



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Industrial

Estudio teórico y experimental de la morfología de la deposición lineal de gotas en procesos de impresión “material jetting”

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

Autor: Sofía Hernández Cobarro

Director: D. Félix Faura Mateu

Codirector: D. Rosendo Zamora Pedreño

Cartagena 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
2. ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1 Antecedentes y desarrollo actual	9
2.2 Procesos de fabricación aditiva por deposición de microgotas.....	11
2.3 Ventajas y limitaciones.	14
2.4 Desafíos futuros y campos de aplicación.....	15
3. MATERIALES, EQUIPOS Y METODOLOGÍA	16
3.1 Material.....	16
3.2 Equipos y software	21
3.1.1. Impresora JetLab	21
3.1.2. Microscopio óptico	33
3.1.3. Software de tratamiento de imagen	33
3.2 Metodología desarrollada.....	33
3.2.1. Organización del estudio	33
3.2.2. Parámetros adimensionales.....	35
3.2.3. Expresión de las medidas realizadas.....	35
3.2.4. Radio inicial de la gota.	41
3.2.5. Velocidad de caída.....	45
3.2.6. Ángulos característicos	46
3.2.7. Desplazamiento o paso máximo	50
3.2.8. Rugosidad experimental	51
4. ESTUDIO TEÓRICO	52
4.1 Estudio del radio de la gota depositada sobre el sustrato	53
4.2 Estudio del radio de las gotas que conforman la columna	55
4.3 Estudio del desplazamiento máximo entre gotas sucesivas.....	59
4.4 Estudio de la rugosidad superficial de la columna.....	61

5. ESTUDIO EXPERIMENTAL	65
5.1 Obtención del radio de la gota de salida.	65
5.2 Obtención de los ángulos característicos	68
5.2.1. Ángulo de solidificación	68
5.2.2. Ángulo de contacto entre gotas.....	69
5.2.3. Ángulo de inclinación de la columna	70
5.3 Obtención del paso máximo	72
5.4 Obtención de la rugosidad	73
5.4.1. Rugosidad experimental	73
5.4.2. Rugosidad teórica	74
6. DISCUSION DE RESULTADOS	75
6.1 Paso real y paso teórico	75
6.2 Desplazamiento máximo entre gotas	77
6.3 Comparación de la rugosidad teórica y experimental.	83
7. CONCLUSIONES	97
7.1 Validez de los modelos	98
7.1.1. Modelo teórico de predicción del paso máximo.....	98
7.1.2. Modelo teórico de predicción de la rugosidad.....	99
7.1.3. Método experimental de medida de la rugosidad	100
7.2 Parámetros de estudio	101
7.2.1. Máximo desplazamiento horizontal entre dos gotas.....	101
7.2.2. Rugosidad superficial	101
8. BIBLIOGRAFÍA	102

ANEXOS

A.1 Expresión final de las medidas directas y Criterio de Chauvenet	104
A.2 Medidas Indirectas y aplicación de la ley de covarianzas	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Conversión del modelo 3D generado a la fabricación real	11
Figura 2.2 Clasificación de los procesos en función del material utilizado	12
Figura 3.1 Región imprimible identificada para fluidos newtonianos simples ..	19
Figura 3.2 Representación de la zona DOD imprimible.....	20
Figura 3.3 Impresora JetLab del laboratorio de Fabricación	21
Figura 3.4 Esquema del sistema de generación de microgotas	22
Figura 3.5 Métodos de impresión de microgotas: DOD y CIJ	23
Figura 3.6 Cabezal de impresión	23
Figura 3.7 y Figura 3.8 .Forma de onda aplicada al piezoeléctrico	25
Figura 3.9 Condiciones y parámetros característicos de la onda aplicada.....	26
Figura 3.10 Valores de voltaje característicos de la señal aplicada.....	27
Figura 3.11 Condiciones del experimento realizado	27
Figura 3.12 Proceso de expulsión de la gota paso a paso	28
Figura 3.13 Trayectoria de caída de la gota generada	28
Figura 3.14 Scripts programados para las columnas de paso 0 y 8 μm	30
Figura 3.15 Estructuras por deposición de candelilla a distintas frecuencias....	31
Figura 3.16 Ventanas del programa Jetlab y ejecución de los scripts.	32
Figura 3.17 Microscopio óptico.....	33
Figura 3.18 Cálculo del coeficiente $kn = k\alpha = 1/2n$	36
Figura 3.19 Proceso de calibración en el programa mediante imagen patrón	41
Figura 3.20 Menú de iconos para realizar distintas medidas en el programa	42
Figura 3.21 Medida de 3gotas sobre el sustrato con escala de 200 micras.....	42
Figura 3.22 Parámetros de una gota solidificada sobre el sustrato	44
Figura 3.23 Medida del radio y la distancia entre centros de las gotas	45
Figura 3.24 Superposición de imágenes de la trayectoria de caída de la gota...	46
Figura 3.25 Fotografía de 3 gotas depositadas sobre el sustrato.	46
Figura 3.26 Esquema para la obtención del ángulo de solidificación	47
Figura 3.27 Medida del ángulo de contacto entre gotas	48
Figura 3.28 Triángulo para hallar el ángulo entre gotas	48
Figura 3.29 Triangulo 1ºmétodo	49
Figura 3.30 Angulo de inclinación de la columna	49
Figura 3.31 Angulo de inclinación frente al paso y la altura vertical	50
Figura 3.32 Medida de la distancia entre centros y el radio de las gotas.....	51
Figura 4.1 Radios de la gota solidificada sobre el sustrato y radio de la base....	53
Figura 4.2 Triángulo para el cálculo del radio de solidificación	54
Figura 4.3 Valores característicos del casquete esférico	56
Figura 4.4 Triangulo para el cálculo del radio de las gotas de la columna.....	57
Figura 4.5 Primeras gotas de la columna con la superior tocando el sustrato ...	59
Figura 4.6 Perfil geométrico de la rugosidad lateral	61
Figura 4.7 Línea de mínimos cuadrados.....	62
Figura 5.1 Ángulo de inclinación para un paso $W0 = 0 \mu\text{m}$ y $W0 = 8 \mu\text{m}$	70
Figura 5.2 Ángulo de inclinación para un paso $W0 = 16 \mu\text{m}$ y $W0 = 24 \mu\text{m}$	70
Figura 6.1 Esquema teórico del inicio de la columna cuando $W0 = 12,4 \mu\text{m}$	78
Figura 6.2 Esquema teórico del inicio de la columna cuando $W0 < 12,4 \mu\text{m}$...	78
Figura 6.3 Morfología de la columna completa si se mantiene $W0 = 12,4 \mu\text{m}$...	78

Figura 6.4 Inicio de la columna cuando $W0 = 16 \mu\text{m}$	80
Figura 6.5 Inicio de la columna cuando $W0 < 16 \mu\text{m}$	80
Figura 6.6 Morfología de la columna manteniendo $W0 = 16 \mu\text{m}$	80
Figura 6.7 Esquema experimental manteniendo $W0 = 24 \mu\text{m} > W0, \text{máx} = 16 \mu\text{m}$ 80	
Figura 6.8 Inicio de la columna cuando $W0 = 32 \mu\text{m} > W0, \text{máx} = 16 \mu\text{m}$	81
Figura 6.9 Paso del modo de deposición vertical al horizontal	83
Figura 6.10 Rugosidad lateral en función de los diferentes pasos.....	89
Figura 6.11 Parámetros que intervienen en la rugosidad experimental.....	91
Figura 6.12 Rugosidad lateral izquierda ampliada para cada paso horizontal....	93
Figura 6.13 Medida del radio de las gotas de una columna.....	94
Figura 6.14 Rugosidad y ángulo de inclinación	95

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1 Distribución T-Student con dos colas.....	37
Gráfica 5.1 Radio inicial (2ºMétodo)	66
Gráfica 5.2 Radio inicial (3ºMétodo)	67
Gráfica 5.3 Ángulo de solidificación.....	68
Gráfica 5.4 Ángulo de contacto entre gotas.....	69
Gráfica 5.5 Angulo de inclinación en función del paso $W0$	71
Gráfica 5.6 Paso máximo entre primera y segunda gota $W0, \text{máx}$	72
Gráfica 5.7 Rugosidad experimental en función del paso horizontal $W0$	73
Gráfica 5.8 Rugosidad teórica en función del paso horizontal $W0$	74
Gráfica 6.1 Error entre paso programado y real	76
Gráfica 6.2 Morfología de las columnas para cada uno de los pasos	79
Gráfica 6.3 Rugosidad experimental y teórica en función del paso	86
Gráfica 6.4 Rugosidad experimental y teórica en función del paso	87
Gráfica 6.5. Error entre rugosidad teórica y experimental	88
Gráfica 6.6 Rugosidad teórica en función del paso horizontal.....	90
Gráfica 6.7 Variación del radio r y el paso Wd'	92
Gráfica 6.8 Tendencia de la rugosidad experimental	93
Gráfica 6.9 Inclinación y rugosidad teórica con el paso horizontal	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Propiedades físicas del material utilizado en la impresión	17
Tabla 3.2 Parámetros adimensionales.....	18
Tabla 3.3 Parámetros adimensionales en las condiciones del estudio.....	20
Tabla 3.4 Características de la impresora Jetlab.....	21
Tabla 3.5 Experimentos realizados y tipos de deposición	34
Tabla 3.6 Tipos y organización de las deposiciones.....	34
Tabla 3.7 Resultados obtenidos en la medición.....	35
Tabla 3.8 Parámetros y condiciones características de impresión.....	35
Tabla 3.9 Coeficiente $k(n)$ del criterio de Chauvenet.....	36
Tabla 3.10 Valores de la t-Student según el número de experimentos.....	38
Tabla 5.1 Medidas del radio inicial y la velocidad de caída.....	65
Tabla 5.2 Medidas para el cálculo del radio inicial. 2ºMétodo	66
Tabla 5.3 Medidas para el cálculo del radio inicial.3ºMétodo	67
Tabla 6.1 Error entre el paso real y paso teórico.	76
Tabla 6.2 Ángulo de inclinación de la columna en función del paso	81
Tabla 6.3 Rugosidades teórica y experimental. Placa 1.	83
Tabla 6.4 Rugosidades teórica y experimental. Placa 2.	84
Tabla 6.5 Rugosidades teórica y experimental. Placa 3.	84
Tabla 6.6 Rugosidades teórica y experimental. Placa 4.	84
Tabla 6.7 Valores de la rugosidad experimental y teórica en función del paso .	85
Tabla 6.8 Valores promedio del error entre rugosidades en función del paso....	88
Tabla 6.9 Valores de la rugosidad teórica para todos los pasos	90
Tabla 6.10 Resultados promedios del radio y la distancia Wd'	92
Tabla 6.11 Rugosidad y ángulo de inclinación en función del paso.....	95

NOMENCLATURA

Símbolo	Parámetro
V_0	Velocidad de salida de la gota por la boquilla
μ	Viscosidad dinámica
ρ	Densidad
γ	Tensión superficial
Re	Número de Reynolds
We	Número de Weber
Ohn	Número de Ohnesorge
Bo	Número de Bond
f	Frecuencia de deposición
W_0	Paso horizontal (distancia entre centros) entre dos gotas consecutivas
W'_d	Paso (distancia entre centros) medido en la dirección de la columna
$W_{0máx}$	Desplazamiento horizontal máximo entre gotas consecutivas
h_c	Altura del casquete esférico solidificado
h_v	Distancia vertical entre centros de gotas consecutivas
h	Distancia entre centros de dos gotas de la columna
R_i	Radio inicial de la gota de caída
R_1	Radio de la primera gota de la columna
R_2	Radio de la segunda gota de la columna
R_c	Radio de la gota solidificada
R_b	Radio de la base de la gota solidificada
R_a	Rugosidad superficial I de la columna
r	Radio de cualquier gota de la columna excepto de la primera
θ_s	Ángulo de solidificación
θ	Ángulo de contacto entre gotas
θ_i	Ángulo de inclinación de la columna
y	Distancia del centro de la gota solidificada al sustrato
a	Ancho del casquete esférico solidificado

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El proceso de fabricación sobre el que se realiza el estudio del presente TFG es el proceso de fabricación aditiva conocido como “Material Jetting”. Esta tecnología, situada en el contexto de las conocidas como impresión 3D, se realiza de forma digitalizada depositando pequeñas gotas de material sobre un sustrato para generar una pieza tridimensional.

Como se expone en el segundo capítulo, este proceso se encuentra actualmente en fase de desarrollo para intentar conseguir su implantación en diferentes sectores, tanto desde el punto de vista de la fabricación de piezas con fines de prototipado como para responder a requerimientos funcionales de alta precisión. Sin embargo, la microimpresión es una tecnología compleja que requiere, entre otras cuestiones, del perfecto conocimiento de las propiedades físicas del material en estado líquido que son relevantes a la hora de generar la gota hasta su correcta deposición y solidificación.

La morfología de la línea de impresión viene determinada por el modo de deposición utilizado y por una serie de parámetros que intervienen. En el presente TFG, el modo de trabajo utilizado es denominado “drop-on-drop” (gota sobre gota) donde la deposición se realiza a baja frecuencia generando una columna vertical de microgotas de un material con bajo punto de fusión, que será más o menos inclinada en función de los parámetros programados en la máquina de impresión del laboratorio. Los cuales se desarrollan en el Capítulo 3, donde se muestran los equipos y materiales utilizados para la consecución de los experimentos y la metodología llevada a cabo en las mediciones.

