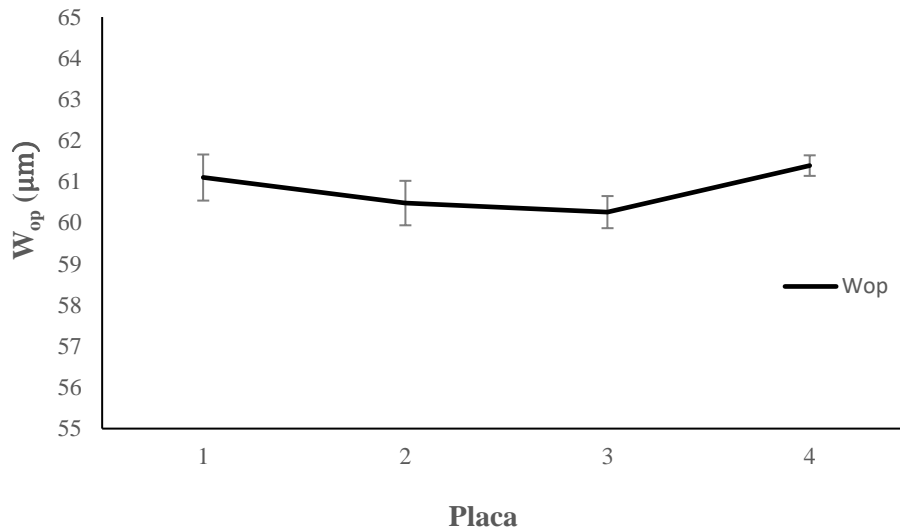
**Placa 3:**

$$W_{op} = 60,26 \pm 0,39$$

**Placa 4:**

$$W_{op} = 61,39 \pm 0,25$$

Figura 5.12. Paso óptimo



En consecuencia, el valor medio del paso óptimo es:

$$\bar{W}_{op} = 60,81 \pm 0,44$$

### 5.5. Cálculo de la rugosidad

Conocidos los valores del ángulo de solidificación, el diámetro inicial y el paso óptimo se puede estimar el valor de la rugosidad de los cordones horizontales según la ecuación 4.49.

**Placa 1:**

$$R_a = 2,33 \pm 0,64$$

**Placa 2:**

$$R_a = 2,26 \pm 0,55$$

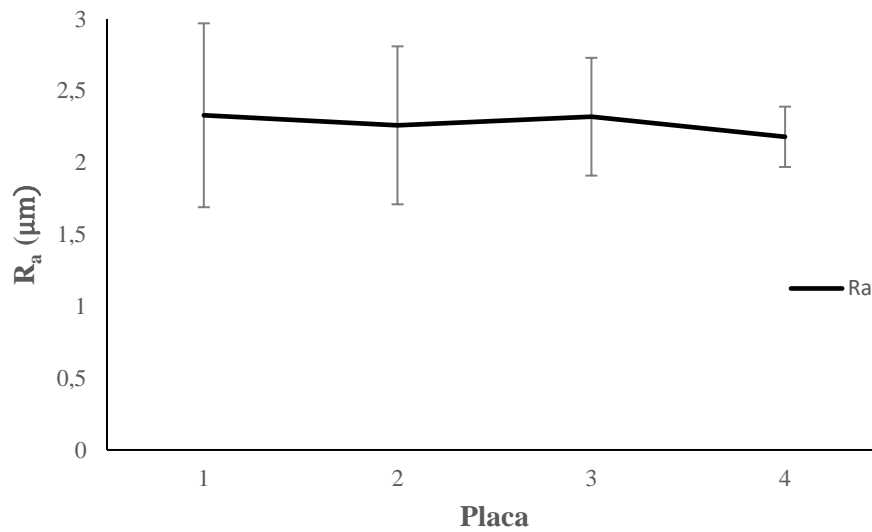
**Placa 3:**

$$R_a = 2,32 \pm 0,41$$

**Placa 4:**

$$R_a = 2,18 \pm 0,21$$

Figura 5.13. Rugosidad mínima



En consecuencia, el valor medio de la rugosidad correspondiente al paso óptimo es:

$$\bar{R}_a = 2,73 \pm 0,46$$

*Nota: Todos los procedimientos para la obtención de las medidas y sus incertidumbres aparecen detallados en el anexo.*

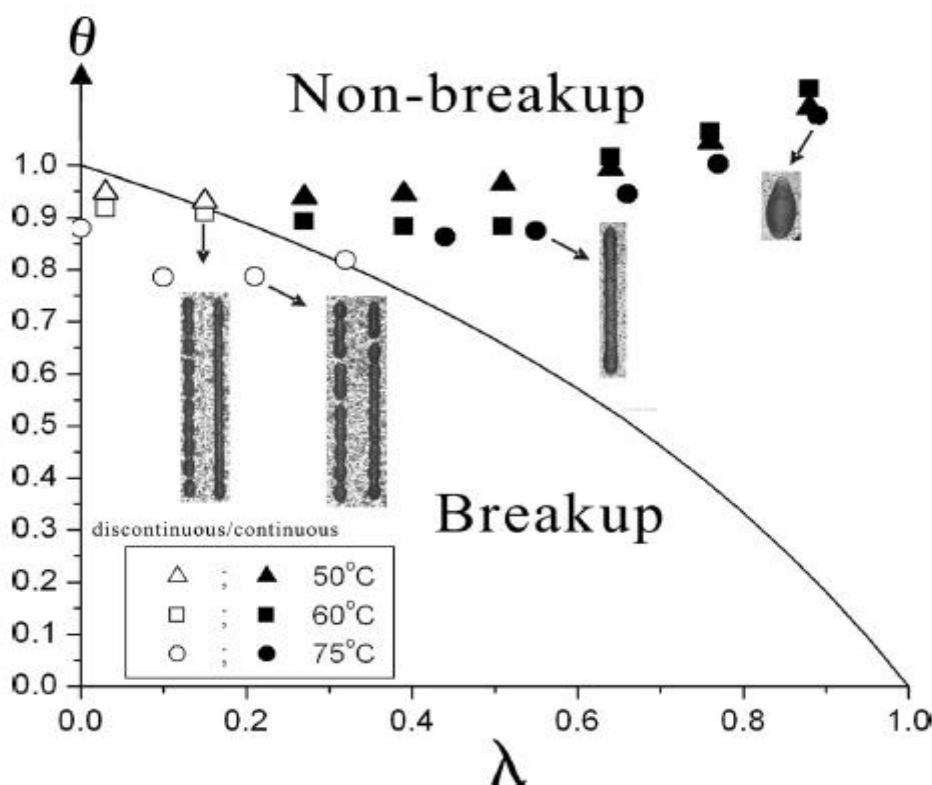
## CAPÍTULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Sobre el *Drawback*

Como se preveía, el valor de  $\phi$  en la formación de cordones horizontales es siempre menor a la unidad. En los resultados experimentales se observa que el valor obtenido resulta muy cercano a la unidad, lo cual implica que apenas se produce este fenómeno y lo podemos considerar como despreciable y de influencia prácticamente nula en nuestros estudios. La razón por la cual los valores son tan cercanos a la unidad probablemente se deba a la baja frecuencia (1 Hz) con la que realizamos la deposición de gotas, ya que la gota que se deposita previamente se encuentra solidificada cuando lo hace la siguiente gota, evitando así que se produzca ese fenómeno de atracción entre ambas que provoca una reducción de la distancia que las separa y origina el fenómeno que aquí se ha estudiado. La influencia de la temperatura del sustrato también resulta importante, el hecho de trabajar a temperatura ambiente provoca que el gradiente de temperaturas sea considerable, produciéndose la solidificación de las gotas más rápidamente.

De igual modo Li, R., Ashgriz y otros. [9] relacionan otro parámetro con la calidad de los cordones depositados, la relación de superposición o solape  $\eta_x$ . Manteniendo la temperatura del sustrato constante, el principal factor que influye en una correcta continuidad del cordón es la relación de superposición u *overlap ratio*, sin embargo, en el artículo mencionado se realizaron una serie de medidas para diferentes temperaturas del sustrato y se plasmaron los resultados en una gráfica muy ilustrativa que se presenta a continuación:

Figura 6.1. Influencia de la temperatura en la relación entre  $\theta$  y  $\eta_x$ .



Fuente: Li, R., Ashgriz, N., Chandra, S., Andrews, J. R. & Williams, J. Drawback During Deposition of Overlapping Molten Wax Droplets. J. Manuf. Sci. Eng. 130, 041011 (2008).

*Nota: En esta gráfica los autores han denominado  $\lambda$  y  $\theta$  a la relación de superposición y al índice de cuantificación del Drawback respectivamente, mientras que en nuestro trabajo se han denominado como  $\eta_x$  y  $\phi$ .*

En nuestro caso:

Tabla 6.1. Relación de superposición.

Deposición	$\phi$	$W_x$	$\bar{D}_s$	$\eta_x$
1	0,97	46,91	64,91	0,28
2	0,95	47,99		0,26
3	0,96	47,44		0,27
4	0,96	48,31		0,26

El valor de  $\eta_x$  se obtiene a partir de la ecuación 4.4. Se puede comprobar que en las cuatro deposiciones nos encontramos en la región de “no rotura”, que es lo adecuado para nuestro propósito de depositar cordones o líneas de deposición continuas. Efectivamente esto se comprueba al observar las imágenes de las deposiciones, en las que podemos apreciar que los cordones son perfectamente continuos. Si bien debe hacerse notar que, aunque esta comparación no es del todo rigurosa, ya que esta ha sido realizada para un material diferente al utilizado en este trabajo y en otras condiciones experimentales, nos sirve como patrón de referencia para establecer nuestras principales observaciones.

Considerando la diferencia entre los materiales se observa que nuestros resultados son coherentes con lo indicado por los investigadores, lo cual puede ser debido a que los materiales presentan cierta similitud, puesto que los valores representados en la *figura 6.1* se han obtenido con cera fundida calentada hasta los 90°C, lo cual no difiere significativamente de lo utilizado en el presente TFG. Por todo lo expuesto anteriormente puede afirmarse que en nuestro estudio el fenómeno de *Drawback* puede considerarse despreciable, por lo que los modelos propuestos para el estudio teórico pueden utilizarse sin realizar correcciones sobre los mismos.

## 6.2 Paso real y paso teórico

A la hora de realizar los experimentos se debe programar la impresora para que realice las deposiciones en las coordenadas “x, y” buscadas para cada experimento. Esta programación se realiza mediante *scripts* y es en esos *scripts* donde se puede hacer que los cordones que posteriormente se depositan lo hagan con un paso u otro.

Tras realizar las oportunas deposiciones de los diferentes cordones se observó que el paso con el que en realidad se estaban situando las diferentes gotas era diferente al esperado o programado en los *scripts*. Debemos distinguir, por tanto, entre dos pasos  $W_x$ :

- Paso teórico: es el paso con el que se programan los *scripts* y con el que se depositarían las diferentes gotas si el proceso fuese ideal.
- Paso real: es el paso verdadero con el que se están realizando las deposiciones.

Existe por tanto un error, al que denominamos “error de deposición” y que viene dado por la siguiente expresión:

$$Error (\%) = \frac{|Paso\ teórico - Paso\ real|}{Paso\ teórico} \cdot 100$$

Este error puede deberse a los efectos gravitacionales u otras fuerzas del tipo inercial que hacen que la gota, en su movimiento a través del aire, se desplace y no realice un movimiento completamente recto o vertical. A continuación, se adjuntan los diferentes pasos reales que se han obtenido para cada placa, así como el error de deposición. La medición del paso real se ha realizado a partir del software de tratamiento de imágenes, mediante la medición de la distancia entre centros de las gotas de cada cordón, a excepción de aquellas que se encuentran afectadas por fenómenos transitorios (las primeras gotas de cada cordón). A las medidas obtenidas se les ha aplicado el criterio de rechazo de *Chauvenet*.