Así, en el capítulo 4 se exponen los modelos geométricos desarrollados por diferentes autores, que permitirán obtener los parámetros de estudio de este trabajo. Posteriormente, en el Capítulo 5 se llevará a cabo un estudio experimental donde se mostrarán los resultados obtenidos en el laboratorio, con el objetivo de comprobar si los modelos teóricos son realmente válidos y aplicables al material utilizado en este estudio.

Todo esto permitirá la comparativa y discusión de los resultados desarrollada en el Capítulo 6, donde se contrastarán los valores teóricos con los resultados obtenidos experimentalmente. Realizando un estudio de los principales objetivos del proyecto como son el paso máximo entre gotas, la rugosidad superficial de la columna y los límites que separan los modos de deposición vertical y horizontal.

Finalmente, en el Capítulo 7, se establecerán las conclusiones más significativas en el estudio realizado y las causas por las que los modelos teóricos no se ajustan del todo a los resultados experimentales. Reflejando que los modelos presentan ciertas discrepancias con lo que sucede en la realidad, debido tanto a limitaciones y aspectos que no consideran, o a que no resultan extrapolables a los materiales utilizados en este estudio por haber sido desarrollado para otros diferentes.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes y desarrollo actual

En el ámbito de los procesos de fabricación, el conjunto de técnicas por adición de material conocidas como fabricación aditiva o *Additive Manufacturing*, han alcanzado una importante relevancia en el mundo de la industria gracias a la creación de prototipos y componentes funcionales a partir de modelos 3D digitalizados, reduciendo notablemente los costes y tiempos de fabricación de componentes y adaptándose a la precisión y la calidad final del producto de salida.

Este tipo de fabricación surge a lo largo de la década de los 90 gracias al avance de diferentes sectores tecnológicos. A partir del desarrollo de tecnologías tales como el control numérico computarizado (CNC) o el diseño asistido por ordenador (CAD) la automatización de los procesos y la fabricación, mediante modelización en 3D, ha permitido obtener productos finales de muy distinta gama que se ajustan fielmente a las especificaciones requeridas por el cliente.(B.Derby)[3]

El término de fabricación aditiva deriva de lo que se conoce como Prototipado Rápido (*Rapid Prototyping*): un proceso utilizado para fabricar artículos de plástico, metal o cerámica mediante un modelo digital y con adición de capas de material, cuyo objetivo era el de generar un modelo de forma rápida que sirviera como base para el producto final.

Estos prototipos generados no eran funcionales, sino que eran usados para permitir al cliente probar o testar de algún modo la idea de lo que sería la pieza final. Este tipo de proceso no tuvo una repercusión importante en la industria debido a los costes implicados en la fabricación, además de generar un prototipo que no resultaba funcional [2].

Con el paso del tiempo, se desarrollaron procesos de fabricación aditivos orientados a la creación de productos funcionales en distintos tipos de materiales. Fue entonces, cuando el Prototipado Rápido pasó a denominarse Fabricación Aditiva, donde el producto obtenido no era un simple modelo, si no que cumplía además los requisitos necesarios para ser una pieza final.

Según I.Gibson, D.W Rosen y otros [2] las aplicaciones más actuales de la Fabricación Aditiva se dan en todo tipo de sectores, desde la salud hasta la industria aeroespacial. En el sector de maquinaria industrial como automoción, procesos de inyección o molde y matricería, ésta se emplea para prototipos, utillajes y modelos, creando piezas cada vez más funcionales. A lo largo de este capítulo, se desarrollará con cierto detalle los diferentes tipos de aplicaciones de esta reciente tecnología.

En relación con las técnicas de fabricación tradicionales, la Fabricación Aditiva permite conseguir complejidades geométricas que son imposibles por otras técnicas convencionales sin encarecer el proceso. A su vez, reducen procesos intermedios como la producción de utillajes, permitiendo obtener piezas hasta un 90% más rápido. Con esto, se permite generar productos con series cortas y reducir los costes de transporte y ensamblaje consiguiendo un ahorro considerable en la fabricación. Además, aseguran la precisión y funcionalidad requerida en la pieza final con un ahorro máximo en el material, generando productos de bajo peso o aligerados y asegurando una flexibilidad en el diseño y construcción de la pieza final. (Kruth y otros)[9]

En los últimos años, la fabricación aditiva es un sector que se halla en pleno auge y crecimiento no solo por la precisión, rapidez y ahorro que permite, sino por incluir también una de las principales tendencias actuales: la personalización de los productos adaptados a la necesidad de cada cliente sin incrementar el coste del proceso. Esto, aplicado a la producción en masa y al desarrollo de productos de alto valor añadido capaces de adaptarse a las necesidades del mercado, son algunos de los desafíos futuros de las empresas en países desarrollados y que conforman los objetivos una nueva revolución industrial, conocido actualmente como la Industria 4.0.

Pese a todos estos retos, la fabricación aditiva presenta una serie de limitaciones que hace que no se haya implantado aún de manera extendida en varios sectores y se convierta en un reto a resolver para ser viable y aceptada de forma generalizada. El coste tan alto de la maquinaria y la limitación en el tamaño de las piezas, no pudiendo hasta ahora producir en grandes volúmenes, son algunas de las barreras que junto con otros aspectos como la mejora de la calidad superficial, la disponibilidad de una gama más amplia de materiales y el perfeccionamiento de algunos procesos, condicionan que la fabricación aditiva continúe en estudio y en vías de desarrollo hasta lograr su total implantación en la industria [3].

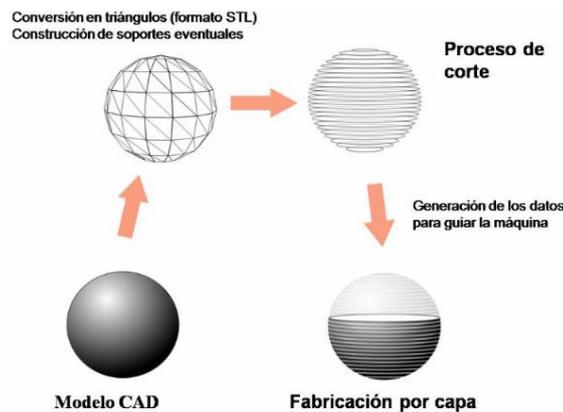
2.2 Procesos de fabricación aditiva por deposición de microgotas.

La fabricación aditiva es uno de los métodos de aporte o adición de material también conocidos con el acrónimo MIM (*Material Increase Manufacturing*). En este tipo de procesos, el material originalmente en estado sólido, líquido o en polvo, se deposita por capas sucesivas hasta completar la pieza final.

El principio básico consiste en la creación de una pieza física mediante la deposición capa a capa de material a partir de un modelo virtual en 3D generado por herramientas de CAD. Cada capa es una fina sección transversal de la pieza derivada del programa.

Las etapas que sigue el proceso se presentan en la Figura 2.1. En primer lugar, se lleva a cabo el modelo 3D de la pieza en CAD. Seguidamente, éste es convertido a un formato estándar STL válido para cualquier impresora 3D y que forma la base para el cálculo de la pieza. A continuación, se prepara la máquina y se transfiere el STL siendo manipulado en cuanto al tamaño correcto, posición y orientación para la construcción. El siguiente paso es la impresión del modelo físico. Finalmente, la pieza es retirada pudiendo ser sometida a un proceso de post-procesado que mejore el acabado final.[10]

Figura 2.1 Conversión del modelo 3D generado a la fabricación real



Fuente de procedencia: <http://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/240645-La-revolucion-lenta.html>

Las tecnologías de fabricación aditiva pueden clasificarse atendiendo a varios criterios. En función de la naturaleza del material de partida: polímero, metálico o cerámico, se establece una primera clasificación presentada en la Figura 2.2. El estado del material: sólido, líquido o polvo y el proceso de obtención de la pieza final: fusión en lecho de polvo, laminación, extrusión, impresión y foto-polimerizado entre otros, determinarán diferentes clasificaciones [10].

Figura 2.2 Clasificación de los procesos en función del material utilizado

POLÍMEROS	Estereolitografía (SLA)
	Modelado por deposición Fundida (FDM)
	Sinterizado Selectivo por láser (SLS)
	Laminated Object Manufacturing (LOM)
	Binder jetting
METALES	Material jetting
	Selective Laser Melting (SLM) o Laser Cusing
	Electro Beam Melting (EBM)
CERÁMICOS	Laser Metal Deposition (LMD o 3D Cladding)
	Sinterizado selectivo por laser (SLS)
	Impresión tridimensional (3DP)
	Modelado por deposición fundida (FDM)
	Estereolitografía (SLA)

Fuente de procedencia: “La fabricación aditiva. La evidencia de una necesidad - Metalmecánica.” [Online]. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/116342-La-fabricacion-aditiva-La-evidencia-de-una-necesidad.html>. [Accessed: 02-May-2019].

Según la organización de normas internacionales ASTM International (American Society for Testing and Materials) se distinguen siete categorías dentro de la fabricación aditiva (ASTM F2792-12a):

1. Extrusión de material (Material extrusión).
2. Foto polimerización de cubeta (VAT photopolymerization).
3. Fusión de cama de polvos o PBF (Powder Bed Fusion).
4. Inyección de material (Material Jetting).
5. Deposición de energía dirigida o DED (Directed Energy Deposition).
6. Inyección de aglutinante o (Binder Jetting).
7. Laminación de hojas (Sheet lamination).

El objeto de estudio de este trabajo pertenece a la categoría de *Material Jetting* o inyección de material, basado en la impresión por deposición de pequeñas gotas de material, generalmente un fotopolímero o cera, mediante un sistema con control en el espacio tridimensional. Este proceso funciona de manera similar a la impresora 2D convencional, salvo que aquí se construye una pieza 3D en lugar de una imagen 2D.

En este método (también llamado modelado *Polyjet*), un cabezal de impresión se utiliza para inyectar material de cera fundida en una plataforma de construcción o sustrato. El material, al entrar en contacto con el aire ambiente, se enfría y solidifica, generando una sucesión de capas superpuestas que permiten construirla pieza final.

Conforme a lo expuesto en el artículo publicado por B.Derby [3], existen dos mecanismos diferentes mediante los cuales las impresoras de inyección de tinta generan gotas: por inyección continua de tinta (CIJ) o por inyección de gota a demanda (DOD), que a su vez se divide en DOD térmico y DOD piezoeléctrico.

La impresión CIJ produce un flujo continuo de gotas de líquido formado por la inestabilidad de Rayleigh de una columna, que se expulsa bajo presión a través de una pequeña boquilla. Para dirigir y colocar estas gotas, la boquilla se mantiene a un potencial relativo al sustrato sobre el que se deposita, impartiendo una pequeña carga en cada gota a medida que se forma. Las caídas individuales en la corriente se dirigen aplicando un potencial adicional a las placas deflectoras (Derby, Capítulo 1).

Por otro lado, la impresión por inyección de gota a demanda o DOD, permite generar gotas individuales cuando son necesarias. Éstas se forman al propagar un pulso de presión en el fluido que se encuentra en una cámara detrás de la boquilla de impresión. Para generar este pulso se utilizan dos métodos: la impresión térmica DOD, que utiliza la excitación térmica para calentar la tinta de la cámara y así generar una burbuja que finalmente colapsará generando el pulso de presión requerido, y la impresión DOD piezoeléctrica que es la más usada en impresoras industriales y comerciales, donde el pulso es generado mediante un accionamiento mecánico utilizando un transductor piezoeléctrico. Cuando se aplica un voltaje, el material piezoeléctrico cambia de forma, generando un pulso de presión en el fluido, lo que obliga a una gota de tinta a salir desde la boquilla.

El método de impresión utilizado en este trabajo es por gota a demanda y utilizando un dispositivo de generación de gotas de tipo piezoeléctrico. Como se ha comentado anteriormente, esta tecnología es la más usada en impresoras industriales de inyección para la fabricación de materiales y esto es debido a que:

- En la tecnología DOD térmica, la necesidad de generar una gota limita los fluidos a los de una alta presión de vapor en condiciones ambientales.
- La impresión DOD piezoeléctrica permite cambiar el pulso de actuación fácilmente para controlar el tamaño y la velocidad de la gota para cualquier fluido.
- A su vez, la impresión CIJ, aunque permite altas velocidades de impresión, ha sido poco usada en aplicaciones de ciencia de materiales. Esto es debido a que presenta un rango más limitado de deposición de fluidos que la tecnología DOD por su menor resolución espacial de las gotas en el sustrato. Además, resulta menos económica con el suministro de tinta, ya que el flujo continuo en este proceso, genera gotas incluso cuando no se requiere impresión. Esta tinta que a veces no puede ser aprovechada y reciclada genera en algunos casos residuos y contaminación.

Con respecto a la solidificación o curado en estos procesos existen varios métodos que se aplican en la técnica de *Material Jetting*. El más utilizado es el curado mediante luz ultravioleta (UV), que se aplica inmediatamente después de la deposición de cada capa. Sin embargo, en la impresión con la que se trabaja en este estudio, la solidificación ocurre de forma inmediata por enfriamiento.

2.3 Ventajas y limitaciones.

Como afirma Estephen D.Hoah en "Fundamentals of Inkjet Printing" (Capítulo 15)[2], en el ámbito de los procesos de impresión 3D relacionados con materiales poliméricos, la técnica de Material Jetting o deposición de microgotas de material presenta ciertas ventajas respecto a otros métodos:

-Resultan más económicos que los procesos que utilizan láseres, como la estereolitografía (SLA) y el sinterizado selectivo por láser (SLS) que además requieren de mayores fuentes de energía que la deposición por microgotas.