Tabla 6.2. Error de impresión. Placa 1

Paso teórico	Paso real	Error	Error (%)
32,00	38,88	0,21	21,49
40,00	47,77	0,19	19,43
48,00	57,29	0,19	19,36
56,00	65,80	0,17	17,49
64,00	75,70	0,18	18,28

Tabla 6.3. Error de impresión. Placa 2

Paso teórico	Paso real	Error	Error (%)
32,00	37,61	0,18	17,52
40,00	48,18	0,20	20,45
48,00	58,89	0,23	22,69
56,00	66,22	0,18	18,25
64,00	76,01	0,19	18,76

Tabla 6.4. Error de impresión. Placa 3

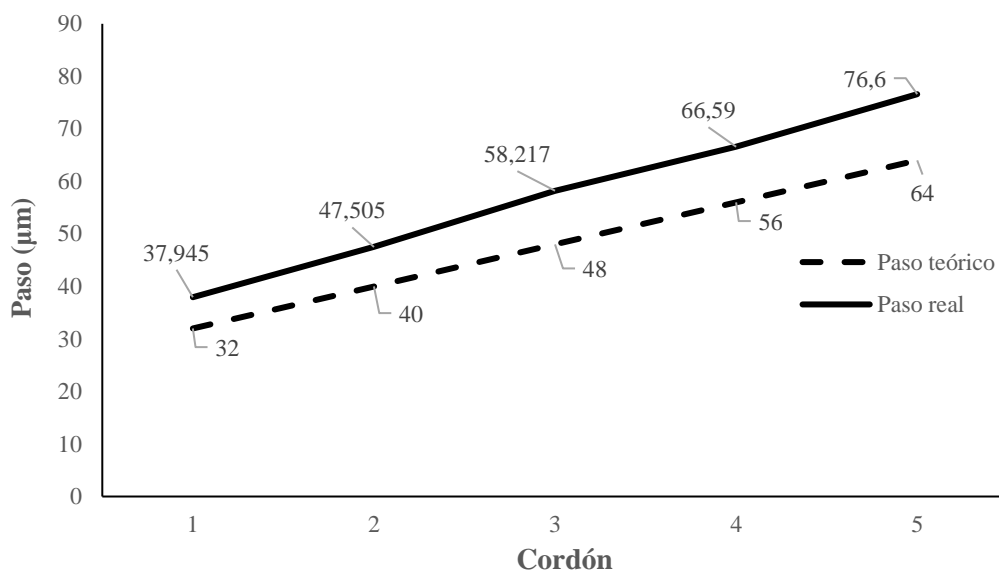
Paso teórico	Paso real	Error	Error (%)
32,00	36,73	0,15	14,79
40,00	46,96	0,17	17,39
48,00	58,79	0,22	22,48
56,00	66,60	0,19	18,94
64,00	78,80	0,23	23,12

Tabla 6.5. Error de impresión. Placa 4

Paso teórico	Paso real	Error	Error (%)
32,00	38,56	0,21	20,51
40,00	47,11	0,18	17,77
48,00	57,90	0,21	20,62
56,00	67,74	0,21	20,96
64,00	75,88	0,19	18,56

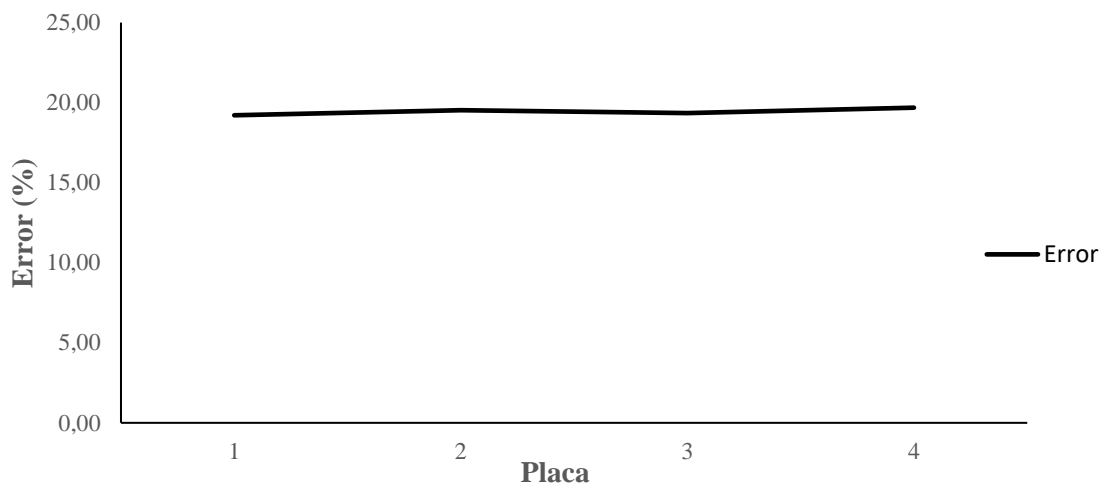


Figura 6.2. Pasos teórico y real para los diferentes cordones depositados. Valores medios.



*Nota: A los cordones 1,2,3,4 y 5 le corresponde unos pasos teóricos de 32, 40, 48, 56 y 64 µm respectivamente. Los datos representados son valores promedio de las cuatro placas o experimentos realizados.*

Figura 6.3. Error de deposición (%) en cada placa.



*Nota: En la figura 6.3 aparece representado el error promedio que se comete en cada placa.*

El error en la deposición se mantiene constante para cada placa y es de un 20% aproximadamente. Valores similares a los obtenidos en el apartado 5.1, por lo que se puede asegurar con cierta confianza que el error producido en la deposición de las gotas es debido únicamente a la máquina y no a otros fenómenos de interacción entre las gotas depositadas.

### 6.3 Comparación de rugosidades teóricas y experimentales

En este apartado se van a analizar y comparar los valores de rugosidad obtenidos mediante el modelo experimental y teórico (ecuaciones 3.14 y 4.49 respectivamente).

Para poder usar el modelo teórico necesitamos conocer los valores de los ángulos de solidificación, el diámetro de la gota generada y el paso. Los dos primeros valores ya se han obtenido en los apartados 5.2 y 5.3. El paso o distancia entre centros se obtendrá a partir de la medida de diez gotas de cada cordón. Sustituyendo esas tres variables en la ecuación del modelo se obtendrán los valores de rugosidad teórica de cada uno de los cordones.

Por otro lado, el modelo experimental, además del paso, necesita una nueva variable, el diámetro del casquete esférico de las gotas del cordón depositadas sobre el sustrato  $D_c$ . Este valor se obtendrá a partir de la medida de diez gotas de cada cordón. A todas las medidas se les realiza un tratamiento de acuerdo con lo expuesto en el apartado de metodología, de forma que los valores de rugosidad irán acompañados de una determinada variabilidad. A continuación, se muestran los valores de rugosidad  $R_a$  obtenidos con ambos modelos.

Tabla 6.6. Rugosidades, placa 1.

Paso ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad experimental ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad teórica ( $\mu\text{m}$ )	
Teórico	Experimental	$R_a$	Variabilidad	$R_a$	Variabilidad
32,00	38,36	0,81	0,05	0,92	0,25
40,00	49,03	0,95	0,06	1,50	0,41
48,00	57,38	1,40	0,10	2,06	0,57
56,00	66,02	2,59	0,12	2,72	0,75
64,00	75,64	3,51	0,06	3,57	0,33

Tabla 6.7. Rugosidades, placa 2.

Paso ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad experimental ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad teórica ( $\mu\text{m}$ )	
Teórico	Experimental	$R_a$	Variabilidad	$R_a$	Variabilidad
32,00	37,50	0,68	0,04	0,87	0,21
40,00	48,73	0,96	0,04	1,47	0,36
48,00	57,37	1,52	0,09	2,03	0,17
56,00	65,99	2,39	0,05	2,69	0,22
64,00	77,47	3,49	0,12	3,71	0,30

Tabla 6.8. Rugosidades, placa 3.

Paso ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad experimental ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad teórica ( $\mu\text{m}$ )	
Teórico	Experimental	$R_a$	Variabilidad	$R_a$	Variabilidad
32,00	37,51	0,71	0,05	0,90	0,24
40,00	47,44	0,80	0,04	1,44	0,39
48,00	57,35	1,56	0,11	2,10	0,57
56,00	65,59	2,44	0,19	2,75	0,74
64,00	76,49	3,27	0,27	3,74	1,01

Tabla 6.9. Rugosidades, placa 4.

Paso ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad experimental ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad teórica ( $\mu\text{m}$ )	
Teórico	Experimental	R <sub>a</sub>	Variabilidad	R <sub>a</sub>	Variabilidad
32,00	38,27	0,77	0,05	0,90	0,08
40,00	48,97	0,82	0,04	1,48	0,14
48,00	58,54	1,54	0,09	2,11	0,19
56,00	67,53	2,44	0,14	2,81	0,26
64,00	75,74	3,39	0,05	3,53	0,32

Figura 6.4. Modelo teórico vs experimental.

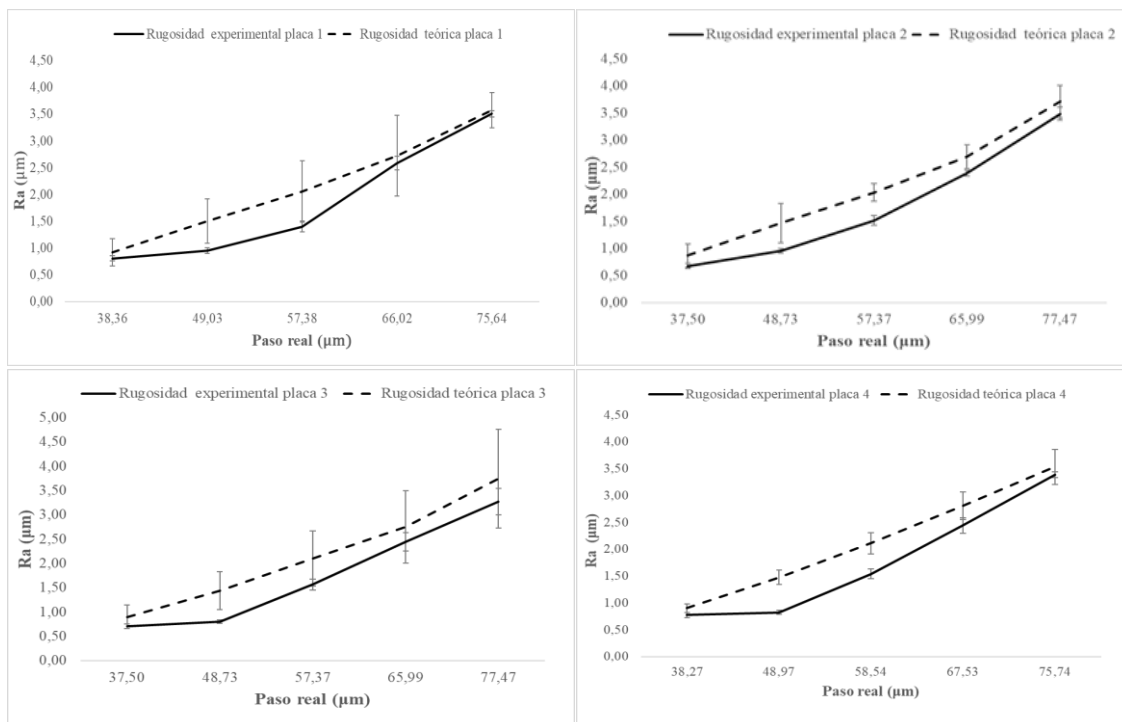


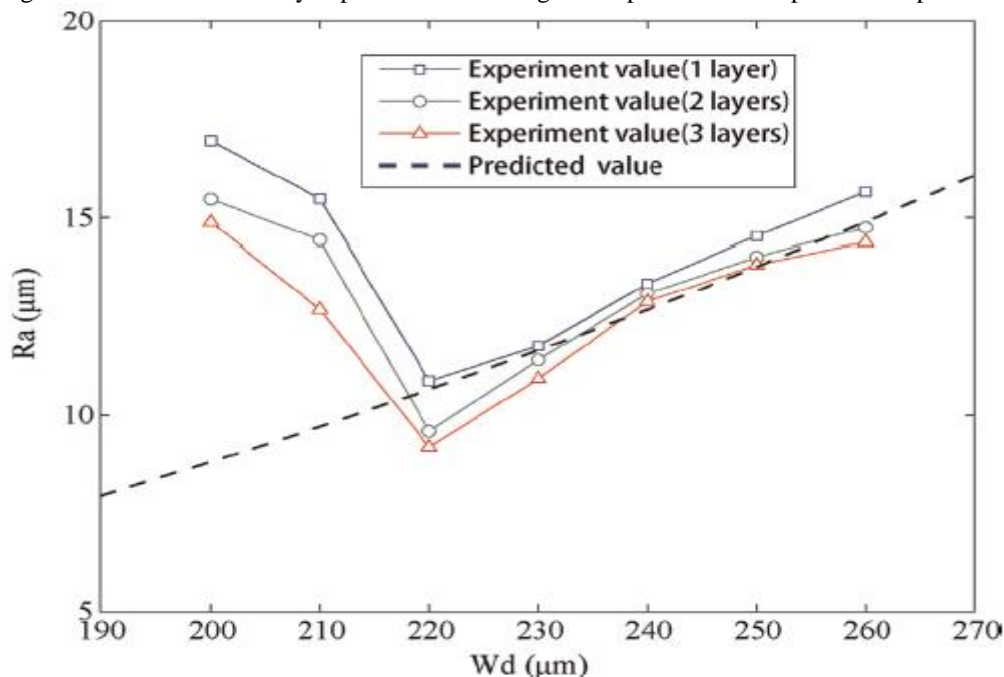
Tabla 6.10. Valores promedio de los cuatro experimentos

Paso		Rugosidad experimental ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad teórica ( $\mu\text{m}$ )		Error (%)
Teórico	Experimental	R <sub>a</sub>	Variabilidad	R <sub>a</sub>	Variabilidad	
32,00	37,91	0,74	0,05	0,90	0,20	17,78
40,00	48,54	0,89	0,04	1,47	0,33	39,54
48,00	57,66	1,51	0,10	2,08	0,37	27,40
56,00	66,28	2,47	0,13	2,74	0,49	9,85
64,00	76,33	3,41	0,13	3,64	0,49	6,32

En las cuatro placas, representadas por las cuatro gráficas anteriores, se observa claramente un mismo patrón de comportamiento. A partir de la representación gráfica

del modelo teórico se puede comprobar su linealidad, lo cual implica que a menor paso o distancia entre centros menor será la rugosidad. Sin embargo, cabe esperar que, si la distancia entre centros resulta demasiado pequeña, es decir, está por debajo de un determinado valor, se producirá una superposición entre las gotas depositadas, pasando de un modelo de deposición horizontal a otro de deposición vertical donde se producirían inicialmente columnas inclinadas. Se puede deducir, por tanto, que este modelo teórico de predicción de la rugosidad solo será válido a partir de un cierto paso de deposición. Así lo demuestran los estudios realizados por Le-hua Qi y otros, los cuales, tras proponer el modelo teórico, realizan una comparación de los valores propuestos por el modelo y los obtenidos en la experimentación (Qi,L y otros, 2012) [7].

Figura 6.5 Valores teóricos y experimentales de rugosidad para diferentes pasos de impresión.



Fuente: Qi, L., Zhong, S., Luo, J., Zhang, D. & Zuo, H. Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture. Int. J. Mach. Tools Manuf. 88, 206–213 (2015).

De este estudio, como se aprecia en la *figura 6.5* se puede confirmar la validez parcial del modelo teórico a partir de un cierto valor de  $W_x$  (220 µm). En dicho trabajo se realizan tres experimentos, la diferencia entre ellos es que se van añadiendo sucesivas capas de material impreso, de forma que en los experimentos 2 y 3, el cordón al que se le realiza el análisis de la rugosidad se ha depositado sobre otro cordón depositado previamente, por lo que las condiciones de solidificación pueden resultar diferentes a las de nuestro experimento, en el cual el cordón depositado solidifica directamente sobre el sustrato metálico. Por tanto, para realizar una comparación adecuada con los experimentos realizados en este trabajo solo tomaremos como referencia el experimento 1 de la gráfica anterior, puesto que se ha realizado depositando un único cordón horizontal. El experimento 1 mencionado, se realiza bajo las siguientes condiciones:

Figura 6.6. Condiciones de experimentación de la referencia 7.

Table 1

Design of experiments for top surface roughness investigation.

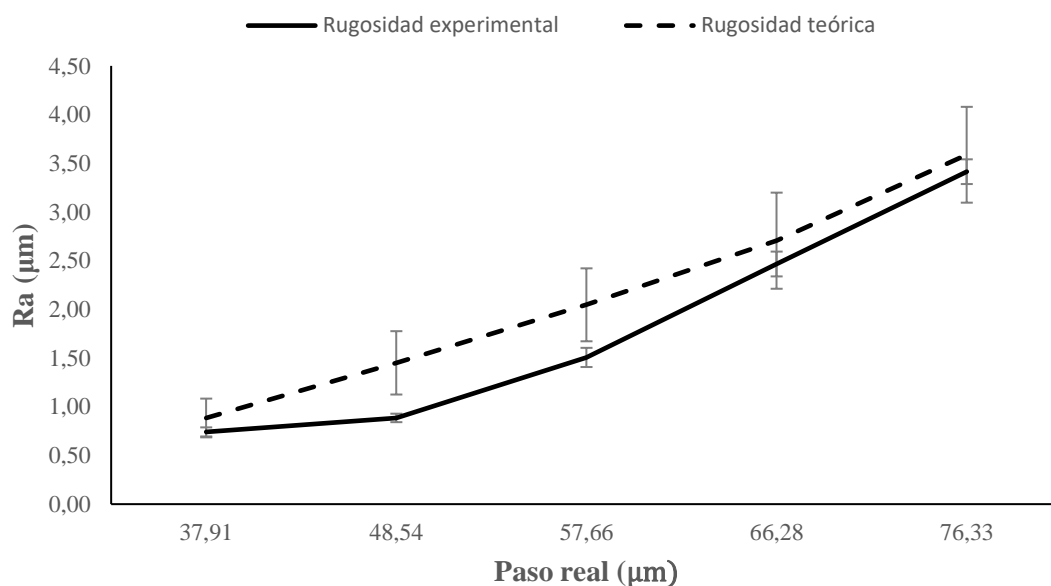
Mean diameter of droplets ( $D$ )	270 $\mu\text{m}$							
Angle of solidification ( $\alpha$ )	115°							
Spread diameter ( $D_s=2r$ )	291 $\mu\text{m}$							
Scan step ( $W_d$ )	200 $\mu\text{m}$	210 $\mu\text{m}$	220 $\mu\text{m}$	230 $\mu\text{m}$	240 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	260 $\mu\text{m}$	
Number of deposited layers ( $n$ )	1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Qi, L. et al. A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture. Int. J. Mach. Tools Manuf. 56, 50–58 (2012).

De la representación gráfica observamos que los resultados experimentales se ajustan al modelo teórico solo a partir de un paso de deposición de 220  $\mu\text{m}$ . Para valores inferiores a ese valor la discordancia entre los datos teóricos y experimentales es evidente, y es debida al fenómeno de superposición entre gotas antes mencionado, fenómeno que el modelo teórico no tiene en cuenta.

Para permitir un correcto análisis de cómo se ajusta el modelo teórico a la realidad en los experimentos realizados en nuestro trabajo adjuntamos una gráfica que aúna los valores obtenidos en las cuatro placas.

Figura 6.7. Comparación de los modelos teórico y experimental. Valores medios de las 4 placas.



Como se ha dicho anteriormente, se observa un claro patrón en los resultados obtenidos experimentalmente, además, los resultados obtenidos se comportan de manera similar a los que aparecen en la figura 6.5. El modelo teórico comienza a ajustarse a la realidad a partir de un paso de 37  $\mu\text{m}$  aproximadamente, para valores inferiores se produciría el fenómeno de superposición antes mencionado, generándose columnas verticales. Efectivamente esto es así, puesto que, a partir de otros experimentos realizados por otro TFG [19] bajo las mismas condiciones, se observa que para un paso teórico de 24  $\mu\text{m}$  (aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  considerando el error de deposición) se

comienzan a generar columnas inclinadas, saliéndose de las restricciones de trabajo establecidas aplicadas en este trabajo y desajustándose, como cabía esperar, el modelo teórico de la realidad.

A partir de las 37  $\mu\text{m}$  los resultados experimentales tienden a alejarse un poco del modelo teórico para finalmente comenzar a ajustarse completamente para pasos reales superiores a 66  $\mu\text{m}$  (56  $\mu\text{m}$  teóricas). Por tanto, se puede deducir que el modelo teórico aumenta su fiabilidad para unos valores de paso  $W_x$  suficientemente elevados, alcanzándose una buena concordancia para valores cercanos al del diámetro inicial de la gota generada.

Recurriendo a la ecuación 3.14 podemos caracterizar los valores de rugosidad obtenidos en cada placa a partir de la medida del diámetro del casquete esférico solidificado sobre el sustrato y los diferentes pasos con los que se realizan los distintos cordones. A continuación, se va a analizar cómo influye cada uno de los parámetros en la rugosidad experimental para poder justificar el comportamiento del modelo experimental.

Tabla 6.11. Influencia de  $W_x$  y  $D_c$  en el modelo experimental de rugosidad. Valores medios.

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$W_x$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_c$ ( $\mu\text{m}$ )
0,74	37,91	124,76
0,89	48,54	155,38
1,51	57,66	136,54
2,47	66,28	120,37
3,41	76,33	109,59

Figura 6.8. Variación de la rugosidad en el modelo experimental. Valores medios.

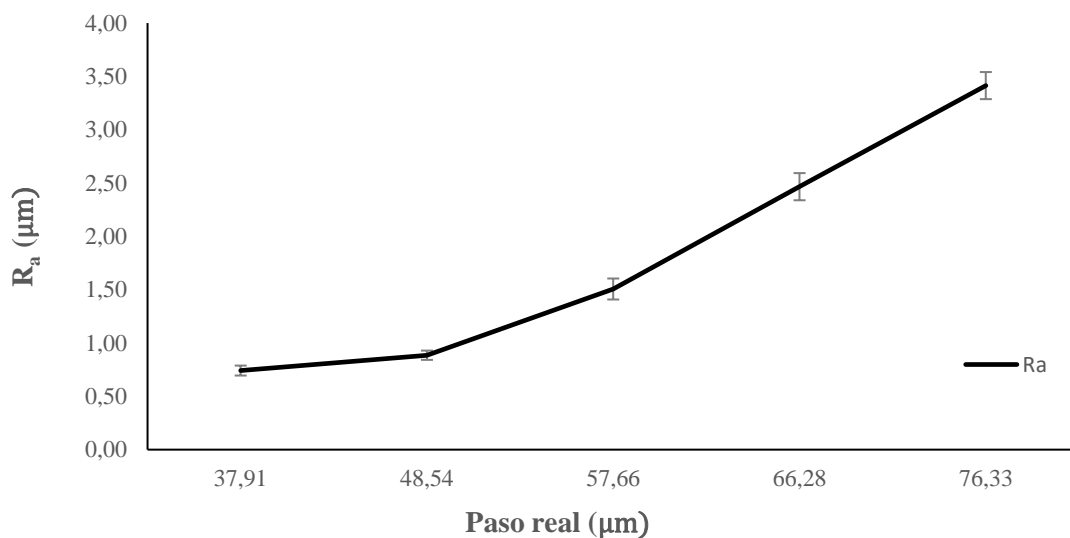
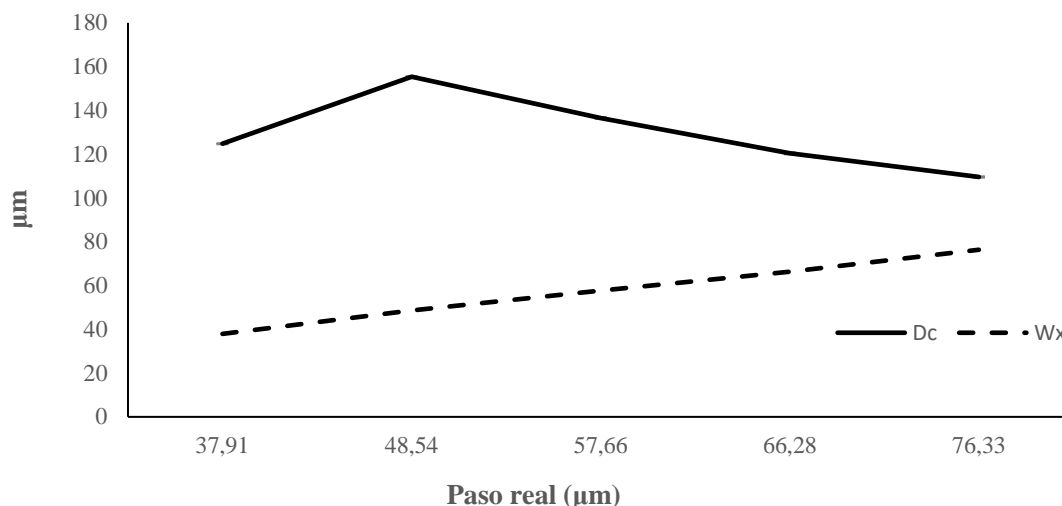


Figura 6.9. Variación de  $D_c$  y  $W_x$  en cada deposición. Valores medios.