- Presentan alta escalabilidad mediante el empleo de cabezales con múltiples boquillas, que permiten depositar grandes cantidades de material para conseguir elevados volúmenes de producción.

- Las máquinas de impresión pueden ensamblarse a partir de componentes estándar mientras que otras máquinas disponen de muchos componentes específicos.

- Se puede aumentar la velocidad de impresión agregando otro cabezal de impresión a una máquina, tarea que resulta mucho más complicada en una máquina SL o SLS.

A pesar de esto, los procesos por deposición por microgotas de material, presentan una serie de limitaciones que han de mejorarse para su total implantación en la industria:

- Control de la precisión dimensional y geométrica de las piezas fabricadas. Especialmente para piezas grandes, la precisión no es tan buena como con algunos otros procesos, especialmente SL y modelado de deposición fundida.

-Elección de los tipos de materiales para imprimir limitada. Actualmente, solo las ceras y los fotopolímeros están disponibles comercialmente. La impresión de aglomerantes o Binder Jetting amplía estos materiales a algunos compuestos de cerámica y metales pero presentan muchas limitaciones [2].

-Control de la calidad superficial y porosidad de las piezas. En la mayoría de los casos es necesario someter a las piezas a un post-procesado para que adquiera la calidad especificada.

-Coste de las maquinarias de impresión muy elevado. Aunque los procesos sean más económicos, las máquinas 3D por deposición de material son notablemente más caras que por ejemplo, las de extrusión de material fundido.

- Propiedades mecánicas de las piezas obtenidas. Las limitaciones del uso de materiales adecuados para imprimir generan piezas frágiles y con mala integridad mecánica, además de incluir tiempos de construcción muy largos.

En términos generales, para lograr superar estas limitaciones y mejorar la capacidad de impresión en las técnicas de deposición es necesario estudiar una serie de factores involucrados que se mencionarán en el siguiente apartado. Como se verá, cambios en los parámetros de impresión, comportamiento del chorro de líquido y aspectos fluido dinámicos del material fundido determinarán el rendimiento y la calidad del producto final obtenido.

2.4 Desafíos futuros y campos de aplicación

Actualmente, los límites de la impresión 3D continúan ampliándose a aplicaciones cada vez más interesantes, desde los usos industriales generales como prototipos, utillajes y piezas funcionales para cadenas de producción hasta productos decorativos, joyería y textil. En el sector de la salud, la bioimpresión para la generación de prótesis en 3D, ha permitido personalizar piezas adaptadas a las necesidades de cada paciente, como por ejemplo implantes o productos ortopédicos. A su vez, la fabricación aditiva de metales ha tomado una importante relevancia en sectores como aeroespacial (alabes de turbinas) y automoción (conductos de refrigeración) contribuyendo a la creación de componentes más ligeros que permiten reducir problemas de peso, tiempo y costes en el transporte. (D.W Rosen y Gibson, Capítulo 18)[2]

Los procesos de inyección de material por impresión 3D no se han implantado de forma definitiva en el mercado principalmente por el alto coste que supone esta tecnología, la gama reducida de materiales con los que trabaja y las propiedades mecánicas y precisión dimensional de las piezas fabricadas.

Un nuevo enfoque respecto a los procesos de inyección de tinta que podría proporcionar un cambio significativo en el rendimiento se centra en los cabezales de impresión. Una evolución de la técnicas y mejoras en los materiales han permitido boquillas más pequeñas, de mayor densidad, mayor rendimiento y más confiables en cabezales de impresión.

Para vencer todas estas limitaciones, existen numerosos fenómenos involucrados en la impresión que deben ser analizados. Desde la formación del material fundido, hasta el control de la deposición de las gotas que requiere problemas en la trayectoria de vuelo de las mismas, impacto y solidificación en el sustrato. Propiedades físicas como la tensión superficial y la viscosidad del material fundido juegan un papel fundamental en el proceso de deposición, incluyendo efectos térmicos y tiempos característicos de solidificación de las gotas depositadas. Todo esto, se desarrollará con más detalle en capítulos posteriores, definiendo las condiciones de operación y rangos de ciertos parámetros adimensionales que garanticen la impresión idónea y aseguren la alta calidad y precisión geométrica requerida por pieza final.

CAPÍTULO 3

MATERIALES, EQUIPOS Y METODOLOGÍA

En el presente capítulo se expondrán los materiales, equipos y programas que generan y controlan el proceso de deposición de material. Como se mencionará posteriormente, el carácter digital de la fabricación gota a gota requiere de un control tanto de la generación como de la deposición de las gotas en la columna. Los efectos de la viscosidad y la tensión superficial, así como otros parámetros dimensionales, marcarán unas condiciones de operación muy ajustadas para la correcta formación y deposición de las gotas. A su vez, la metodología utilizada ha permitido obtener valores experimentales de los distintos parámetros de la columna para su posterior comparación con los predichos por los modelos teóricos ya establecidos.

3.1 Material

Como se mencionó anteriormente, una de las limitaciones de los procesos basados en impresión 3D por deposición de microgotas es que los tipos de materiales que pueden utilizar son limitados. El plástico sigue siendo todavía el material más utilizado en la impresión 3D. Sin embargo, la industria está experimentando con nuevos enfoques novedosos, tales como resinas de base biológica (maíz y aceite de soja).

Además, la impresión de metales está tomando importancia debido a la gran cantidad de aplicaciones que puede tener en el sector de la electrónica y microcomponentes.

Las tecnologías de fabricación aditiva se clasifican atendiendo al material utilizado, según sea polimérico, cerámico o metal. La elección de uno u otro depende de las especificaciones que requiera la pieza final, las propiedades mecánicas y el acabado superficial serán entre otras, características importantes que se han de tener en cuenta.

La densidad, la tensión superficial y la viscosidad del fluido de trabajo son las propiedades físicas relevantes en el proceso de impresión. Para este trabajo, debido a su bajo punto de fusión el material utilizado ha sido una parafina del tipo 1260A fabricada por *International Group Inc.* con las siguientes características:

Tabla 3.1 Propiedades físicas del material utilizado en la impresión

Parafina 1260A	Tª de Fusión	Densidad	Calor Específico	Conductividad térmica	Calor latente de fusión	Viscosidad dinámica	Tensión superficial
	(K)	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(Pa·s)	($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
	342.4	771.0	2560.0	0.237	$226\cdot 10^3$	$5.4\cdot 10^3$	$22.4\cdot 10^{-3}$

Esta cera se vierte en el depósito en forma de pequeñas esferas sólidas transparentes. Allí, son calentadas hasta fundirse generando una masa líquida de parafina a la temperatura de trabajo de 85°. Posteriormente, será el cabezal de impresión el que vierta las gotas líquidas que solidificarán de forma casi instantánea al entrar en contacto con el sustrato y la temperatura ambiente.

El proceso de generación de la gota resulta complejo, ya que la tensión superficial, la inercia y la viscosidad del fluido utilizado (en este caso, parafina) juegan un papel clave en la fragmentación y el comportamiento de los chorros y gotas de material. Es por esto, que es necesario tener en cuenta varios parámetros adimensionales que cuantifican la importancia de las propiedades físicas necesarias para que sea posible la impresión.

Así, existen unos rangos que limitarán que un fluido pueda ser o no imprimible según las propiedades que presente. En la tabla 3.2 se muestran algunos números adimensionales típicos del campo de la mecánica de fluidos que son útiles para la comprensión del comportamiento de la gota y la identificación de la región imprimible.

Tabla 3.2 Parámetros adimensionales

Parámetros adimensionales	Definición	Significado físico
Número de Reynolds	$Re = \frac{v\rho d}{\mu\eta}$	Relación entre las fuerzas inerciales y viscosas en un fluido en movimiento
Número de Weber	$We = \frac{v^2\rho a}{\sigma}$	Importancia relativa de la inercia de un fluido en comparación con su tensión superficial
Numero de Ohnesorge	$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{(\sigma\rho a)^{1/2}}$	Parámetro resultante de combinar We con Re para eliminar la influencia de la velocidad. Establece la región imprimible
Indicador de impresión	$Z = \frac{1}{Oh}$	Inverso de Ohnesorge
Número de Bond	$Bo = \frac{\rho g a^2}{\sigma}$	Relación de las fuerzas gravitacionales con las fuerzas de tensión superficiales
Número de Stefan	$St = \frac{Cp\Delta T}{L}$	Relación entre la capacidad calorífica y el calor latente de cambio de fase o estado de un material.

Según Gao y Sonin [5] para evitar la ruptura de las gotas y por tanto, las salpicaduras, se busca que la tensión superficial domine sobre los efectos de la inercia durante el impacto, esto se traduce en que $We < 10$. Por otro lado, estudiaron que el número de Bond es muy pequeño en esta escala, $Bo < 1$ ya que los efectos gravitacionales son prácticamente insignificantes.

A su vez, demostraron que la deposición de gotas (impacto y propagación) se produce en una escala de tiempo mucho más corto que la solidificación, y que en estas condiciones las gotas deben primero establecer una forma líquida de cuasi-equilibrio en el sustrato y solidificar a partir de entonces en una escala de tiempo mucho más larga.

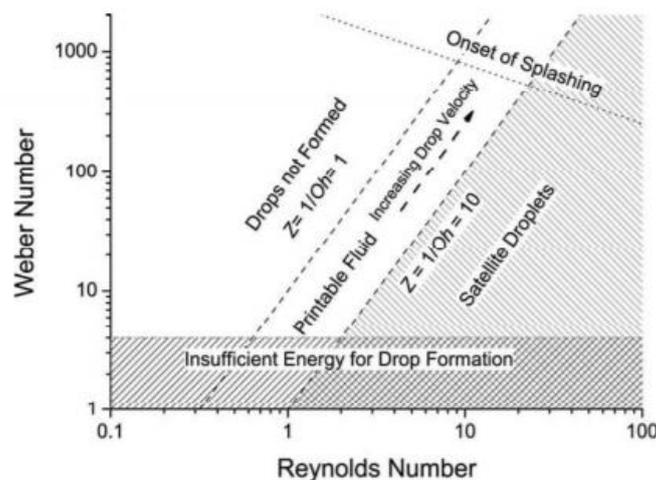
Otros estudios mostraron que el proceso de difusión (de $40 \mu s$ de duración) ocurría tres órdenes de magnitud más rápido que el tiempo de solidificación (17 ms), por lo que según el modelo térmico de F. Gao y A. A. Sonin, [5] después de un segundo, la gota que había caído ya estaba solidificada.

De forma general, los parámetros más interesantes en la determinación de la zona imprimible son los números We y Re . Para un fluido newtoniano donde la viscosidad es independiente de la velocidad de cizallamiento y no hay elasticidad, el número Oh , que engloba el número de We y Re , se puede utilizar con el fin de determinar un intervalo en el que es posible imprimir.

Derby y otros [2], estudiaron que si el valor de este parámetro es muy grande ($Oh > 1$) el flujo es tan viscoso que las gotas no pueden formarse al no poder separarse entre sí, mientras que para valores muy bajos ($Oh < 0.1$) el flujo está dominado por la tensión superficial y tenderá a formar gotas satélite y salpicaduras.

Por tanto, la región imprimible fue estimada entorno a valores de Oh entre 0,1 y 1. Si se utiliza el parámetro Z , definido anteriormente como el inverso de Oh en la Tabla 3.2, su valor debe oscilar entre 1 y 10 según los investigadores Reis N, Derby B. Esto puede verse en la Figura 3.1 que relaciona los tres parámetros adimensionales:

Figura 3.1 Región imprimible identificada para fluidos newtonianos simples basados en los números adimensionales de Weber, Reynolds y Ohnesorge



Fuente de procedencia: Y. Guo, H. S. Patanwala, B. Bognet, and A. W. K. Ma, "Inkjet and inkjet-based 3D printing: connecting fluid properties and printing performance," Rapid Prototyp.[4]

-Como se observa, para valores muy pequeños de Re , nos encontramos en la región más izquierda donde $Z < 1$ y no es posible formar gotas debido a la que el fluido es muy viscoso.

- Valores de $Z > 10$, se corresponden con la zona sombreada de la gráfica situada más a la derecha donde la capilaridad toma relevancia y existe una gran tendencia a la formación de gotas satélite.

-Si $1 < Z < 10$ nos encontramos en las condiciones aptas para la impresión (zona de fluido imprimible)

-La zona superior sombreada marca el límite donde pueden darse salpicaduras y la región situada en la parte inferior de la gráfica es aquella donde no hay suficiente energía cinética para la formación de la gota.

Los problemas en la generación de la gota, fueron estudiados por Duiveneld que dedujo que el número de We debía ser mayor de cuatro para que la gota pudiera ser expulsada de la boquilla. Otros autores como F. Gao y Sonin [5] concluyeron que el número de Weber basado en la velocidad de expulsión debía ser del orden 10 o mayor.

En cuanto a la generación de salpicaduras sobre el sustrato, Stow & Hadfield demostraron que se cumplía:

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

Donde $f(R)$ es una función que depende solamente de la rugosidad superficial. Esta expresión ha sido estudiada por numerosos autores concluyendo que para superficies lisas el valor de $f(R) \approx 50$.