De lo anterior se deduce que es el diámetro  $D_c$  el que parece provocar que el modelo teórico no se ajuste a los resultados experimentales para todos los valores de paso o distancia entre centros en los que no entra en juego el fenómeno de superposición.

En la *figura 6.7* se observa que el intervalo en el que no se produce el ajuste entre ambos modelos se corresponde con el intervalo en el que  $D_c$  deja de tener un valor aproximadamente constante, lo cual sucede en los cordones depositados con pasos teóricos de 40 y 48  $\mu\text{m}$ . Esta observación sugiere, que si el diámetro  $D_c$  se mantuviese constante para todo el rango de valores de  $W_x$ , el modelo teórico de predicción de rugosidad se ajustaría perfectamente al modelo experimental a excepción únicamente de los valores de  $W_x$  en los que se produce la superposición y generación de columnas verticales, y permitiría, por tanto, una correcta predicción de la rugosidad que tendrían los cordones horizontales partiendo únicamente de los valores del diámetro inicial de la gota generada, el ángulo de solidificación con el sustrato y el paso con el que se programe el proceso de deposición. Puesto que todas las gotas se depositan bajo unas mismas condiciones experimentales lo esperado es que todas ellas tengan, aproximadamente, un mismo valor de  $D_c$ . El hecho de que no sea así induce a pensar que el modelo utilizado para la medición de la rugosidad experimental es el causante de dicha anomalía, y, por tanto, de que los modelos teórico y experimental no se ajusten completamente.

El aumento del diámetro  $D_c$  implica una disminución de la rugosidad (*ecuación 3.14*), por lo que los cordones depositados con un paso teórico de 40 y 48  $\mu\text{m}$  deberían ser aquellos que presenten una menor rugosidad si solo influyese esta variable en el modelo, sin embargo esto no es así, el paso con el que se realiza la deposición  $W_{op}$  provoca que, a pesar de tener un diámetro  $D_c$  menor, el cordón que presenta una menor rugosidad superficial sea el depositado con 32  $\mu\text{m}$  debido a la menor distancia entre los centros de las gotas.

Figura 6.10. Medición de  $D_c$  y  $W_x$ . Placa 1, paso teórico 32  $\mu\text{m}$ .

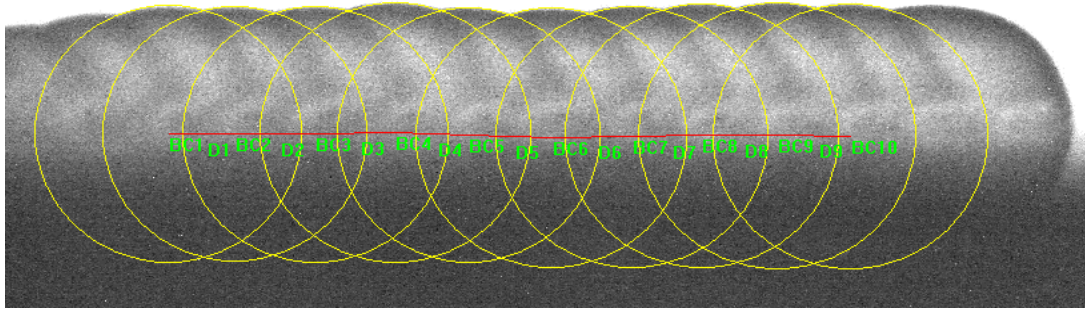


Figura 6.11. Medición de  $D_c$  y  $W_x$ . Placa 1, paso teórico 40  $\mu\text{m}$ .

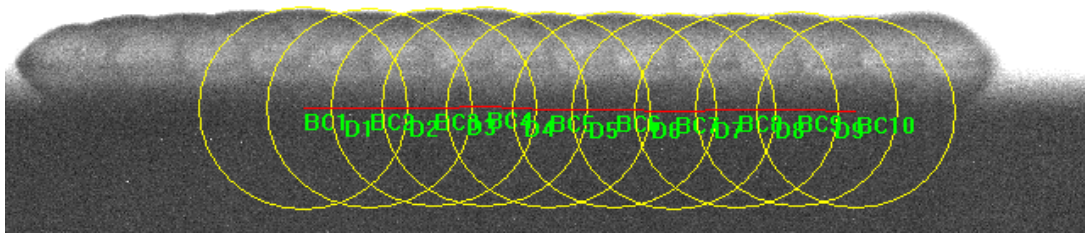


Figura 6.12. Medición de  $D_c$  y  $W_x$ . Placa 1, paso teórico 48  $\mu\text{m}$ .

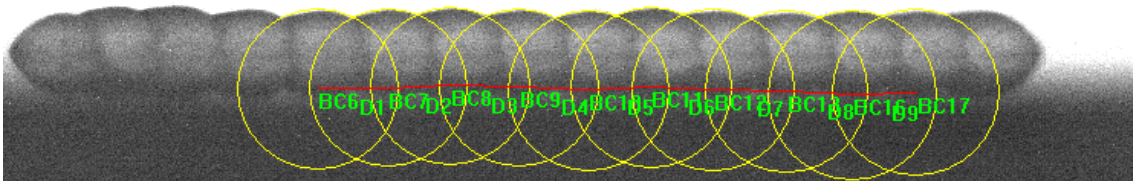


Figura 6.13. Medición de  $D_c$  y  $W_x$ . Placa 1, paso teórico 56  $\mu\text{m}$ .

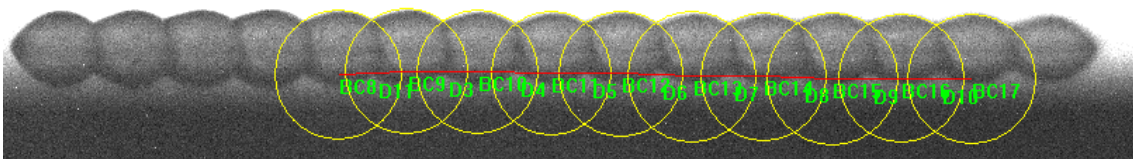
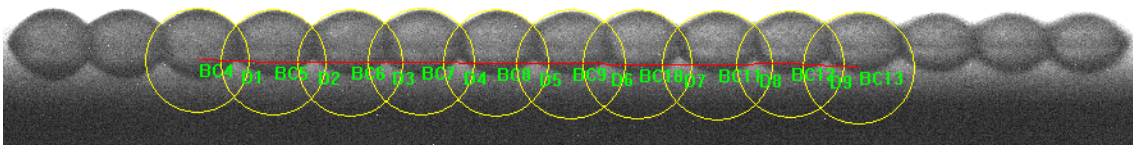


Figura 6.14. Medición de  $D_c$  y  $W_x$ . Placa 1, paso teórico 64  $\mu\text{m}$ .



Todas las imágenes que aquí se han expuesto resultan extrapolables a las tres placas restantes, puesto que en todas las placas el comportamiento ha resultado similar. El análisis que aquí se ha propuesto se encuentra, en cierta parte, limitado al reducido



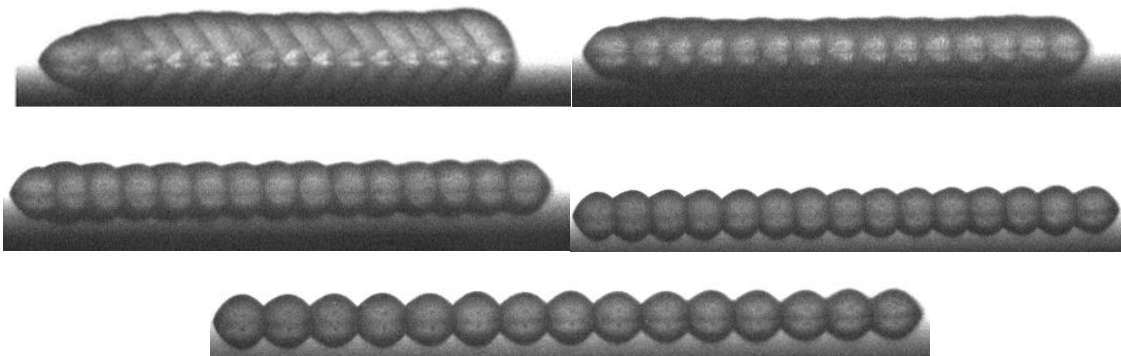
número de pasos empleados en las deposiciones y a la pequeña diferencia de valores entre ellos (8  $\mu\text{m}$  aproximadamente). Para realizar un análisis con total seguridad hubiera resultado adecuado realizar la deposición de un mayor número de cordones, aumentando el número de pasos empleados en cada placa, lo cual nos hubiese permitido obtener una curva parecida a la de la *figura 6.5*, que nos hubiese, a su vez, permitido analizar el comportamiento completo del modelo teórico, sin tener que recurrir a suposiciones.

#### 6.4 Paso óptimo

Según lo expuesto en el *apartado 5.4*, el paso que nos proporciona una mejor rugosidad en la deposición de los cordones horizontales para las condiciones de trabajo antes expuestas se encontraría entorno a las 60  $\mu\text{m}$ . A continuación, se adjuntan las imágenes de los diferentes cordones de la placa 1, con paso teórico de 32, 40, 48, 56 y 64  $\mu\text{m}$  respectivamente.

#### Placa 1:

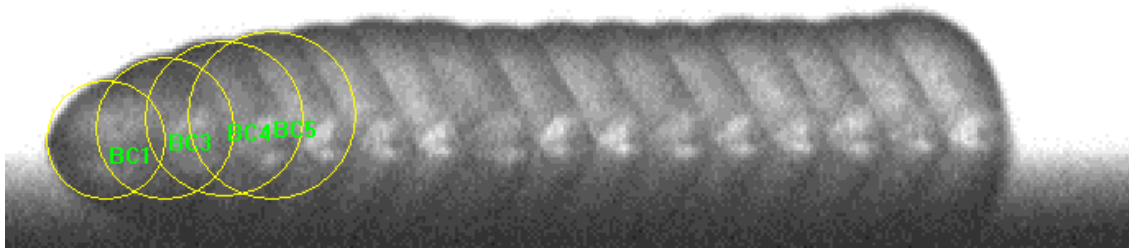
Figura 6.15. Placa 1. Paso teórico 32, 40, 48, 56, 64  $\mu\text{m}$



*Nota: A modo de ejemplo solo se muestran las imágenes correspondientes a los cordones de la placa 1. Los cordones del resto de placas son similares.*

Mediante una simple inspección visual, sin recurrir todavía a los valores medidos de rugosidad experimental, se observa claramente que el valor del paso óptimo  $W_{op}$  no se ajusta a lo expuesto en las imágenes. Según se puede observar, los cordones que presentan unas mejores condiciones de rugosidad serían los que se han programado con pasos teóricos de 32 y 40  $\mu\text{m}$ . Hay que tener en cuenta que estos análisis visuales se están realizando sin tener en cuenta los fenómenos transitorios que se producen al principio de la deposición de cada cordón, y que resultan bastante evidentes en el cordón de 32  $\mu\text{m}$ .

Figura 6.16. Fenómenos transitorios. Paso teórico 32  $\mu\text{m}$ .



Estos fenómenos transitorios que se producen se obvian en el presente TFG a la hora de realizar las distintas mediciones que nos permiten obtener los valores de rugosidad. La razón es que el modelo teórico de predicción de la rugosidad solo resulta aplicable bajo ciertas suposiciones iniciales, como la de que las gotas depositadas generan un perfil uniforme que se puede aproximar como una secuencia periódica de arcos de circunferencia [7].

Como se puede observar en la *figura 6.16*, en las primeras gotas depositadas estos fenómenos provocan irregularidades en la morfología de dichas gotas, provocando gotas de diámetros muy diferentes y que invalidan, por tanto, la aplicación del modelo teórico. Por esta razón, las mediciones se realizan a partir de aquellas gotas en las que los fenómenos transitorios dejan de tener influencia, desde la cuarta gota hasta la decimocuarta, donde los diámetros  $D_c$  se estabilizan y permiten la generación de un perfil uniforme (*figura 6.17*). Si se realizasen las mediciones sobre las gotas afectadas por los fenómenos transitorios la comparación entre modelo teórico y experimental carecería de validez.

Figura 6.17. Variación de  $D_c$  a causa de fenómenos transitorios. Paso teórico 32  $\mu\text{m}$ .

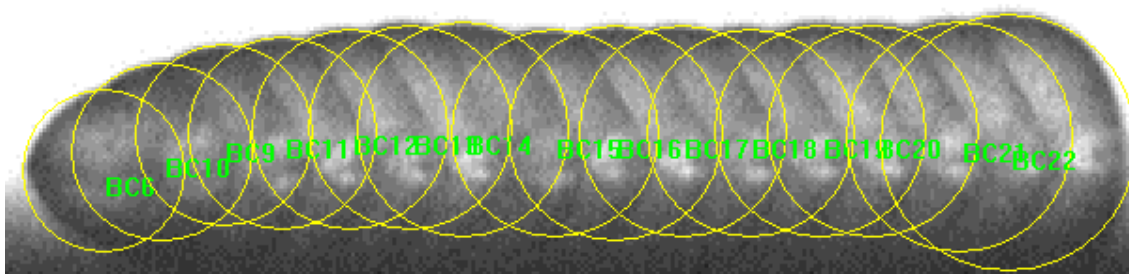
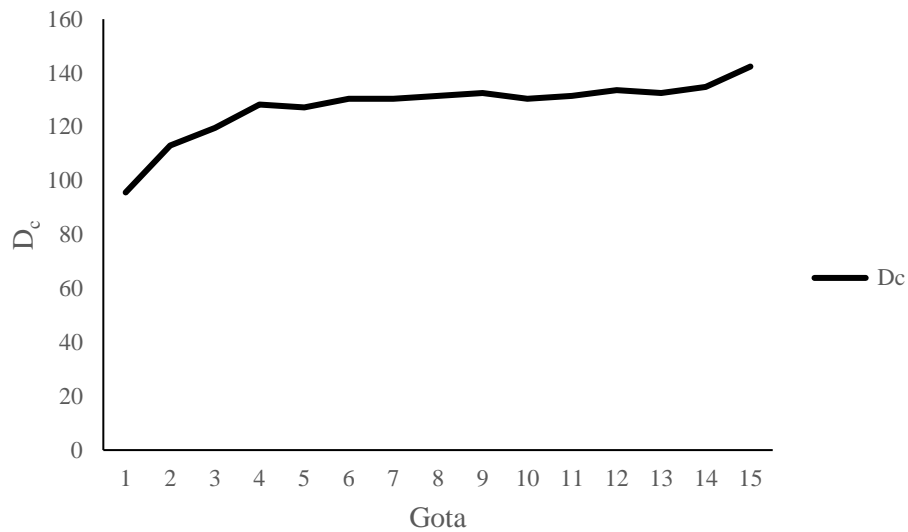
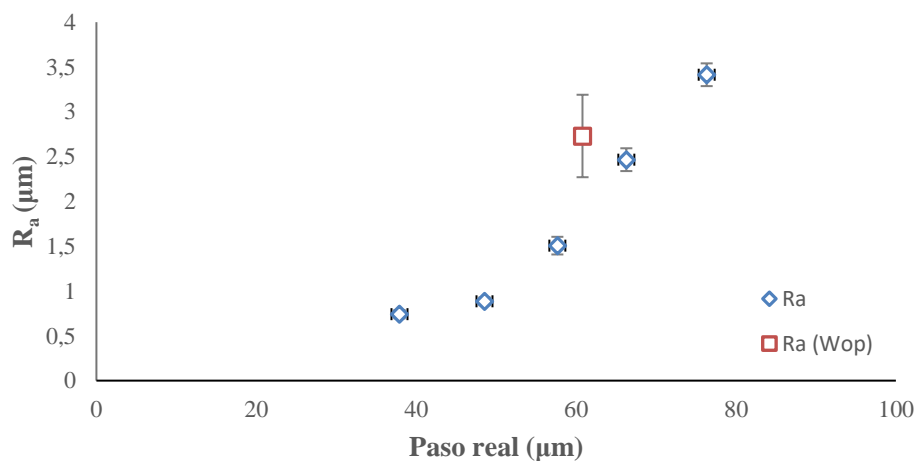


Figura 6.18. Representación gráfica de la variación de  $D_c$  por fenómenos transitorios. Paso teórico 32  $\mu\text{m}$ .



Si consideramos la influencia del error de deposición, el cordón de las imágenes con el paso más cercano al paso óptimo predicho por el modelo (60 $\mu\text{m}$ ) es el cordón de la *figura 6.12*, con un paso teórico de 48  $\mu\text{m}$ , lo cual se corresponde con un paso real de 58  $\mu\text{m}$  aproximadamente. De un simple análisis visual de la *figura 6.15* se observa que este cordón no es aquel que presenta una rugosidad mínima, por tanto, el paso óptimo no es el que proporciona un menor valor de rugosidad  $R_{a(Wop)}$  en los cordones depositados, lo cual se confirma en siguiente gráfica:

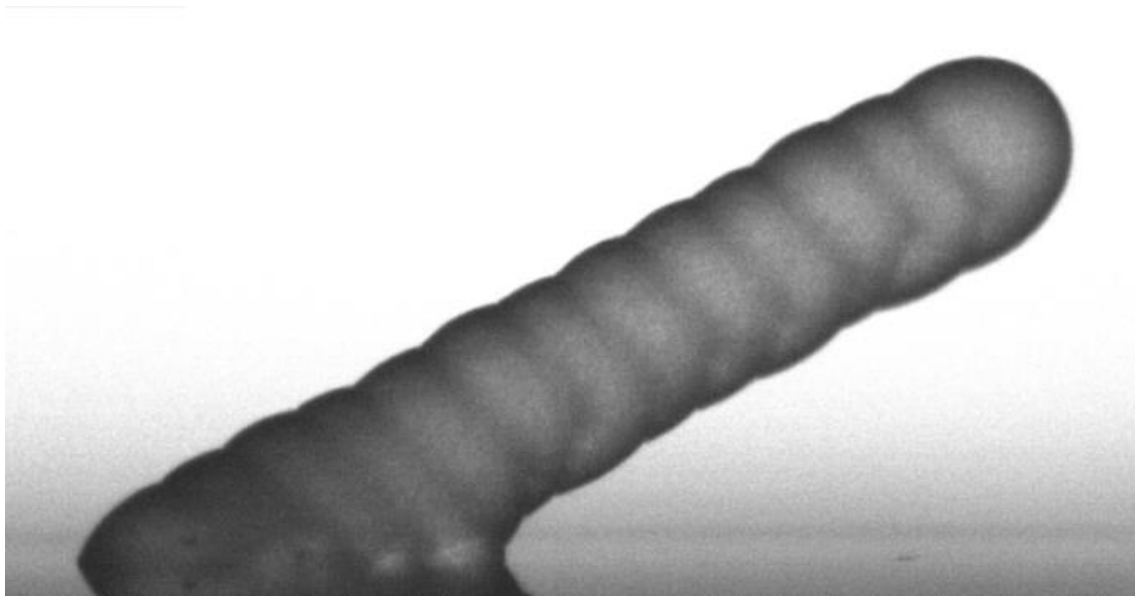
Figura 6.19. Rugosidad experimental vs rugosidad óptima predicha por el modelo teórico



Analizando los valores de rugosidad proporcionados por el modelo experimental, en la *figura 6.7* se observa como los valores de rugosidad disminuyen a medida que lo hace el paso siguiendo una tendencia aproximadamente potencial, alcanzando el valor mínimo para un paso teórico entorno a las 32  $\mu\text{m}$ . Para valores del paso inferiores carecemos de datos, pero de la tendencia de las curvas se puede extraer

que a partir de esos valores la rugosidad tiende a estabilizarse, por lo que se puede extraer que el paso óptimo real que proporciona unos valores de rugosidad mínima sea el de  $32\ \mu\text{m}$  aproximadamente. Además, es muy probable que para valores de paso inmediatamente inferiores comience a producirse la superposición de las gotas y se generen columnas verticales, resultando inadecuados todos los modelos aquí propuestos. En la siguiente imagen se puede observar como para un paso teórico de  $24\ \mu\text{m}$  ya se genera una columna parcialmente vertical.

Figura 6.20. Columna con paso teórico de  $24\ \mu\text{m}$ .



*Nota: Esta columna se realizó bajo las mismas condiciones experimentales que las de los cordones horizontales.*

Se puede afirmar con cierta seguridad, que un paso teórico aproximadamente de  $32\ \mu\text{m}$  es la mínima distancia entre centros con la que podemos programar la deposición sin que se produzca la superposición excesiva de las gotas. Por tanto, si a la hora de realizar el experimento hubiésemos realizado un mayor número de deposiciones y con un mayor rango de pasos, es muy probable que obtuviésemos una curva muy parecida a la que aparece en la *figura 6.5* alcanzándose el valor de rugosidad mínima para un paso de  $32\ \mu\text{m}$ , mientras que para valores inferiores se produciría un aumento repentino de la rugosidad debido a la formación de columnas verticales, tal y como aparece en la gráfica mencionada.

Una vez conocido el valor de  $W_x$  que permite una mínima rugosidad  $R_a$  en los cordones depositados, se puede calcular el error cometido por el modelo teórico de predicción del paso óptimo, de forma que:

Tabla 6.12. Error relativo del modelo de predicción del paso óptimo.

	$W_{op}$ teórico	$W_{op}$ real	Error (%)
Placa 1	61,10	38,36	37,22
Placa 2	60,48	37,50	38,00
Placa 3	60,26	37,51	37,75
Placa 4	61,39	38,27	37,66

$$\overline{Error}_{W_{op}} = 37,66 \%$$

A su vez, se puede calcular el error cometido por el modelo en la predicción de la rugosidad mínima. El error se obtiene comparando la rugosidad que se obtendría con el paso óptimo  $W_{op}$  y aquella que de verdad se obtiene y que se ha medido experimentalmente:

Tabla 6.13. Error relativo. Rugosidad mínima teórica frente a experimental.

	$R_a$ mínima (teórica)	$R_a$ mínima (real)	Error (%)
Placa 1	2,33	0,81	65,30
Placa 2	2,26	0,68	70,05
Placa 3	2,32	0,71	69,52
Placa 4	2,32	0,77	66,69

$$\overline{Error}_{R_a} = 67,89 \%$$

## CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

A continuación, se presentan los principales resultados y conclusiones del estudio realizado. En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos sobre la validez de los modelos teóricos utilizados y las posibles causas que provocan las discrepancias respecto a los resultados experimentales obtenidos.

### *Modelo teórico de predicción del paso óptimo $W_{op}$*

El modelo utilizado para predecir el paso óptimo, es decir, el paso que nos proporciona un mínimo valor de rugosidad en los cordones depositados presenta serias limitaciones. El error promedio cometido por el modelo (*tabla 6.12*) ha resultado ser de un 37,66 % en la predicción del paso. En relación con la rugosidad óptima el error calculado (*tabla 6.13*) ha resultado ser de un 67,89%.

Algunas de las posibles causas que pueden justificar este desajuste entre los modelos teóricos y los resultados experimentales se indican a continuación:

- El modelo propuesto [6] ha sido deducido y validado utilizando como material de deposición aleaciones metálicas. En el presente TFG el material utilizado ha sido parafina 1260 A. Puesto que ambos materiales tienen diferentes propiedades fisicoquímicas, debemos concluir que el modelo teórico [6] no puede ser utilizado, si se quieren obtener resultados precisos, con materiales muy diferentes a los empleados en su obtención.
- Debido a la diferencia de propiedades de los materiales empleados, las condiciones de experimentación son significativamente distintas. Por ejemplo, en el trabajo realizado por los investigadores la temperatura del sustrato se estableció en 90°C, mientras que en nuestro experimento el sustrato se encontraba a temperatura ambiente.
- El modelo realiza una serie de suposiciones o hipótesis conceptuales que le permiten simplificar los cálculos. Entre ellas, las dos más importantes son: 1) se desprecia la tensión superficial  $\gamma$  y 2) se supone que el propio metal líquido

depositado se extenderá lo suficiente como para rellenar los huecos que se producen en la retracción al solidificar las gotas depositadas previamente, obteniéndose un cordón con una topografía superficial lo más uniforme posible.