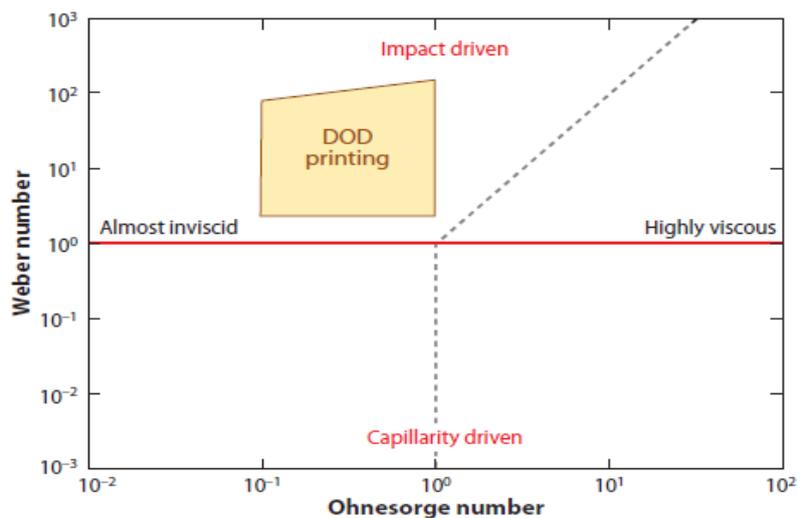
En el modo de impresión de este trabajo, impresión gota a gota o DOD, los valores de operación obtenidos oscilan entorno a los mostrados en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3 Parámetros adimensionales en las condiciones del estudio

$R_0(\mu m)$	$V_{imp}(m/s)$	Re	We	St	Bo	Oh
~ 10-100	~1	~10-100	~1-10	<1	<1	<1

Según la Figura 3.2, basada en los estudios de Schiaffino y Sonin, el comportamiento de la gota al impactar puede dividirse en un régimen de impacto donde dominan las fuerzas inerciales (*impact driven*) y otro régimen en el que predominan las fuerzas de capilaridad (*capillarity driven*). A su vez, las zonas izquierda y derecha delimitan un régimen fluido y otro muy viscoso. La zona DOD imprimible se encuentra representada por el trapecio amarillo. Los valores de nuestro objeto de estudio mostrados en la tabla 3.3, muestran que efectivamente pertenecen a la zona apta para la impresión.

Figura 3.2 Representación de los distintos regímenes de impresión en función del número de We y Oh. Zona DOD imprimible.



Fuente de procedencia: Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements. [3]

3.2 Equipos y software

3.2.1. Impresora JetLab

El equipo fundamental utilizado en el desarrollo de este trabajo ha sido la estación de impresión Jetlab® localizada en el laboratorio de Fabricación (Figura 3.1). Su configuración se centra en la inyección de material "bajo demanda" (DOD), permitiendo la deposición de gotas a pedido mediante control digital con el programa JetLab asociado a la máquina.

Figura 3.3 Impresora JetLab del laboratorio de Fabricación



Tabla 3.4 Características de la impresora Jetlab

Subsistema	Estándar	Opcional
Viaje XY	Área imprimible 160 x 120 mm.	Área imprimible 210 x 260 mm (4xl)
Velocidad / Aceleración	50 mm / s / 1500 mm / s ²	
Precisión / Repetibilidad	± 30µm unidireccional / ± 20µm	± 25µm / ± 5µm (4xl-A)
Computadora	Panel PC; monitor, teclado y mouse; Windows 7; Puertos USB 2.0 y Ethernet; DVDRW	
Neumática	Regulador de presión / vacío de precisión con lectura digital para operación de chorro; control neumático de tres estados	Control electrónico: regulador presión / vacío y neumática de tres estados.
Visión	Cámara horizontal a 15 ° para configuración de chorro, observación de impresión, alineación a las características	Cámara vertical para alineación, inspección Drop y software de análisis de imagen fiducial.
Cabezales de impresión y dispositivos de inyección	Seleccione uno o más (no incluido en el precio base)	Elija entre las versiones PH-41, PH-41H y PH-47 xl: monta todos los cabezales de impresión estándar MicroFab; Intercambiable
Trabajos de impresión complejos	Archivo de script: anidamiento, repetición con desplazamientos, estados de espera, mantenimiento y controles TTL; Resolución y dirección de impresión arbitraria.	
Modos de impresión	Impresión sobre la marcha y punto a punto	
Jet Drive Electronics	JetDrive™ V: modo bipolar y arb	

Fuente de procedencia: Specifications Jetlab® 4 - Tabletop Printing Platform
<http://www.microfab.com/complete-systems/jetlab-tabletop>.

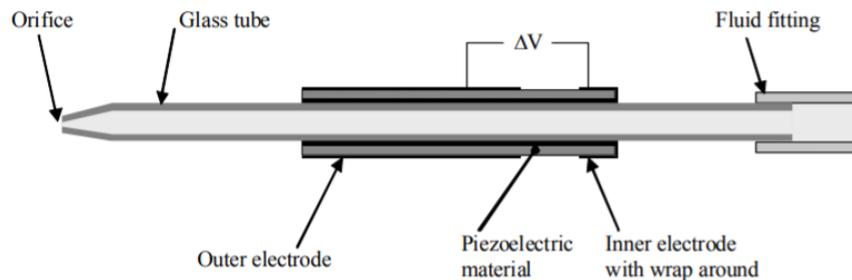
El programa JetLab del que se dispone, posibilita el control de la estación de impresión de forma computarizada. La configuración de distintos parámetros en él, permite la formación y deposición controlada de las gotas incluido el desplazamiento y posicionamiento del sustrato en un sistema de ejes X-Y con el uso de un lenguaje de programación basado en scripts. A su vez, gracias a la cámara que dispone la impresora y a la función *Strobe Delay* del menú del programa Jetlab, se han tomado capturas de las gotas en distintos intervalos de tiempo, obteniendo medidas de algún parámetro requerido como es la velocidad de caída.

Los dispositivos que la forman se muestran a continuación:

3.2.1.1 Micro jet o micro-dispensador de chorro de tinta

Funcionamiento

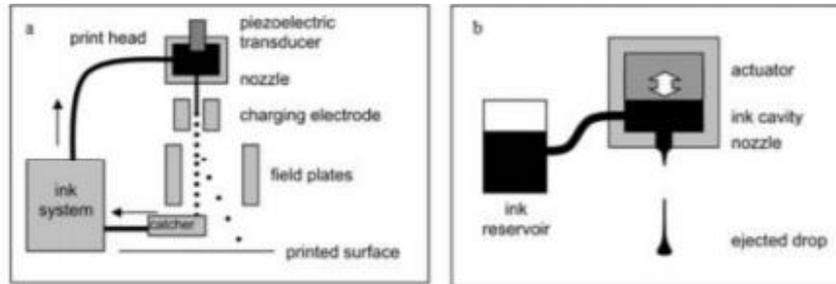
Se trata de un generador de gotas accionado piezoeléctricamente que a partir de un diferencial de voltaje o una señal de activación, se genera un campo eléctrico entre los electrodos interno y externo que provoca la deformación del actuador piezoeléctrico y fuerza la caída de la gota a través del orificio.



Fuente de procedencia: Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up..MicroFab Technologies Copyright 2012 MicroFab Technologies, Inc., Plano, TX, USA.[13]

De forma general, existen dos métodos de impresión de microgotas: impresión continua que forma un flujo continuo de gotas de líquido (CIJ) e impresión por gotas individuales a pedido (DOD) [4]. En el caso que nos ocupa se utilizará el último método mencionado.

Figura 3.5 Métodos de impresión de microgotas: a) impresión continua (CIJ). b) impresión por gotas a pedido (DOD).



Fuente de procedencia: Y. Guo, H. S. Patanwala, B. Bognet, and A. W. K. Ma, “Inkjet and inkjet-based 3D printing: connecting fluid properties and printing performance,” Rapid Prototyp.[4]

3.2.1.2 Tubos, conectores y depósito

Lo conforman el depósito y las conexiones de fluido al dispensador se montan en un subconjunto al que se hace referencia como cabezal de impresión.

Figura 3.6 Cabezal de impresión



3.2.1.3 Placa calefactable con sensores de temperatura

Situada en la esquina inferior izquierda de la máquina, indica el valor de la temperatura del sustrato.

3.2.1.4 Control de contrapresión y purga

Controla la presión en el espacio sobre el líquido en el depósito hasta un nivel que mantiene el líquido al ras con el orificio. Al aplicar presión al depósito, la solución se purga a través del orificio. La purga se utiliza para llenar el tubo después de llenar el depósito y para eliminar las burbujas de aire y la contaminación más pequeña que el orificio.

3.2.1.5 Cámara de observación y monitor de video

Permite la visualización de la formación de caída junto con un LED que se enciende de forma sincronizada con la generación de caída. Utiliza una luz estroboscópica que se coloca en el lado opuesto del dispositivo de inyección y en línea.

Observando la cámara y mediante la función *Strobe Delay* con control deslizante del menú principal, se ajusta el retardo estroboscópico, proporcionando puntos de vista de cada fase de la formación de las gotas. El retardo modifica la temporización relativa entre ambos permitiendo visualizar las gotas en toda su trayectoria.

3.2.1.6 Mesa de trabajo o sustrato

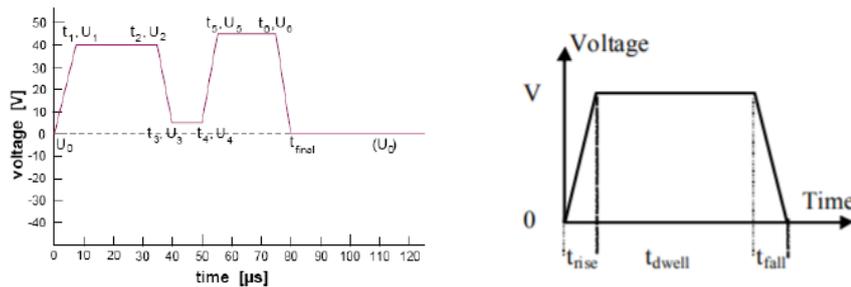
Plataforma que se desplaza en un sistema de ejes XY por control digital a través del ordenador. En la Tabla 3.4 de características de la impresora, se muestran algunas de las propiedades y funciones de las que dispone.

3.2.1.7 Señal aplicada

Al aplicar un impulso en forma de onda de voltaje, se genera campo eléctrico entre los electrodos que provoca que el piezoeléctrico se deforme y reduzca el volumen donde se encuentra el material fundido, dando lugar a ondas de presión expansivas y compresivas que se generan a partir de dicha deformación y que provocan la salida de las gotas.

La forma de esta señal viene caracterizada por una serie de parámetros (voltaje de reposo, voltaje de eco, de permanencia etc.) cuyos valores es necesario ajustar para que la gota finalmente caiga y es aplicada a uno de los electrodos mientras que el otro se halla conectado a tierra. En este estudio, la forma de la onda es trapezoidal (Figura 3.8 y 3.9) y la deformación del piezoeléctrico tiene lugar durante los tiempos de subida y bajada (t_{rise} y t_{fall}). Este tipo de onda se corresponde con la denominada onda compleja en la que no existe pulso negativo.

Figura 3.7 y Figura 3.8 .Forma de onda aplicada al piezoeléctrico y representación de sus parámetros característicos



Fuente de procedencia: Apartado 2.Start-up and shut-down.Jetlab Control Program Tutorial Guide Version 4.1.0 26 April 2013.

Para la puesta en marcha de la impresora, es necesario seguir una serie de pasos que se muestran a continuación y permiten la deposición adecuada de microcolumnas:

3.2.1.8 Calibración de la máquina y generación de las microgotas.

El primer paso a realizar es la calibración. Para ello es necesario importar una imagen que sirva de patrón.

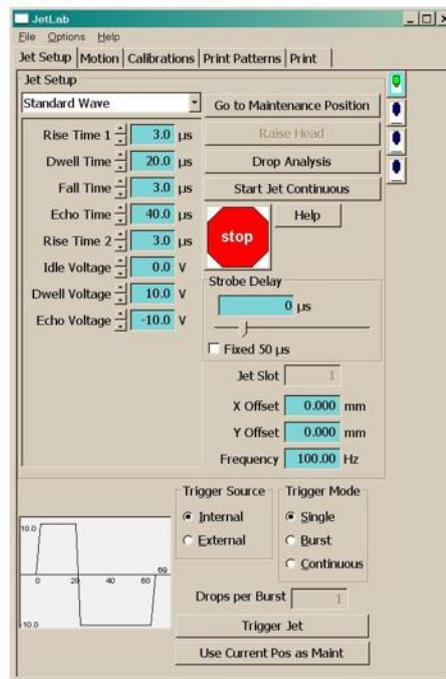
La velocidad se obtendrá de forma aproximada ya que solo puede ser medida con el software de tratamiento de imagen, el cual, comete ciertos errores debido a su resolución en los pixeles de la imagen capturada. Porque el microscopio óptico no permite esto.

La casilla de verificación para un retardo fijo permite estimar visualmente la velocidad de caída mediante la observación de la posición de la gota en la pantalla de la cámara, que incluye una escala vertical sin calibrar.

Una vez que la impresora está puesta a punto, el siguiente paso es ejecutar el programa Jet Lab. En él, se configura que el dispositivo de inyección está dispensando fluido. Para ello, clicando en la pestaña *Jet Setup* aparece un menú principal con distintas opciones y parámetros que controlan y calibran el proceso de generación.

Ha de tenerse en cuenta que cada gota se forma y expulsa de la boquilla gracias a un sistema piezoeléctrico que es configurable de forma digital mediante un impulso con forma de onda que al aplicarlo al cabezal, estimula la expulsión de la gotita. El tipo de onda se selecciona en un menú desplegable en la parte superior izquierda. Para todos los casos, se ha seleccionado la onda *Standard Wave*, que utiliza impulsos unipolares y bipolares con segmentos de subida y bajada lineales, esto es, una forma de onda trapezoidal.