### ***Modelo teórico de predicción de la rugosidad***

Según los datos obtenidos (*tabla 6.10*) y su representación gráfica, se puede concluir que el modelo teórico de predicción de la rugosidad [7] se ajusta de manera razonablemente precisa a las medidas experimentales de rugosidad. Para determinados pasos de deposición el desajuste entre ambos modelos puede llegar a ser considerable, aunque ese incremento del error puede estar asociado al método usado para medir la rugosidad de los cordones experimentalmente (considerado en el siguiente apartado). A continuación, se van a exponer las posibles causas que provocan la variabilidad entre ambos modelos, y que se ciñen únicamente al modelo teórico.

El modelo teórico se desarrolla bajo una serie de suposiciones y simplificaciones que pueden provocar que no se tengan ciertos aspectos en cuenta. Estas suposiciones se presentan a continuación:

- La geometría de la gota se considera como un casquete esférico con sección transversal perfectamente simétrica.
- Bajo unos mismos parámetros del proceso ( $\theta$ ,  $D$ ) las gotas depositadas lo hacen de manera uniforme y el perfil del cordón que se genera puede tratarse como una secuencia periódica de arcos de circunferencia.
- El perfil de la gota anterior se mantiene constante, mientras que la siguiente gota se deposita.

El hecho de estar trabajando a frecuencias bajas (1 Hz) permite que esta última suposición se pueda asumir con total seguridad. Cuando se produce la deposición de la gota la anterior ya ha solidificado y en consecuencia no se produce ninguna retracción ni alteración de su volumen. Sin embargo, las dos primeras suposiciones no resultan tan adecuadas ya que ninguna gota depositada es idéntica a la anterior, tal y como supone el modelo. A pesar de evitar aquellas gotas afectadas por fenómenos transitorios, que no son estudiados en el presente TFG, a la hora de realizar las medidas, existen diferencias entre los perfiles y diámetros de las diferentes gotas.

### ***Método experimental de medida de la rugosidad***

Como ya se ha mencionado en el *apartado 6.3*, el desajuste entre ambos modelos aumenta para pasos teóricos de 40 y 48  $\mu\text{m}$ , pasando de errores del 10% a otros del 30 y 40%. Dicha variación en el error es debida a la variación significativa que se produce del diámetro  $D_c$  en los mencionados cordones. Ese diámetro  $D_c$  debería permanecer constante puesto que las gotas que se depositan lo hacen bajo las mismas condiciones. Si así lo hiciera los valores de rugosidad obtenidos con el método experimental seguirían una tendencia lineal y se ajustarían de forma similar al modelo teórico para cualquier valor de paso utilizado, manteniéndose un error constante de entorno al 10%. En consecuencia, se puede afirmar que es el propio método de medición el que puede influir significativamente en la determinación de la magnitud del error obtenido.

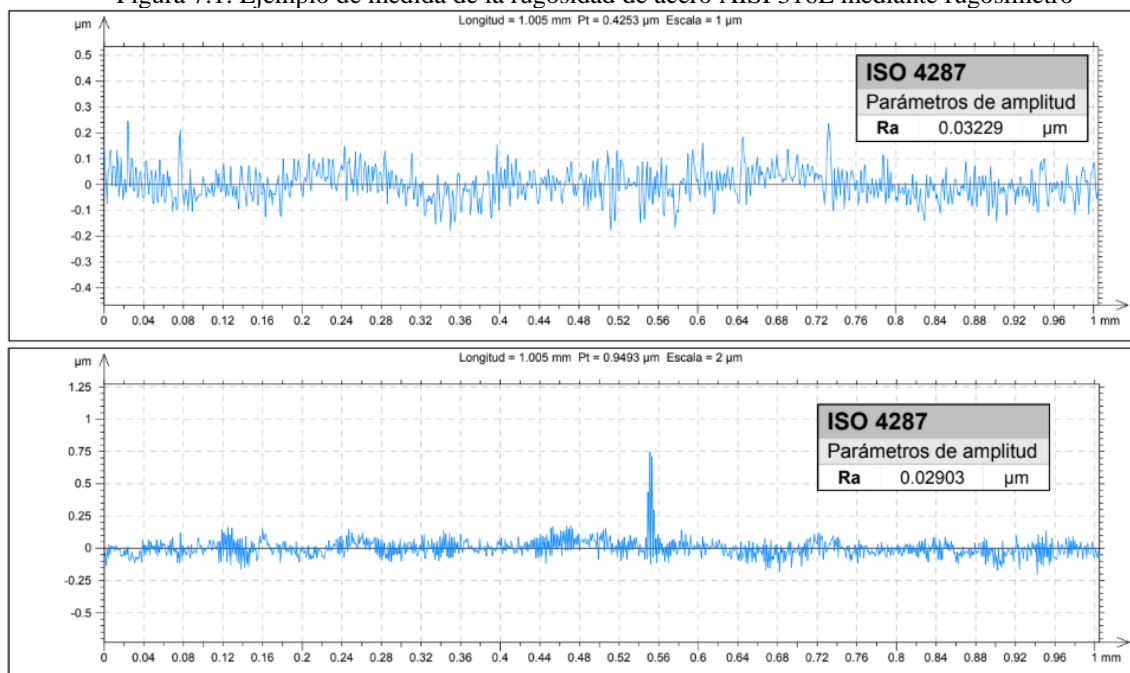
### Limitaciones

El error asociado al método experimental podría reducirse o incluso anularse si se hubiese empleado una técnica de medición más precisa, por ejemplo, un rugosímetro. Sin embargo, el material de parafina usado en nuestro experimento resultó incompatible con la aplicación de este instrumento. Otra limitación asociada al material utilizado en este experimento es, como se ha mencionado anteriormente, que todos los modelos usados fueron desarrollados y validados para materiales metálicos, concretamente aleaciones de Sn60Pb40 o de aluminio.

Otra limitación que puede influir en la diferencia entre la rugosidad experimental y teórica es el hecho de que el modelo teórico no tiene en cuenta las propiedades físicoquímicas de la superficie de deposición. Entre estas propiedades es de especial importancia la rugosidad del sustrato sobre la que se realizan las deposiciones. Las placas sobre las que realizaron las deposiciones fueron sido cuidadosamente pulidas y limpiadas para evitar cualquier impureza en su superficie, presentando siempre una cierta rugosidad, que se ha medido y presenta el siguiente valor:

$$Ra = 0,027 \pm 0,004 \mu m$$

Figura 7.1. Ejemplo de medida de la rugosidad de acero AISI 316L mediante rugosímetro



También se deben mencionar los errores humanos, los sistemáticos de los diferentes instrumentos o equipos de medida, así como los asociados al operador o sistema de adquisición y tratamiento de datos, intrínsecos a cualquier trabajo de este tipo. No obstante, la influencia de este tipo de errores ha sido tomada en cuenta mediante la incertidumbre asociada. En cualquier caso, este tipo de errores no explica una variabilidad tan significativa entre los resultados experimentales y teóricos.



## 7.1. Parámetros de estudio

### 7.1.1. Drawback

El experimento realizado para cuantificar la influencia del *Drawback* [9] nos permite llegar a la conclusión de que este fenómeno resulta de influencia despreciable en deposiciones que se realizan a frecuencias bajas, como es el caso de nuestro experimento. El hecho de que las gotas que se depositan previamente ya se encuentran solidificadas cuando se deposita la siguiente gota, permite que la contracción volumétrica que se produce en las gotas en su solidificación sobre el sustrato sea prácticamente nula, permitiendo, sin realizar ningún tipo de modificación o corrección, la aplicación de los modelos teóricos de predicción del paso óptimo  $W_{op}$  y de la rugosidad  $R_a$ .

### 7.1.2. Paso óptimo

Los resultados de los experimentos realizados en este trabajo evidencian que el modelo de predicción del paso óptimo no resulta preciso para la obtención del paso que nos proporcione un valor de rugosidad mínimo en cualquier tipo de material. Para los materiales y condiciones de ensayo empleados en el presente TFG se han podido determinar errores promedio del orden del 37 % en la predicción del paso óptimo y del 70 % en la predicción de la rugosidad mínima. Se puede concluir que el modelo no resulta válido para el material utilizado en el presente trabajo (parafina 1260 A) y resultaría conveniente el estudio de otros modelos teóricos de predicción del paso óptimo.

### 7.1.3. Rugosidad

El modelo utilizado para predicción de la rugosidad permite predecir con suficiente precisión la rugosidad obtenida para un paso determinado con las medidas experimentales. Aunque cuantitativamente pueden presentarse discrepancias significativas, estas, es probable que se deban más al método experimental utilizado para la medición de la rugosidad que al propio modelo teórico. En consecuencia, se puede concluir que el modelo de predicción de la rugosidad puede ser utilizado con materiales muy diferentes a los que fueron utilizados en su concepción.

## CAPÍTULO 8 BIBLIOGRAFÍA

- <sup>1</sup>1. Hoath, S. D. *Fundamentals of inkjet printing : the science of inkjet and droplets*.
2. Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (Brent). *Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*.
3. Derby, B. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution. *Annu. Rev. Mater. Res.* **40**, 395–414 (2010).
4. Guo, Y., Patanwala, H. S., Bognet, B. & Ma, A. W. K. Inkjet and inkjet-based 3D printing: connecting fluid properties and printing performance. *Rapid Prototyp. J.* **23**, 562–576 (2017).
5. Gao, F. & Sonin, A. A. Precise Deposition of Molten Microdrops: The Physics of Digital Microfabrication. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **444**, 533–554 (1994).
6. Qi, L. *et al.* A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **56**, 50–58 (2012).
7. Qi, L., Zhong, S., Luo, J., Zhang, D. & Zuo, H. Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **88**, 206–213 (2015).
8. Zhang, D. *et al.* Parametric mapping of linear deposition morphology in uniform metal droplet deposition technique. *J. Mater. Process. Technol.* **264**, 234–239 (2019).
9. Li, R., Ashgriz, N., Chandra, S., Andrews, J. R. & Williams, J. Drawback During Deposition of Overlapping Molten Wax Droplets. *J. Manuf. Sci. Eng.* **130**, 041011 (2008).

10. Fromm, J. E. Numerical Calculation of the Fluid Dynamics of Drop-on-Demand Jets. *IBM J. Res. Dev.* **28**, 322–333 (1984).
11. Reis, N. & Derby, B. Ink Jet Deposition of Ceramic Suspensions: Modeling and Experiments of Droplet Formation. *MRS Proc.* **625**, 117 (2000).
12. Duineveld, P. C. *et al.* Ink-jet printing of polymer light-emitting devices. in (ed. Kafafi, Z. H.) 59 (2002). doi:10.1117/12.457460
13. Derby, B. & Reis, N. Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions. *MRS Bull.* **28**, 815–818 (2003).
14. Schiaffino, S. & Sonin, A. A. Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers. *Phys. Fluids* **9**, 3172–3187 (1997).
15. López Rodríguez, J. Fundamentos de metrología, tolerancias y ajustes en fabricación mecánica. (2017).
16. Liu, Q. & Orme, M. High precision solder droplet printing technology and the state-of-the-art. *J. Mater. Process. Technol.* **115**, 271–283 (2001).
17. Stow, C. D. & Hadfield, M. G. An Experimental Investigation of Fluid Flow Resulting from the Impact of a Water Drop with an Unyielding Dry Surface. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **373**, 419–441 (1981).
18. *Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up General Notice.* (2012).
19. Hernández Cobarro, S. Estudio teórico y experimental de la morfología de la deposición lineal de gotas en procesos de impresión “material jetting”. (2019).

## ANEXOS

### A.1. Medidas directas sobre sustratos de deposición

En un trabajo de este tipo se necesita una adecuada presentación de todas aquellas variables medidas. Como se señaló con anterioridad en el trabajo, se distinguen variables cuyos valores se obtienen directamente a partir de mediciones, o bien variables cuyos valores se obtienen a partir de otras variables, como, por ejemplo, las obtenidas a partir de una ecuación. En este apartado se van a presentar los valores de aquellas variables que han resultado a partir de la medición directa de estas en las imágenes proporcionadas por el software de imagen, como lo son  $y$ ,  $R_c$ ,  $h$ ,  $a$ .

En primer lugar, se habrá de aplicar el criterio de Chauvenet al conjunto de las  $n$  medidas realizadas sobre una variable y rechazar, si procede, aquella que se salga del intervalo calculado según lo expuesto en el apartado 3.3.6.1. Una vez realizado este proceso, para realizar una correcta presentación de los datos, se deberá presentar el valor medio de cada variable junto a un intervalo de incertidumbre o variabilidad. El cálculo de estos aparece explicado detalladamente en el *apartado 3.3.6.2*.

En las tablas que a continuación se exponen la nomenclatura que se sigue es la siguiente:

- $\bar{x}$  representa el valor medio de la variable.
- $s$  representa la desviación típica.
- $k(n)$  representa el coeficiente que nos permite calcular la amplitud del intervalo de medidas aceptadas según el criterio de Chauvenet.
- $t$  representa el coeficiente de la distribución  $t$  de *Student*, obtenido a partir de un nivel de confianza del 80%.

**A.1.1. Aplicación del Criterio de Chauvenet y cálculo de los intervalos de confianza.  
Placa 1.**

$\bar{h}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
34,84046	0,83732	1,38000	35,99596	33,68496	0

$\bar{h}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
34,84046	0,83732	1,88560	3,00000	2,00000	0,91155

$\bar{a}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
47,76832	0,95763	1,38000	49,08985	46,44678	0

$\bar{a}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
47,76832	0,95763	1,88560	3,00000	2,00000	1,04253

$\bar{R}_c$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
50,22179	2,00417	1,38000	52,98754	47,45604	0

$\bar{R}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
50,22179	2,00417	1,88560	3,00000	2,00000	2,18184

$\bar{y}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
16,75339	0,78537	1,38000	17,83720	15,66958	0

$\bar{y}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
16,75339	0,78537	1,88560	3,00000	2,00000	0,85499

Luego:

$$h = 34,84046 \pm 0,91155$$

$$a = 47,76832 \pm 1,04253$$

$$R_c = 50,22179 \pm 2,18184$$

$$y = 16,75339 \pm 0,85499$$

**A.1.2. Aplicación del Criterio de Chauvenet y cálculo de los intervalos de confianza.  
Placa 2.**

$\bar{h}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
33,11160	1,03918	1,38000	34,54566	31,67754	0

$\bar{h}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
33,11160	1,03918	1,88560	3,00000	2,00000	1,13130

$\bar{a}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
48,22530	0,34650	1,38000	48,70347	47,74713	0

$\bar{a}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
48,22530	0,34650	1,88560	3,00000	2,00000	0,37722

$\overline{R}_c$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
50,31880	2,07830	1,38000	53,18686	47,45074	0

$\overline{R}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
50,31880	2,07830	1,88560	3,00000	2,00000	2,26255

$\bar{y}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
18,30310	1,03894	1,38000	19,73684	16,86936	0

$\bar{y}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
18,30310	1,03894	1,88560	3,00000	2,00000	1,13105

Luego:

$$h = 33,11160 \pm 1,13130$$

$$a = 48,22530 \pm 0,37722$$

$$R_c = 50,31880 \pm 2,26255$$

$$y = 18,30310 \pm 1,13105$$

**A.1.3. Aplicación del criterio de Chauvenet y cálculo de los intervalos de confianza.  
Placa 3.**

$\bar{h}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
34,99730	0,83766	1,38000	36,15327	33,84133	0

$\bar{h}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
34,99730	0,83766	1,88560	3,00000	2,00000	0,91192

$\bar{a}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
47,58930	0,22233	1,38000	47,89612	47,28248	0

$\bar{a}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
47,58930	0,22233	1,88560	3,00000	2,00000	0,24204

$\overline{R_c}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
50,19410	0,30094	1,38000	50,60940	49,77880	0

$\overline{R_c}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
50,19410	0,30094	1,88560	3,00000	2,00000	0,32762

$\bar{y}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
15,36390	1,13204	1,38000	16,92612	13,80168	0

$\bar{y}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
15,36390	1,13204	1,88560	3,00000	2,00000	1,23240

$$h = 34,99730 \pm 0,91192$$

$$a = 47,58930 \pm 0,24204$$

$$R_c = 50,19410 \pm 0,32762$$

$$y = 15,36390 \pm 1,23240$$

**A.1.4. Aplicación del criterio de Chauvenet y cálculo de los intervalos de confianza.  
Placa 4.**

$\bar{h}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
34,99791	0,24837	1,38000	35,34066	34,65515	0

$\bar{h}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
34,99791	0,24837	1,88560	3,00000	2,00000	0,27039

$\bar{a}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
48,08333	0,38188	1,38000	48,61033	47,55634	0

$\bar{a}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
48,08333	0,38188	1,88560	3,00000	2,00000	0,41574

$\overline{R_c}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
50,71024	0,60788	1,38000	51,54911	49,87136	0

$\overline{R_c}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
50,71024	0,60788	1,88560	3,00000	2,00000	0,66177

$\bar{y}$	s	k (3)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
17,41175	0,87445	1,38000	18,61848	16,20501	0

$\bar{y}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
17,41175	0,87445	1,88560	3,00000	2,00000	0,95197

$$h = 34,99791 \pm 0,27039$$

$$a = 48,08333 \pm 0,41574$$

$$R_c = 50,71024 \pm 0,66177$$

$$y = 17,41175 \pm 0,95197$$



## A.2. Medidas indirectas sobre sustratos de deposición

Los valores de  $\theta$ ,  $D$ ,  $W_{op}$  y  $R_a$  (experimental y teórica) dependen de las variables obtenidas en el apartado anterior, por tanto, son medidas obtenidas de manera indirecta y el método de los intervalos de confianza aplicado anteriormente no resulta válido. Será necesario aplicar el método de propagación de varianzas descrito en el apartado 3.3.6.3.

### A.2.1. Método de propagación de varianzas. Placa 1.

- $\theta$

PLACA 1	
$\frac{\partial \theta}{\partial y}$	-0,02112
$\frac{\partial \theta}{\partial R_c}$	0,00665
$u_y$	0,28500
$u_{R_c}$	0,72728
$U_\theta$	0,02316
$\theta$	70,50806

- $D$

PLACA 1	
$\frac{\partial D}{\partial h}$	0,40761
$\frac{\partial D}{\partial a}$	0,38812
$u_h$	0,30385
$u_a$	0,34751
$U_D$	0,54935
$D$	65,48007

- $W_{op}$

PLACA 1	
$\frac{\partial W_{op}}{\partial \theta}$	-9,68350
$\frac{\partial W_{op}}{\partial D}$	0,92906
$u_{\theta}$	0,00772
$u_D$	0,18312
$U_{Wop}$	0,55748
$W_{op}$	61,10009

- $R_a$  teórica (Paso  $Wop$ )

PLACA 1	
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta}$	2,17502
$\frac{\partial R_a}{\partial D}$	-1,16572
$\frac{\partial R_a}{\partial W_{op}}$	0,07632
$u_{\theta}$	0,00772
$u_D$	0,18312
$u_{Wop}$	0,18583
$R_a$	2,33143
$U_{R_a}$	0,64377

- $R_a$  teórica

PLACA 1					
$W_x$ teórico	32	40	48	56	64
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta}$	0,85727	1,40039	1,91808	2,53967	3,33371
$\frac{\partial R_a}{\partial D}$	-0,45946	-0,75055	-1,02801	-1,36115	-1,78673
$\frac{\partial R_a}{\partial W_{op}}$	0,04791	0,06124	0,07167	0,08246	0,09448
$u_\theta$	0,00772	0,00772	0,00772	0,00772	0,00772
$u_D$	0,18312	0,18312	0,18312	0,18312	0,18312
$u_{W_{op}}$	0,18583	0,18583	0,18583	0,18583	0,18583
$U_{R_a}$	0,25459	0,41499	0,56788	0,75146	0,32866
$R_a$	0,91892	1,50110	2,05602	2,72231	3,57345

- $R_a$  experimental

Para el cálculo de la rugosidad a partir del método experimental resultó necesario volver a realizar medidas de la distancia entre centros y el diámetro del casquete esférico de la gota solidificada sobre el sustrato. Para obtener esas medidas se aplicó el criterio de Chauvenet y se calcularon sus intervalos de confianza.

Paso 32 micras (teórico)

$\overline{W_x}$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior.	Medidas rechazadas
38,35929	2,56686	1,96000	43,39032	33,32825	0
$\overline{W_x}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
38,35929	2,56686	1,38300	10,00000	9,00000	1,12260

$\overline{D_c}$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
116,66651	0,49569	1,92000	59,28498	57,38154	2
$\overline{D_c}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
116,66651	0,49569	1,39680	9,00000	8,00000	0,23079

Paso 40 micras (teórico)

$\overline{W}_x$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
49,02696	3,36300	1,96000	55,61843	42,43548	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
49,02696	3,36300	1,38300	10,00000	9,00000	1,47078

$\overline{D}_c$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
161,7949	0,56913	1,92000	81,99020	79,80474	2
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
161,7949	0,56913	1,39680	9,00000	8,00000	0,26499

*Paso 48 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
57,37786	4,48903	1,92000	65,99679	48,75893	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
57,37786	4,48903	1,39680	9,00000	8,00000	2,09009

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
150,57641	1,03395	1,96000	77,31474	73,26167	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
150,57641	1,03395	1,38300	10,00000	9,00000	0,45219

*Paso 56 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
66,02361	3,60742	1,96000	73,09416	58,95306	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
66,02361	3,60742	1,38300	10,00000	9,00000	1,57768

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
108,13824	1,04063	1,96000	56,10876	52,02948	1
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
108,13824	1,04063	1,38300	10,00000	9,00000	0,45511

Paso 64 micras (teórico)

$\overline{W_x}$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
75,64403	1,49211	1,96000	78,56857	72,71948	0
$\overline{W_x}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
75,64403	1,49211	1,38300	10,00000	9,00000	0,65257

$\overline{D_c}$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
104,72202	0,64032	1,92000	53,59042	51,13160	1
$\overline{D_c}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
104,72202	0,64032	1,39680	9,00000	8,00000	0,29813

PLACA 1					
$W_x$ teórico	32	40	48	56	64
$\frac{\partial R_a}{\partial W_x}$	0,04218	0,03888	0,04889	0,07833	0,09268
$\frac{\partial R_a}{\partial D_c}$	0,00693	0,00589	0,00931	0,02391	0,03347
$u_{W_x}$	0,37420	0,49026	0,69670	0,52589	0,21752
$u_{D_c}$	0,07693	0,08833	0,15073	0,15170	0,09938
$U_{R_a}$	0,04738	0,05720	0,10227	0,12496	0,06173
$R_a$	0,80908	0,95302	1,40258	2,58593	3,50516

**A.2.1. Método de propagación de varianzas. Placa 2.**

- $\theta$

PLACA 2	
$\frac{\partial \theta}{\partial y}$	-0,02133
$\frac{\partial \theta}{\partial R_c}$	0,00723
$u_y$	0,37702
$u_{R_c}$	0,75418
$U_\theta$	0,02916
$\theta$	68,66620

- $\underline{D}$

PLACA 2	
$\frac{\partial D}{\partial h}$	0,41232
$\frac{\partial D}{\partial a}$	0,38480
$u_h$	0,37710
$u_a$	0,12574
$U_D$	0,48852
D	64,41760

- $\underline{W_{op}}$

PLACA 2	
$\frac{\partial W_{op}}{\partial \theta}$	-9,7339
$\frac{\partial W_{op}}{\partial D}$	0,9389
$u_\theta$	0,0097
$u_D$	0,1628
$U_{W_{op}}$	0,5394
$W_{op}$	60,4801

- $\underline{R_a}$  teórica (Paso  $W_{op}$ )

PLACA 2	
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta}$	2,16655
$\frac{\partial R_a}{\partial D}$	-1,11216
$\frac{\partial R_a}{\partial W_{op}}$	0,07477
$u_\theta$	0,00972
$u_D$	0,16284
$u_{W_{op}}$	0,17979
$R_a$	2,26101
$U_{R_a}$	0,54846