Figura 3.9 Condiciones y parámetros característicos de la onda aplicada



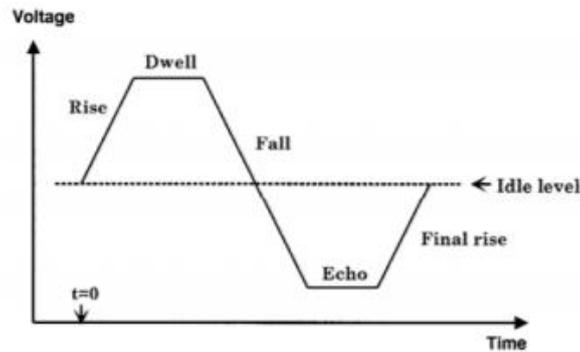
Fuente de procedencia: Jetlab Control Program Tutorial Guide Version 4.1.0 26 April 2013

El siguiente paso es calibrar la máquina para que logre expulsar las microgotas. Para esto, se selecciona la posición de mantenimiento de la impresora con el botón *Go to Maintenance Position* donde el cabezal queda situado encima de un cubo para residuos vertidos y se comienza a imprimir pulsando *Start Jet Continuous*.

Mediante la cámara horizontal se visualiza la punta del cabezal y se modifican un los parámetros de la señal y la presión para conseguir la formación de la gota. Éstos son los siguientes:

- Temperatura de consigna: 85°
- Frecuencia de deposición de las gotas
- Presión adecuada para la gota
- *Echo Voltage* o Voltaje de eco
- *Dwell Voltage* o Voltaje de permanencia
- *Idle Voltage* o Voltaje inactivo

Figura 3.10 Valores de voltaje característicos de la señal aplicada al piezoeléctrico

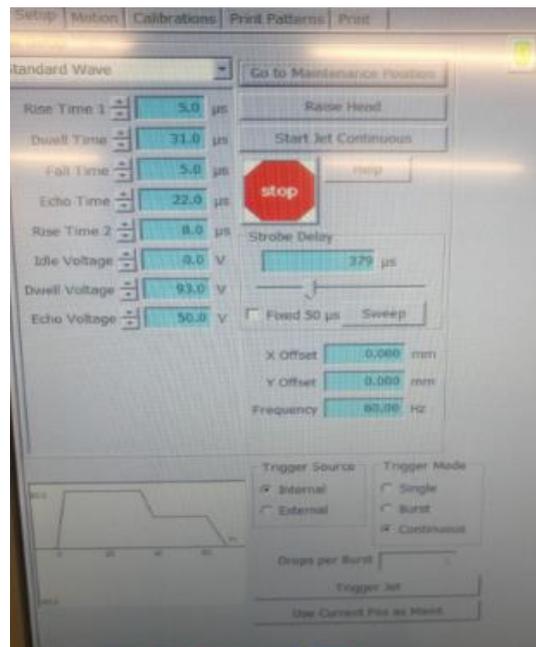


Fuente de procedencia: 3.2 Determining operating parameters for jetting devices – input fields. Jetlab Control Program Tutorial Guide Version 4.1.0 26 April 2013.

De forma habitual en impresión, este tipo de señales bipolares suelen incluir un pulso negativo respecto del voltaje de referencia como la señal de la Figura de arriba. En el caso que nos ocupa, con el objetivo de evitar la formación de gotas satélites y por tanto generar gotas de un tamaño más visual, no se utiliza un pulso negativo y la onda resultante en el experimento realizado adquirió una forma trapezoidal con los siguientes valores:

- Rise Time 1: 5.0 μ s
- Dwell Time 1: 31.0 μ s
- Fall Time : 5.0 μ s
- Echo Time: 22 μ s
- Rise Time 2: 8.0 μ s
- Idle Voltage: 0.0 V
- Dwell Voltage: 93.0 V
- Echo Voltage: 50.0 V

Figura 3.11 Condiciones del experimento realizado

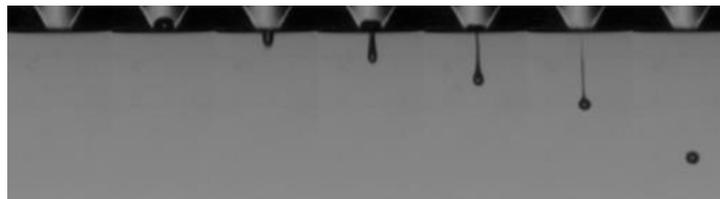


El valor de estos voltajes de la onda aplicada que controlan los tiempos de espera y eco determinan si se forma o no la gota. Para cada experimento las condiciones ambientales y de calibración son distintas, por lo que estos valores varían de un experimento a otro.

En los estudios realizados en el laboratorio se comprobó experimentalmente para la mayoría de casos que la impresión de la gota se estabilizaba para valores de 90 y 100V en la zona alta y 60-70 V para la zona baja de la onda. Existiendo una diferencia entre los voltajes de eco y de permanencia (Dwell and Echo) de aproximadamente 30V. Sin embargo, esto resulta meramente estimativo, ya que estos valores cambian según las condiciones de cada experimento.

Ajustando estos parámetros el proceso de formación comienza al visualizar en la cámara una silueta curva en la parte de la boquilla (Figura 3.13). Para provocar que la gota caiga, se suele aplicar al principio una contrapresión positiva al fluido en el depósito mediante la ruleta negra del panel de la impresora.

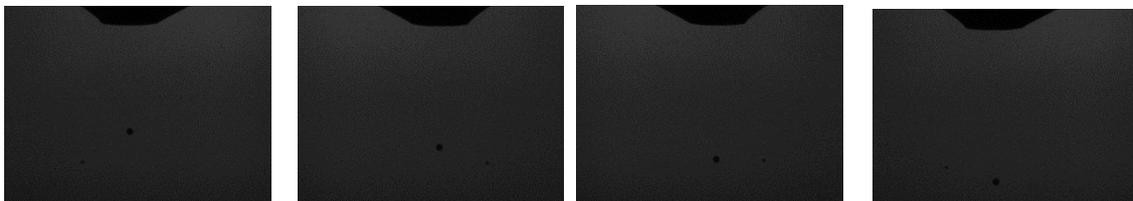
Figura 3.12 Proceso de expulsión de la gota paso a paso



Fuente de procedencia: Jetlab Control Program Tutorial Guide.

Observando la cámara y mediante la función *Strobe Delay* con control deslizante del menú principal, se ajusta el retardo estroboscópico, proporcionando puntos de vista de cada fase de la formación de las gotas. Esto ocurre debido a que los pulsos de la luz estroboscópica están sincronizados con el pulso de salida de las gotas. El retardo modifica la temporización relativa entre ambos permitiendo visualizar las gotas en toda su trayectoria.

Figura 3.13 Trayectoria de caída de la gota generada



Una vez logrado la impresión de las gotas, se deben ajustar los valores de los diferentes parámetros anteriormente comentados hasta lograr una correcta formación y caída de las gotas.

En algunas ocasiones, la gota se desvía de su trayectoria rectilínea y no cae en el orificio fabricado en el sustrato que dispone de un pequeño cubo de plástico que recoge las gotas durante la calibración. Es entonces cuando las gotas en vez de ser recolectadas, se depositan sobre el sustrato hasta tal punto que pueden llegar a tocar el cabezal, lo cual es muy peligroso y debe limpiarse para no obstruir. Cuando se necesita limpieza, el cabezal puede levantarse con la función *Raise Head* y después de ser limpiado, bajar con el mismo comando para continuar la impresión.

Para que el recorrido de la gota sea recto (observar la regla horizontal que aparece como guía en la visualización de la cámara) y sin formación de gotas satélites será necesario combinar los valores de voltaje y ajustar el valor de la presión para que las gotas satélites se solapen formando una única gota de mayor diámetro. Al finalizar este proceso, la máquina estará calibrada y lista para empezar con la deposición de las columnas.

3.2.1.9 Colocación para la deposición de microcolumnas

Una vez que la máquina se encuentra calibrada e imprime de forma correcta, el siguiente paso será realizar la deposición. Para ello, es necesario la colocación de una placa metálica sobre el sustrato que sirva de soporte a las columnas y seleccionar posteriormente, el paso a utilizar en cada columna. En el modo de trabajo que nos concierne, esto es, gota sobre gota (*drop on drop*) o deposición de columnas verticales e inclinadas donde el sustrato es móvil, el paso o distancia horizontal (W_d ó W_0) según las referencias) que el sustrato debe desplazarse para colocar cada gotita se encuentra entre los 0 y 32 μm . Como explican modelos teóricos de los autores Qi, L., Zhong, S., Luo, J. y otros [8], a partir de las 32 μm la columna inclinada no es capaz de mantenerse estable y se alcanza el modo de deposición propiamente horizontal.

Dado que la resolución de la máquina es de 8 μm ., se han realizado cuatro deposiciones o columnas de 15 gotas cada una: la primera, vertical y con un paso de 0 μm , la segunda con un paso de 8 μm , y así sucesivamente, hasta alcanzar el valor límite de 32 μm .

Para todo esto, se ha hecho uso del software Jetlab, el cual dispone de un lenguaje de scripting que permite programar y controlar la impresora ajustando el desplazamiento del sustrato en un sistema de coordenadas (XY).

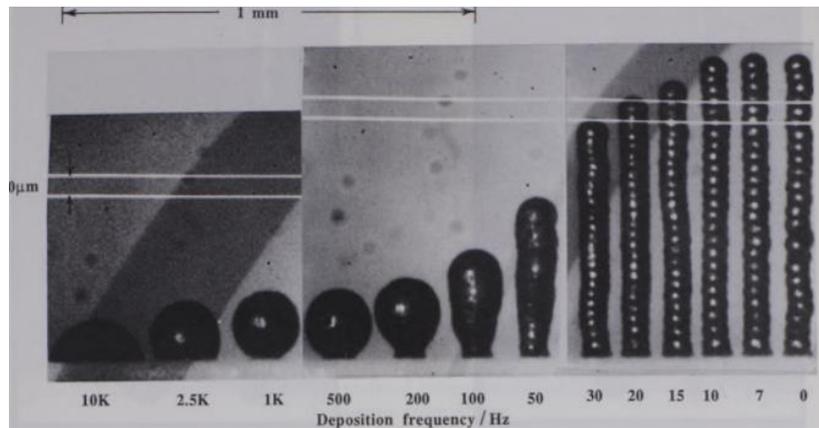
Este lenguaje de scripts es un código de instrucciones en formato texto que permite posicionar el cabezal en la zona requerida para la deposición. El anexo del Manual Jetlab permite consultar las distintos comandos y programaciones que pueden realizarse (Aptdo 6. Jetlab Control Program Tutorial Guide. *Script driven printing*).

En la calibración, la frecuencia de generación de las gotas fue de 50 Hz, sin embargo en la deposición de las columnas la frecuencia es mucho más baja. Los comandos *set drops 1 1* y *set frequency 1 1* establece que las gotas serán depositadas con una frecuencia de 1 Hz.

La frecuencia de deposición es muy importante ya que como se ha podido comprobar en muy diferentes estudios como los realizados por Gao y Sonin. [5], a medida que aumenta la frecuencia, no hay tiempo suficiente para que la gota anterior, sobre la que se deposita la nueva gota, haya solidificado completamente.

Esta situación provoca cambios sustanciales en la geometría de la columna como muestra la figura 3.16, donde se puede apreciar que a medida que aumenta la frecuencia gotitas sucesivas comienzan a depositarse sobre la anterior sin que puedan distinguirse entre sí.

Figura 3.15 Estructuras por deposición de 25 microgotas de material de candelilla a distintas frecuencias.



Fuente de procedencia: F. Gao and A. A. Sonin, “Precise Deposition of Molten Microdrops: The Physics of Digital Microfabrication,” [5]

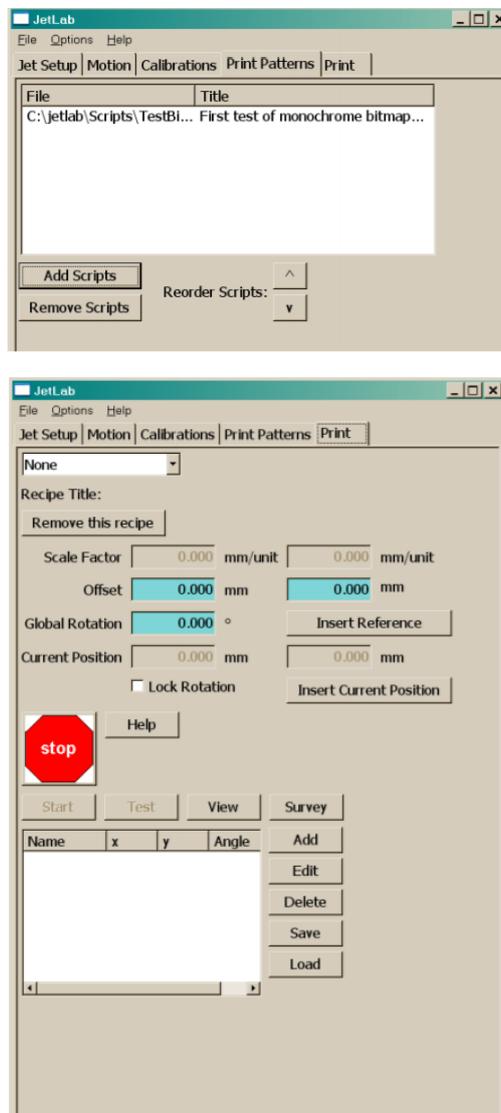
A su vez, a frecuencias suficientemente bajas, por debajo de unos 10 Hz, tiene lugar una solidificación gota a gota distinta donde se forman pilares verticales idénticos de gotitas solidificadas independientemente de la frecuencia.