- $R_a$  teórica

PLACA 2					
$W_x$ teórico	32	40	48	56	64
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta}$	0,83275	1,40670	1,94926	2,57905	3,55468
$\frac{\partial R_a}{\partial D}$	-0,43456	-0,73406	-1,01718	-1,34583	-1,85494
$\frac{\partial R_a}{\partial W_{op}}$	0,04636	0,06025	0,07092	0,08158	0,09578
$u_\theta$	0,00323	0,00323	0,00323	0,00323	0,00323
$u_D$	0,16284	0,16284	0,16284	0,16284	0,16284
$u_{W_{op}}$	0,17980	0,17980	0,17980	0,17980	0,17980
$U_{R_a}$	0,21391	0,36033	0,16625	0,21980	0,30277
$R_a$	0,86911	1,46812	2,03436	2,69165	3,70989

- $R_a$  experimental

Paso 32 micras (teórico)

$\overline{W_x}$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
37,49606	2,63759	1,92000	42,56022	32,43189	0
$\overline{W_x}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
37,49606	2,63759	1,39680	9,00000	8,00000	1,22806

$\overline{D_c}$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
133,19587	2,34307	1,96000	137,78828	128,60346	0
$\overline{D_c}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
133,19587	2,34307	1,38300	10,00000	9,00000	1,02472

Paso 40 micras (teórico)

$\overline{W_x}$	s	k (8)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
48,73365	2,13389	1,86000	52,70268	44,76461	1
$\overline{W_x}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
48,73365	2,13389	1,41490	8,00000	7,00000	1,06746

$\overline{D_c}$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
158,59946	2,11268	1,96000	162,74032	154,45860	0
$\overline{D_c}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
158,59946	2,11268	1,38300	10,00000	9,00000	0,92397

*Paso 48 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
57,36698	3,65882	1,92000	64,39192	50,34204	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
57,36698	3,65882	1,39680	9,00000	8,00000	1,70355

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior.	Medidas rechazadas
139,08904	2,92217	1,96000	144,81649	133,36159	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
139,08904	2,92217	1,38300	10,00000	9,00000	1,27799

*Paso 56 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
65,98685	1,29754	1,92000	68,47812	63,49558	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
65,98685	1,29754	1,39680	9,00000	8,00000	0,60413

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
116,86970	2,92464	1,96000	122,60200	111,13739	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
116,86970	2,92464	1,38300	10,00000	9,00000	1,27907

*Paso 64 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
77,46902	2,80155	1,92000	82,84799	72,09005	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
77,46902	2,80155	1,39680	9,00000	8,00000	1,30440

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
110,43056	2,31784	1,96000	114,97354	105,88759	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
110,43056	2,31784	1,38300	10,00000	9,00000	1,01369



PLACA 2					
$W_x$ teórico	32	40	48	56	64
$\frac{\partial R_a}{\partial W_x}$	0,03612	0,03942	0,05292	0,07244	0,09000
$\frac{\partial R_a}{\partial D_c}$	0,00508	0,00606	0,01091	0,02045	0,03157
$u_{W_x}$	0,40935	0,35582	0,56785	0,20138	0,43480
$u_{D_c}$	0,34157	0,30799	0,42600	0,42636	0,33790
$U_{R_a}$	0,04474	0,04245	0,09122	0,05099	0,12169
$R_a$	0,67714	0,96062	1,51785	2,39007	3,48629

**A.2.2. Método de propagación de varianzas. Placa 3.**

- $\theta$

PLACA 3	
$\frac{\partial \theta}{\partial y}$	-0,02093
$\frac{\partial \theta}{\partial R_c}$	0,00610
$u_y$	0,37735
$u_{R_c}$	0,10031
$U_\theta$	0,02376
$\theta$	72,17670

- $D$

PLACA 3	
$\frac{\partial D}{\partial h}$	0,40704
$\frac{\partial D}{\partial a}$	0,38854
$u_h$	0,27922
$u_a$	0,07411
$U_D$	0,35173
$D$	65,47020

- $W_{op}$

PLACA 3	
$\frac{\partial W_{op}}{\partial \theta}$	-9,42818
$\frac{\partial W_{op}}{\partial D}$	0,92043
$u_{\theta}$	0,00792
$u_D$	0,11724
$U_{Wop}$	0,39369
$W_{op}$	60,26049

- $R_a$  teórico (Paso  $Wop$ )

PLACA 3	
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta}$	2,11426
$\frac{\partial R_a}{\partial D}$	-1,16055
$\frac{\partial R_a}{\partial W_{op}}$	0,07704
$u_{\theta}$	0,00792
$u_D$	0,11724
$u_{Wop}$	0,13123
$R_a$	2,32111
$U_{Ra}$	0,41240

- $R_a$  teórico

PLACA 3					
$W_x$ teórico	32	40	48	56	64
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta}$	0,81924	1,31048	1,91495	2,50515	3,40619
$\frac{\partial R_a}{\partial D}$	-0,68935	-1,10271	-1,61134	-2,10796	-2,86615
$\frac{\partial R_a}{\partial W_{op}}$	0,04795	0,06065	0,07331	0,08386	0,09778
$u_\theta$	0,00792	0,00792	0,00792	0,00792	0,00792
$u_D$	0,11724	0,11724	0,11724	0,11724	0,11724
$u_{Wop}$	0,13123	0,13123	0,13123	0,13123	0,13123
$U_{R_a}$	0,24398	0,38984	0,56932	0,74456	1,01210
$R_a$	0,89939	1,43869	2,10230	2,75024	3,73944

- $R_a$  experimental

Paso 32 micras (teórico)

$\overline{W_x}$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
37,51099	2,59378	1,92000	42,49104	32,53094	0
$\overline{W_x}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
37,51099	2,59378	1,39680	9,00000	8,00000	1,20766

$\overline{D_c}$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
127,57809	4,57754	1,96000	136,55006	118,60611	0
$\overline{D_c}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
127,57809	4,57754	1,38300	10,00000	9,00000	2,00195

Paso 40 micras (teórico)

$\overline{W_x}$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
47,44263	2,32609	1,92000	51,90873	42,97653	0
$\overline{W_x}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
47,44263	2,32609	1,39680	9,00000	8,00000	1,08303

$\overline{D_c}$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
179,54803	4,24460	1,96000	187,86745	171,22861	0
$\overline{D_c}$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
179,54803	4,24460	1,38300	10,00000	9,00000	1,85635

*Paso 48 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
57,34985	4,12420	1,92000	65,26832	49,43138	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
57,34985	4,12420	1,39680	9,00000	8,00000	1,92023

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
134,89735	5,44161	1,96000	145,56292	124,23179	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
134,89735	5,44161	1,38300	10,00000	9,00000	2,37985

*Paso 56 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (8)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
65,59492	5,01172	1,86000	74,91672	56,27313	1
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
65,59492	5,01172	1,41490	8,00000	7,00000	2,50707

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
112,91583	3,16911	1,96000	119,12729	106,70437	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
112,91583	3,16911	1,39680	10,00000	9,00000	1,39982

*Paso 64 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
76,48709	6,30775	1,92000	88,59796	64,37621	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
76,48709	6,30775	1,39680	9,00000	8,00000	2,93689

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
114,61270	8,29597	1,96000	130,87280	98,35260	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
114,61270	8,29597	1,38300	10,00000	9,00000	3,62818

PLACA 3					
$W_x$ teórico	32	40	48	56	64
$\frac{\partial R_a}{\partial W_x}$	0,03772	0,03390	0,05455	0,07453	0,08562
$\frac{\partial R_a}{\partial D_c}$	0,00555	0,00448	0,01159	0,02165	0,02857
$u_{W_x}$	0,40255	0,36101	0,64008	0,83569	0,97896
$u_{D_c}$	0,66732	0,61878	0,79328	0,46661	1,20939
$U_{R_a}$	0,04689	0,03765	0,10831	0,18967	0,27199
$R_a$	0,70752	0,80418	1,56408	2,44446	3,27446

**A.2.3. Método de propagación de varianzas. Placa 4.**

- $\theta$

PLACA 4	
$\frac{\partial \theta}{\partial y}$	-0,02100
$\frac{\partial \theta}{\partial R_c}$	0,00678
$u_y$	0,29148
$u_{R_c}$	0,20263
$U_\theta$	0,01882
$\theta$	69,90631

- $D$

PLACA 4	
$\frac{\partial D}{\partial h}$	0,40776
$\frac{\partial D}{\partial a}$	0,38802
$u_h$	0,08279
$u_a$	0,12729
$U_D$	0,17948
$D$	65,85562

- $W_{xp}$

PLACA 4	
$\frac{\partial W_{op}}{\partial \theta}$	-9,77749
$\frac{\partial W_{op}}{\partial D}$	0,93223
$u_{\theta}$	0,00627
$u_D$	0,05983
$U_{Wop}$	0,24871
$W_{op}$	61,39234

- $R_a$  teórica (paso  $Wop$ )

PLACA 4	
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta}$	2,18364
$\frac{\partial R_a}{\partial D}$	-1,16022
$\frac{\partial R_a}{\partial W_{op}}$	0,07559
$u_{\theta}$	0,00627
$u_D$	0,05983
$u_{Wop}$	0,08290
$R_a$	2,32043
$U_{Ra}$	0,21308

- $R_a$  teórica

PLACA 4					
$W_x$ teórico	32	40	48	56	64
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta}$	0,84869	1,38912	1,98521	2,64225	3,32327
$\frac{\partial R_a}{\partial D}$	-0,45093	-0,73807	-1,05479	-1,40389	-1,76573
$\frac{\partial R_a}{\partial W_{op}}$	0,04713	0,06029	0,07208	0,08315	0,09326
$u_{\theta}$	0,00627	0,00627	0,00627	0,00627	0,00627
$u_D$	0,05983	0,05983	0,05983	0,05983	0,05983
$u_{Wop}$	0,08290	0,08290	0,08290	0,08290	0,08290
$U_{Ra}$	0,08332	0,13585	0,19379	0,25766	0,32386
$R_a$	0,90186	1,47614	2,10958	2,80777	3,53146

- $R_a$  experimental

Paso 32 micras (teórico)

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inf.	Medidas rechazadas
38,27349	2,48933	1,92000	43,05301	33,49398	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
38,27349	2,48933	1,39680	9,00000	8,00000	1,15903

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
121,58087	3,40003	1,96000	128,24493	114,91681	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
121,58087	3,40003	1,38300	10,00000	9,00000	1,48698

Paso 40 micras (teórico)

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
48,96587	1,98512	1,92000	52,77730	45,15443	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
48,96587	1,98512	1,39680	9,00000	8,00000	0,92427

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
186,72754	10,19348	1,96000	52,77730	45,15443	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
186,72754	10,19348	1,38300	10,00000	9,00000	4,45805

Paso 48 micras (teórico)

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
58,53659	3,66765	1,92000	65,57847	51,49470	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
58,53659	3,66765	1,39680	9,00000	8,00000	1,70766

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
142,66204	4,00810	1,96000	65,57847	51,49470	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
142,66204	4,00810	1,38300	10,00000	9,00000	1,75292

*Paso 56 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
67,53216	3,93385	1,92000	75,08514	59,97917	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
67,53216	3,93385	1,39680	9,00000	8,00000	1,83160

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
119,79185	6,55174	1,96000	75,08514	59,97917	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
119,79185	6,55174	1,38300	10,00000	9,00000	2,86536

*Paso 64 micras (teórico)*

$\overline{W}_x$	s	k (9)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
75,73675	1,00114	1,92000	77,65894	73,81456	0
$\overline{W}_x$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
75,73675	1,00114	1,39680	9,00000	8,00000	0,46613

$\overline{D}_c$	s	k (10)	Límite superior	Límite inferior	Medidas rechazadas
108,59952	2,38838	1,96000	77,65894	73,81456	0
$\overline{D}_c$	s	t	n	n - 1	Intervalo de confianza
108,59952	2,38838	1,38300	10,00000	9,00000	1,04454

PLACA 4					
$W_x$ teórico	32	40	48	56	64
$\frac{\partial R_a}{\partial W_x}$	0,04039	0,03364	0,05264	0,07233	0,08948
$\frac{\partial R_a}{\partial D_c}$	0,00636	0,00441	0,01080	0,02039	0,03120
$u_{W_x}$	0,38634	0,30809	0,56922	0,61053	0,15538
$u_{D_c}$	0,49566	1,48602	0,58431	0,95512	0,34818
$U_{R_a}$	0,04776	0,03679	0,09187	0,14479	0,05293
$R_a$	0,77291	0,82371	1,54079	2,44225	3,38830



234567892101112131415161718