La siguiente instrucción es *move to*, y realiza un movimiento de los ejes *x* e *y* a las coordenadas objetivo especificadas (en mm) para la siguiente columna. En nuestro caso, el eje *y* permanece inmóvil con el mismo valor (0.6) y la coordenada en *x* para cada columna, resulta de sumar 0.02 mm (200 μm) a la última posición en la que se quedó el cabezal en la columna anterior.

Los comandos *begin* y *end* hacen referencia a los movimientos en *x* e *y* necesarios para completar la deposición, en este caso 15 líneas de comando para 15 gotas que forman la columna. El primer número que aparece se corresponde con la coordenada *x*, que va incrementándose en función del paso elegido (0, 0.008, 0.016 ó 0.024 mm).

Para ejecutar los scripts en el programa, primero es necesario importarlos seleccionando la pestaña *Print Patterns* y hacer clic en el botón *Add Script* para subirlos al programa. Finalmente, para la impresión y ejecución de los comandos, en la pestaña *Print* se selecciona uno a uno el script que se desea ejecutar, se comprueba con el botón *Test* y se procede a imprimir mediante la función *Print*. (Figura 3.17) Este paso se repite para cada script o instrucción que se desee ejecutar en la máquina.

Figura 3.16 Ventanas del programa Jetlab para la subida y ejecución de los scripts.



Fuente de procedencia: Apartado 3. Jetlab Control Program
Tutorial Guide Versión 4.1.0 26 Abril 2013.

3.2.2. Microscopio óptico

El segundo equipo utilizado ha sido el microscopio óptico Leica® localizado en el laboratorio del departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación. Gracias a su elevada resolución, se han realizado capturas de imagen de las microcolumnas observándolas mediante un monitor conectado al mismo. Permitiendo trabajarlas para hallar los parámetros necesarios en el estudio.

Figura 3.17 Microscopio óptico



3.2.3. Software de tratamiento de imagen

Como tercer recurso, el software Image Pro Plus 4.1 ha permitido el tratamiento de estas imágenes gracias a sus herramientas de medición manuales y automáticas que incluyen áreas, perímetros, longitudes, redondez, ángulos, etc... Con esto, se ha logrado medir variables como: distancia entre centros, diámetro de las gotas y ángulos característicos entre otros.

3.3 Metodología desarrollada

En este apartado, se explican los procesos realizados en la medición de cada uno de los parámetros de estudio. Cada medida será sometida a un tratamiento estadístico donde se utilizarán expresiones y parámetros estudiados en cursos anteriores. El libro de fundamentos de metrología dimensional elaborado por el profesor Joaquin López ha servido de guía para estimar la expresión final de las medidas.

3.3.1. Organización del estudio

En el presente apartado, se muestra la planificación de los experimentos realizados en el desarrollo del trabajo:

A fin de obtener los parámetros necesarios se han realizado 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 ($200\ \mu\text{m}$) para no producirse ningún fenómeno de interacción entre gotas.

Teniendo en cuenta que la resolución del cabezal de impresión es de $8 \mu\text{m}$, 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 $24 \mu\text{m}$, 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 $64 \mu\text{m}$, se han depositado cuatro cordones horizontales de 15 gotas cada uno.

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

Tabla 3.5 Experimentos realizados y tipos de deposición

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

Tabla 3.6 Tipos y organización de las deposiciones efectuadas para cada placa.

PLACA	Deposición Individual	Paso (μm)	Nº Gotas	Parámetros a determinar:
	3	200	1	R_i θ_s
4	Columnas	Paso (μm)	Nº Gotas/columna	Parámetros a determinar:
	4	0	12	θ
		8		θ_i
		16		R_a
		24		$W_{0,máx}$
Cordones	Paso (μm)	Nº Gotas/cordón	Parámetros a determinar:	
5	32	15	R_a	
	48		$W_{óptimo}$	
	56			

3.3.2. Parámetros adimensionales

A fin de determinar las condiciones de impresión en este estudio, es necesario calcular el radio de la gota de salida de la boquilla y la velocidad de caída. Aplicando las expresiones recogidas en la tabla 3.2 y teniendo en cuenta la metodología para calcular el radio y la velocidad que se indica en apartados posteriores, se tiene:

Tabla 3.7 Resultados obtenidos en la medición

Fotografías tomadas entre 450-500 ns	
R_i	34,9 μm
R_i	32,7 μm
V_0	2,8 m/s

Tabla 3.8 Parámetros y condiciones características de impresión.

	We	Re	Oh	Z	Bo
Parámetros adimensionales	21,988	32,672	0,161	5,963	0,00102
Tiempo entre posiciones (s)	0,0005				
R_i (μm)	34,976				
V_0 (m/s)	2,8				

Teniendo en cuenta que $Bo \ll 1$, $1 < Z < 10$ y que el producto $We^{1/2} \cdot Re^{1/4} < 50$ se comprueba según los resultados obtenidos que encontramos en la región imprimible.

3.3.3. Expresión de las medidas realizadas.

3.3.3.1 Criterio de Chauvenet

Antes de proceder al tratamiento estadístico de las medidas para dar valores verdaderos con una determinada incertidumbre, se aplicará un criterio que permita filtrar los valores numéricos obtenidos, eliminando aquellos que se hayan obtenido de forma incorrecta debido a errores accidentales o por falta de precisión (como es en nuestro caso, al utilizar el software Image Pro Plus siempre se comete un cierto error humano al trazar medidas, ya que en función de la calidad de la imagen, se visualizan con mejor o peor claridad los contornos de las gotas.)

El criterio de rechazo de Chauvenet consiste en rechazar todas aquellas medidas cuya probabilidad de aparición sea inferior a $\alpha = \frac{1}{2n}$ siendo n el número de reiteraciones de la medida. Esto supone que se deben rechazar aquellas medidas cuya desviación a la media sea superior a un determinado valor (función de la desviación típica muestral).[16]

Por lo tanto el criterio se simplifica a la siguiente expresión:

$$|x_i - \bar{x}| > k(n)s; \tag{3.1}$$

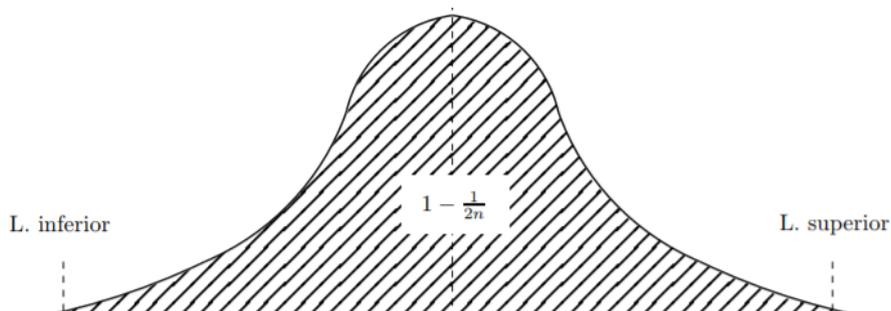
Donde $k(n) = k_{\alpha=1/2n}$ se obtiene a partir de la distribución normal (Figura 3.19) y cuyo valor, para facilitar la aplicación del criterio, se puede obtener de la tabla 3.9:

Tabla 3.9 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 de procedencia: Fundamentos Básicos de Metrología Dimensional. Joaquín López Rodríguez .Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación Universidad Politécnica de Cartagena, 2011.

Figura 3.18 Cálculo del coeficiente $k(n) = k_{\alpha=1/2n}$



Fuente de procedencia: Fundamentos Básicos de Metrología Dimensional. Joaquín López Rodríguez .Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación Universidad Politécnica de Cartagena, 2011.

Si se elimina el valor absoluto y se cambia la desigualdad se obtiene una expresión que permite dar un intervalo (Límite superior: $\bar{x} + k(n)s$ y límite inferior: $\bar{x} - k(n)s$) en el que debe encontrarse cualquier medición para ser aceptada.

$$\bar{x} - k(n)s \leq x_i \leq \bar{x} + k(n)s \quad (3.2)$$

Consideraciones a la hora de aplicar el criterio de Chauvenet:

1. El criterio se aplica de forma continuada hasta que no se rechace ninguna medida.
2. El número de rechazos que se aceptan en cada aplicación de la ecuación (2.9) es 1 si el número de reiteraciones de la medida es menor o igual a 10 y 2 si se encuentra entre 10 y 20. Si hubiesen más rechazos, la serie de medidas debe ser anulada y revisar el método empleado.

3.3.3.2 Medidas directas: Intervalos de confianza

Para determinar la expresión final de una medida directa, de la que se ha realizado un número n de experimentos, es necesario estimar la variabilidad o incertidumbre de la misma. Para ello, además de la media que estima la tendencia central de los datos: $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, se utiliza la desviación típica muestral $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$.

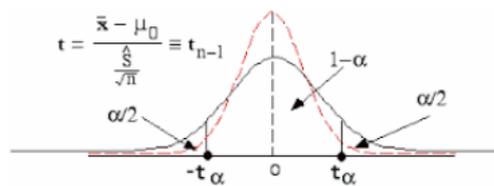
Con estos parámetros y para establecer con un denominado nivel de confianza $(1-\alpha)$ un intervalo donde se encuentre el verdadero valor de cualquiera de las variables medidas, se utilizarán los intervalos de confianza.

Por ejemplo, para una muestra de tamaño n , si se obtiene la media muestral \bar{x} , la probabilidad de que la media μ se encuentre en el intervalo $x_i \pm t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$ viene dada por la siguiente ecuación:

$$p\left(\bar{x} - t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}\right) \quad (3.3)$$

Donde el factor t es el coeficiente de una distribución de Student con $n-1$ grados de libertad y n el número de medidas realizadas.

Gráfica 3.1 Distribución T-Student con dos colas



Fuente de procedencia:

https://moodle2.unid.edu.mx/dts_cursos_md/lic/AE/E/S12/E12_Visual.pdf

En nuestro caso, como la curva de Student presenta dos colas, en las tablas se buscará el valor de $t_{\alpha/2}$. Para un determinado nivel de confianza $(1 - \alpha)$, el valor de $t_{\frac{\alpha}{2}}$ vendrá dado por la siguiente expresión:

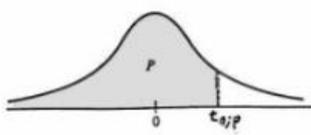
$$\bar{x} - k(n)s \leq x_i \leq \bar{x} + k(n)s \quad (3.4)$$

Por ejemplo, si se desea un nivel de confianza del 90% ($\alpha = 0,1$), el valor $t_{\alpha/2}$ a localizar en la columna de la tabla 8.2 será $t_{0,95}$.

Por tanto, las medidas finales serán expresadas en la forma: $\bar{x} \pm t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$ donde el factor t es el coeficiente de una distribución de Student con $n-1$ grados de libertad

Tabla 3.10 Valores de la t-Student según el número de experimentos realizados

Distribución t de Student



La tabla A.4 da distintos valores de la función de distribución en relación con el número de grados de libertad; concretamente, relaciona los valores p y $t_{n,p}$ que satisfacen $P(t_n \leq t_{n,p}) = p$.

n	$t_{0,55}$	$t_{0,60}$	$t_{0,70}$	$t_{0,80}$	$t_{0,90}$	$t_{0,95}$	$t_{0,975}$	$t_{0,99}$	$t_{0,995}$
1	0,1584	0,3249	0,7265	1,3764	3,0777	6,3138	12,7062	31,8205	63,6567
2	0,1421	0,2887	0,6172	1,0607	1,8856	2,9200	4,3027	6,9646	9,9248
3	0,1366	0,2767	0,5844	0,9785	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8409
4	0,1338	0,2707	0,5686	0,9410	1,5332	2,1318	2,7764	3,7469	4,6041
5	0,1322	0,2672	0,5594	0,9195	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321
6	0,1311	0,2648	0,5534	0,9057	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074
7	0,1303	0,2632	0,5491	0,8960	1,4149	1,8946	2,3646	2,9980	3,4995
8	0,1297	0,2619	0,5459	0,8889	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554
9	0,1293	0,2610	0,5435	0,8834	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498
10	0,1289	0,2602	0,5415	0,8791	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693
11	0,1286	0,2596	0,5399	0,8755	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058
12	0,1283	0,2590	0,5386	0,8726	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545
13	0,1281	0,2586	0,5375	0,8702	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123
14	0,1280	0,2582	0,5366	0,8681	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768
15	0,1278	0,2579	0,5357	0,8662	1,3406	1,7531	2,1314	2,6025	2,9467
16	0,1277	0,2576	0,5350	0,8647	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208
17	0,1276	0,2573	0,5344	0,8633	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982
18	0,1274	0,2571	0,5338	0,8620	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784
19	0,1274	0,2569	0,5333	0,8610	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609
20	0,1273	0,2567	0,5329	0,8600	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453
21	0,1272	0,2566	0,5325	0,8591	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314
22	0,1271	0,2564	0,5321	0,8583	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188
23	0,1271	0,2563	0,5317	0,8575	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073
24	0,1270	0,2562	0,5314	0,8569	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7969

Fuente de procedencia:

<https://estadisticaeninvestigacion.wordpress.com/distribucion-t-de-student/>

Así, las medidas directas como el radio inicial, distancias características de los casquetes esféricos y ángulos entre otros, serán expresadas finalmente en la forma: $\bar{x} \pm t_{\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$ donde el valor de n variará en función del número de experimentos realizados.

Expresión final de la medida directa:

$$\bar{x}_i \pm t_{\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

3.3.3.3 Medidas indirectas: Propagación de varianzas

Según el autor Joaquín López Rodríguez, en muchas ocasiones el resultado final de una medida depende de otras medidas efectuadas individualmente, como es el caso del radio inicial de la gota, que depende de los ángulos característicos y los radios de la primera y segunda gota.[16] Cuando se trabaje con medidas indirectas como ésta, se obtendrá a partir de las magnitudes de las que dependa del siguiente modo:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_q) \tag{ 3.5}$$

$$R_i = f(a, h) \tag{ 3.6}$$

Por tanto, es necesario conocer estimaciones del valor verdadero (μ_i) y de la varianza (σ_i) de cada una de las q magnitudes medidas, y eventualmente de las covarianzas σ_{ij} que puedan existir. Como se mencionó anteriormente se suponen los siguientes estimadores:

$$\hat{\mu}_i = \bar{x}_i$$

$$\hat{\sigma}_i = u_i^2$$

$$\hat{\sigma}_{ij} = u_{ij}$$

Siendo la hipótesis habitual la de aproximar linealmente la función f en el entorno del punto ($\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_q$). Así la incertidumbre típica de y, se obtiene componiendo apropiadamente las incertidumbres típicas de las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_q . Ésta incertidumbre típica combinada se denota como u_y .

La incertidumbre así determinada, puede multiplicarse por un factor superior a la unidad k, al objeto de obtener una incertidumbre total mayor, pero a condición de indicar siempre el valor de dicho factor.

$$U = ku \tag{ 3.7}$$

Al factor k que multiplica al estimador de la variabilidad se le suele denominar factor de recubrimiento o de incertidumbre y el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) recomienda que adopte el valor de 2 ó 3. En nuestro estudio se ha tomado el valor de $k = 3$.

Se puede demostrar que si todas las medidas (x_i) son independientes entre ellas, es decir $u_{ij} = 0$ para $i \neq j$, se obtiene la siguiente expresión:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^q \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)_{\bar{x}_i}^2 u_i^2 \quad (3.8)$$

Operando se llega a que en nuestro caso, para el radio inicial R_i , se tendría:

$$u_{Ri}^2 = \left(\frac{\partial R_i}{\partial a} \right)^2 u_a^2 + \left(\frac{\partial R_i}{\partial h} \right)^2 u_h^2 \quad (3.9)$$

Donde: $u_a^2 = \left(\frac{s_a}{k} \right)^2$ y $u_h^2 = \left(\frac{s_h}{k} \right)^2$ siendo $U = ku$ donde se ha tomado un factor $k=3$.

Así la expresión de una medida indirecta viene dada por la siguiente expresión:

Expresión final de la medida indirecta:

$$Y = \bar{Y} \pm U_y$$

3.3.4. Radio inicial de la gota.

Para el cálculo del radio inicial de la gota R_i pueden utilizarse tres métodos, uno más preciso que otro:

- El primer método es directo y consiste en realizar capturas con el programa Jet Lab durante la impresión, obteniendo imágenes de la gota de caída en las diferentes fases de su trayectoria. Posteriormente, con el uso del software de tratamiento de imagen Image Pro Plus se obtiene directamente el radio inicial de la gota de caída gracias a la función de interpolación de círculos con 6 puntos arbitrarios de la que dispone el programa. Este procedimiento proporciona valores del radio aproximados, ya que las capturas obtenidas se muestran pixeladas al ampliarse, por lo que los puntos que se toman de la circunferencia no son del todo precisos.

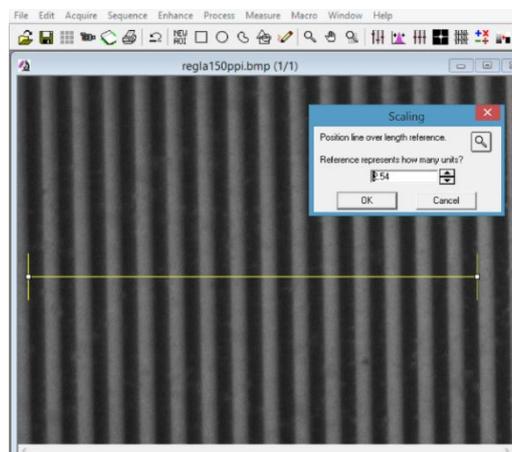
-La segunda forma es una medida indirecta del radio inicial que se desarrolla en el Capítulo 5, a partir de imágenes de una gota ya solidificada sobre el sustrato y con forma de casquete esférico. Se realizaron deposiciones de 3 gotas consecutivas separadas 200 μm . Estas deposiciones se llevaron al microscopio Leica del Departamento de Materiales, proporcionando imágenes con una resolución mucho mayor para ser tratadas más tarde, por el software Image Pro Plus.

-El tercer método se lleva a cabo con la información proporcionada por dos gotas consecutivas de la columna mediante una fórmula que se desarrolla al final de este apartado.

3.3.4.1 Primer método

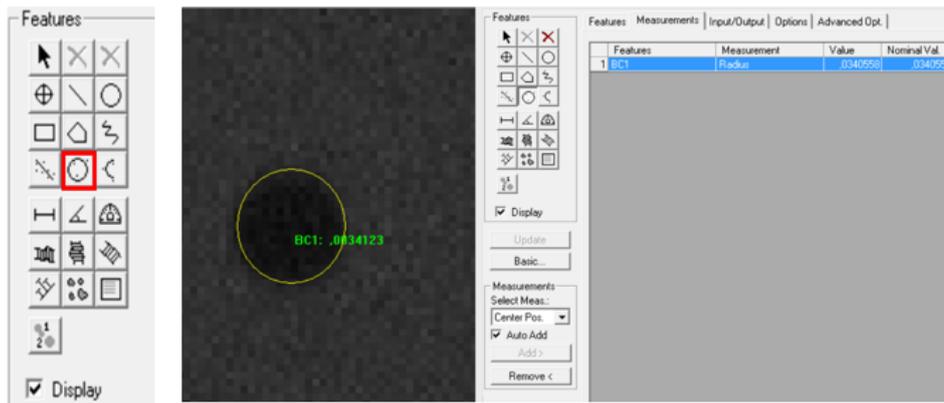
En primer lugar, se realiza la calibración con una imagen que sirve de patrón (Figura 3.20), donde la regla tiene 150 líneas por pulgada (1 pulgada= 25,4 mm). Por tanto a 15 líneas se le asignarán 2,54 mm. Para ello, se crea un nuevo espacio de calibración seleccionando *Measure –Calibration -Space Wizard Calibration* y en la opción de *Draw Reference Line* se dibuja una recta de referencia que ocupe 15 líneas negras.

Figura 3.19 Proceso de calibración en el programa mediante imagen patrón



Para medir el radio de la gota, se importa al programa la captura realizada de la gota y se selecciona el espacio anteriormente calibrado. Una vez hecho esto, haciendo clic en *Measurements* y seleccionando el icono de interpolación por puntos de la superficie del círculo (marcado con el cuadrado rojo en la Figura 3.21) se obtiene el radio de la gota en la ventana del programa.

Figura 3.20 Menú de iconos para realizar distintas medidas en el programa

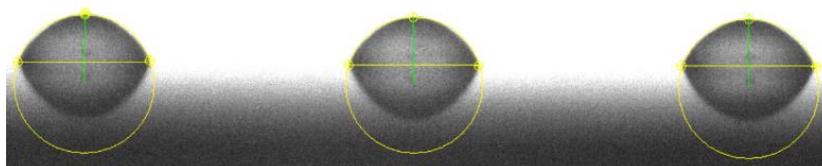


3.3.4.2 Segundo método

A partir de las imágenes obtenidas del microscopio, se genera un nuevo espacio de calibración *Space Wizard Calibration* con la escala en la que se haya tomado la captura. En este caso Figura 3.22, la resolución es de 200 μm por lo que seleccionando 1 μm como unidad de medida, se toma una línea de referencia que abarque la línea patrón debajo del recuadro blanco y se le asigna una longitud de 200 μm . A continuación, se selecciona el espacio generado con *Select Spacial* y se procede a medir.

Figura 3.21 Medida de 3gotas sobre el sustrato con escala de 200 micras.

100 μm



Mediante la imagen obtenida gracias al microscopio óptico y con la ayuda del software se ha medido el ancho a y la altura del casquete esférico h_c formado al depositarse la gota sobre el sustrato.

Así, el volumen del casquete esférico viene dado por la ecuación:

$$V_{\text{casquete}} = \frac{\pi h}{6} (3a^2 + h_c^2) \quad (3.10)$$

Y el volumen de una gota de caída R_i supuesta perfectamente esférica resulta:

$$V_i = \frac{4\pi}{3} R_i^3 \quad (3.11)$$

Por el principio de conservación de la masa, el volumen de la gota inicial de caída ha de ser igual al volumen depositado posteriormente en forma de tapa esférica sobre el sustrato. Igualando las dos expresiones (3.10) y (3.11) se obtiene el radio R_i de la gota inicial:

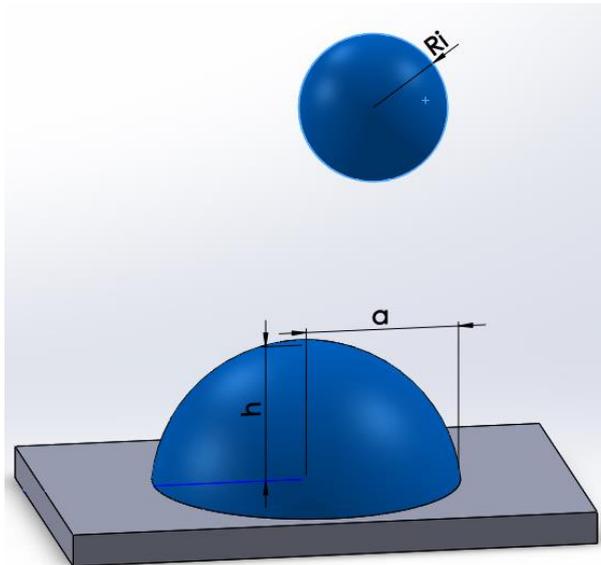
$$\frac{4\pi}{3} R_i^3 = \frac{\pi h_c}{6} (3a^2 + h_c^2) \quad (3.12)$$

$$\frac{4\pi}{3} R_i^3 = \frac{3\pi h_c}{4 \cdot 6} (3a^2 + h_c^2) \quad (3.13)$$

Sustituyendo la ecuación 2, y eliminando términos se determina el radio inicial de la gota:

$$R_i = \frac{\sqrt[3]{h_c(3a^2 + h_c^2)}}{2} \quad (3.14)$$

Figura 3.22 Medida de los parámetros de una gota solidificada sobre el sustrato



3.3.4.3 Tercer método

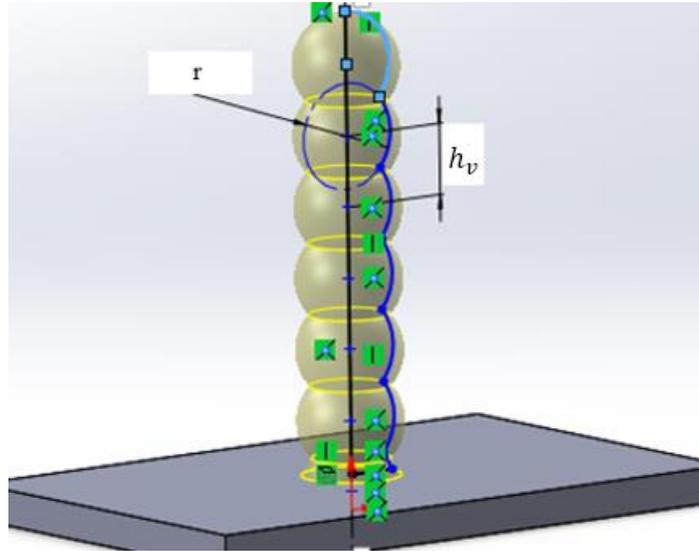
A partir de las imágenes de una columna y con el uso de Image Pro Plus, se hallan los parámetros característicos del radio y la distancia entre centros de dos gotas, que según el modelo teórico han de mantenerse constantes. En la realidad ocurre un fenómeno transitorio desde la primera hasta la quinta gota aproximadamente, donde esto no se cumple. Por ello, se han tomado medidas desde la quinta gota hasta la penúltima de la columna (la última de las gotas no se encuentra en las mismas condiciones que las demás).

Finalmente, el radio de la gota de caída se obtiene a partir de la siguiente fórmula proporcionada por el profesor:

$$R_i = \frac{1}{2} \left(6r^2 - \frac{1}{2} h_v^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.15)$$

Donde r es el radio de cada gota que conforma la columna y h_v la distancia vertical entre centros de la penúltima y la anterior a ella.

Figura 3.23 Medida del radio y la distancia entre centros de las gotas



3.3.5. Velocidad de caída

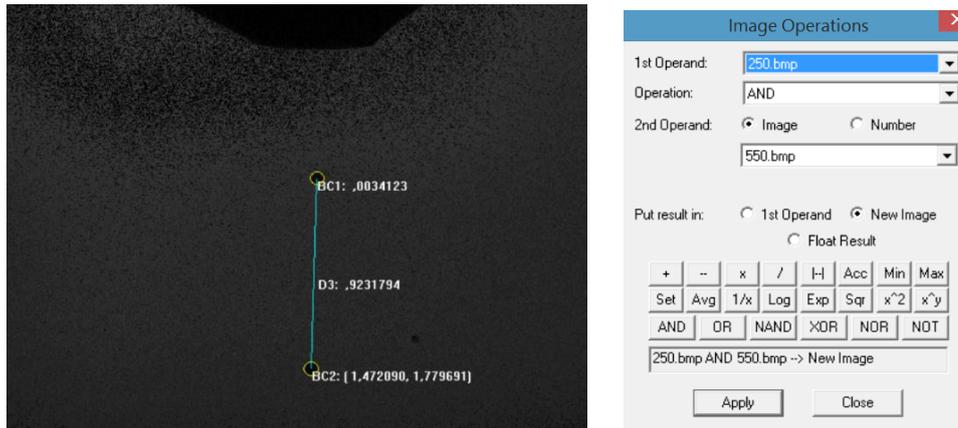
El único método para el cálculo de la velocidad es la toma de capturas de la gota en diferentes intervalos de tiempo, siendo la cámara de la impresora JetLab la única que lo permite. Una vez calibrada la máquina y con el tamaño de gota deseada, mediante la función *Strobe Delay* del programa JetLab se han tomado fotografías en distintos instantes de tiempo (250, 300, 350, 400, 450 y 500 μ s).

3.3.5.1 Procedimiento

Con ayuda del programa Image Pro Plus® se han superpuesto las imágenes correspondientes a distintos intervalos de tiempo y se ha medido la distancia entre los centros de las gotas.

Para ello, exportando las imágenes correspondientes a 250 y 550 μ s, (ya que a mayor diferencia de tiempos entre las capturas, se obtienen resultados más aproximados), y clicando en *Process* en el menú de opciones de *Image Pro Plus* se selecciona la casilla *Operations*, la cual nos dirige a una ventana en la que se nos permite mediante la función AND superponer dos imágenes.

Figura 3.24 Superposición de imágenes de la trayectoria de caída de la gota



Una vez realizada la calibración y seleccionado el espacio de medida, se llevan a cabo varias medidas de las distancias entre centros con el uso de las herramientas del programa: interpolación de círculos y distancia de centro a centro.

Conociendo la distancia entre gotas y el tiempo transcurrido entre ambas, la velocidad inicial o de caída resulta inmediata sabiendo que la velocidad es espacio entre tiempo transcurrido. En el capítulo 5, se muestran los resultados obtenidos para varios ensayos.

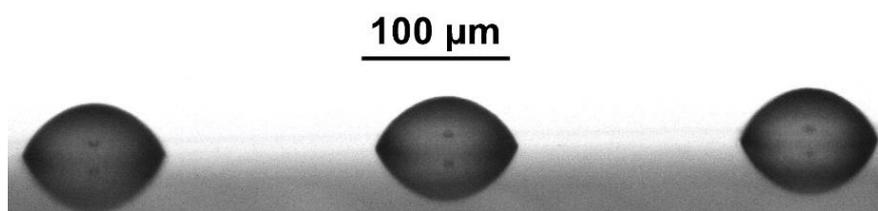
3.3.6. Ángulos característicos

Con el fin de obtener resultados experimentales de los ángulos característicos, se han realizado varias deposiciones en forma de columnas verticales e inclinadas. Éstas han sido observadas en el microscopio Leica® del laboratorio, obteniendo imágenes de alta resolución para su posterior tratamiento con el software de imagen utilizado.

3.3.6.1 Ángulo de solidificación

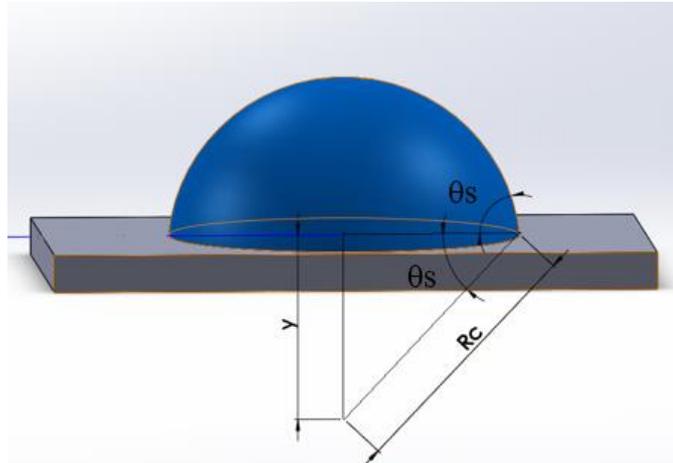
-Para el cálculo del ángulo de solidificación se toman varias fotografías de tres gotas separadas $200 \mu\text{m}$ que se depositaron sobre el sustrato en cada una de las placas

Figura 3.25 Fotografía de 3 gotas depositadas sobre el sustrato con una escala de 100 micras.



A partir del análisis de las imágenes de la columna proporcionadas por el microscopio, con el uso del software SW Image Pro Plus® se generan círculos a partir de 6 puntos de la superficie de la gota y se calcula la distancia entre el centro de la gota y el sustrato y .

Figura 3.26 Esquema para la obtención del ángulo de solidificación



Una vez calculado el radio de solidificación R_s por la ecuación aplicando relaciones trigonométricas fundamentales:

$$\cos\theta_s = \frac{|y|}{R_c} \quad (3.16)$$

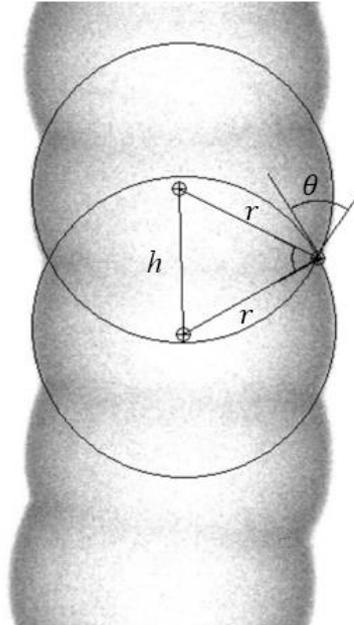
Se halla el ángulo de contacto de la gota con el sustrato

$$\theta_s = \arccos\left(\frac{|y|}{R_c}\right) \quad (3.17)$$

3.3.6.2 Ángulo de contacto entre gotas

A partir de las fotografías tomadas de las placas, se midió mediante el software image pro-plus los radios de dos gotas consecutivas de la columna y la distancia entre centros y según muestra la figura 3.27:

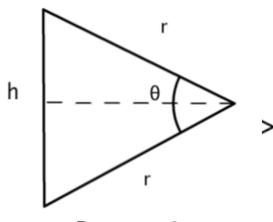
Figura 3.27 Medida del ángulo de contacto entre gotas



1º Método

Observando la figura se llega a la conclusión que el ángulo entre gotas resulta igual que el ángulo existente entre las aristas .Es decir:

Figura 3.28 Triángulo para hallar el ángulo entre gotas



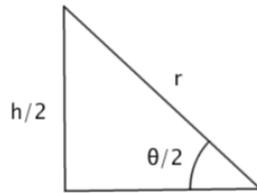
Por tanto, si se divide este triángulo por la mitad, resulta sencillo determinar el valor del ángulo, ya que prácticamente los radios de las gotas de la columna son iguales excepto la 1º gota, que es más grande por estar en contacto con el sustrato.

Así, el ángulo de contacto entre gotas viene dado por la siguiente expresión:

Figura 3.29 Triangulo 1º método

$$\text{sen} \frac{\theta}{2} = \frac{h}{2R_j}$$

(3.18)



Así, el ángulo de contacto entre gotas resulta:

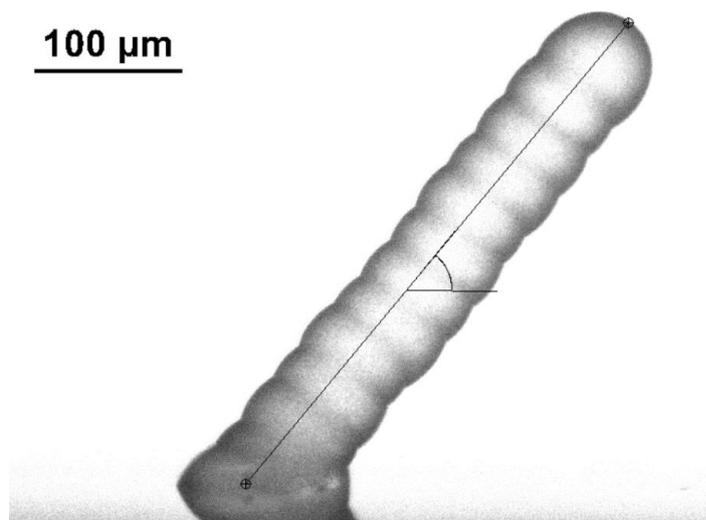
$$\theta = 2 \arcsen \left(\frac{h}{2r} \right)$$

(3.19)

3.3.6.3 Ángulo de inclinación de la columna

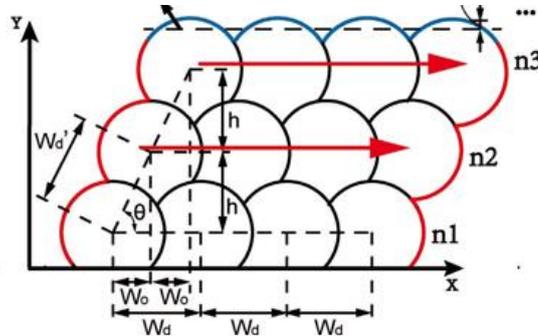
El ángulo de inclinación es un parámetro medido desde el eje horizontal o sustrato y viene determinado por el paso horizontal entre gotas y la distancia vertical entre centros de gotas sucesivas.

Figura 3.30 Angulo de inclinación de la columna



Según estudios realizados por Le-Hua Qi, Jun Luo y otros [7] representan la inclinación de la columna como:

Figura 3.31 Angulo de inclinación frente al paso y la altura vertical



Fuente de procedencia: Le Hua Qi, Song-yi Zhong. "Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture,"[7]

Donde h se ha nombrado en este estudio como h_v y W_0 , corresponde al paso horizontal.

Aplicando trigonometría se llega a que el ángulo resulta:

$$\tan\theta = \frac{h_v}{W_0} \tag{3.20}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_v}{W_0}\right) \tag{3.21}$$

3.3.7. Desplazamiento o paso máximo

Para determinar el paso máximo se aplicaran los modelos teóricos definidos en el Capítulo 4. Experimentalmente, con las imágenes obtenidas en el laboratorio se deducirán los rangos o valores a partir de los cuales la deposición pasa a ser horizontal.

Cabe destacar a su vez, que en la realidad existen fenómenos transitorios entre la segunda, tercer y cuarta gota que no son tenidos en cuenta en el modelo teórico y ocasionan una morfología inclinada con fusión y solapamiento entre las primeras gotas a partir de un paso de $16 \mu\text{m}$ en adelante.

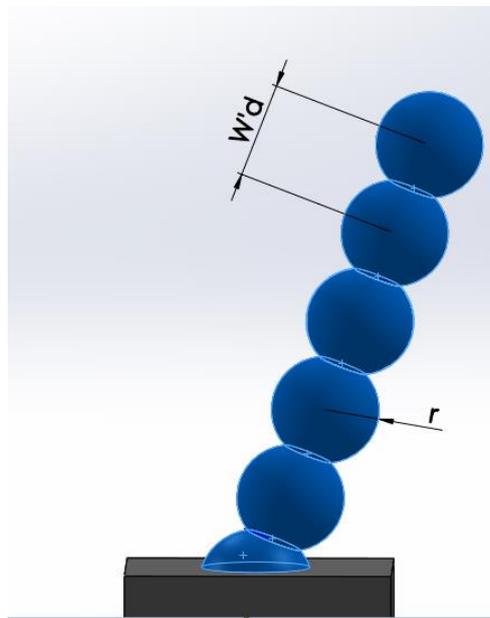
3.3.8. Rugosidad experimental

Con el objeto de realizar una comparación con la rugosidad teórica obtenida a partir de los modelos que se exponen en el estudio teórico, y debido a que no se pudo utilizar el rugosímetro disponible en el laboratorio, se ha utilizado en su lugar, una expresión de la rugosidad aritmética media en función de los parámetros medidos experimentalmente:

$$R_a = \frac{W'_d{}^2}{\frac{5}{3^2} \cdot 2 \cdot r}$$

(3.22)

Figura 3.32 Medida de la distancia entre centros y el radio de las gotas



Donde W'_d se corresponde con la distancia entre centros de gotas sucesivas medido en la dirección de la columna y r hace referencia al radio de cada una de las gotas de la columna. Así, con las imágenes obtenidas del microscopio y el software de tratamiento de imagen se medirá para cada placa, cada uno de los parámetros.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO TEÓRICO

En esta sección, se abordarán los modelos geométricos que se han utilizado para el cálculo teórico de los parámetros relevantes en el estudio. Haciendo uso de trabajos y artículos previamente publicados por diferentes autores que explican el comportamiento de la gota y sus parámetros característicos en este tipo de deposiciones. Permitiendo posteriormente, comprobar la validez de los mismos en los materiales y condiciones utilizados en este estudio, que difieren de las condiciones para los que fueron aplicados. Así, las referencias más utilizadas durante el desarrollo del trabajo han sido:

-Para el cálculo del radio de la primera gota solidificada R_c , el radio de la base R_b , el radio de las gotas de la columna, r , y la distancia entre centros de las mismas, h , se ha hecho uso de los estudios recogidos en “*Precise Deposition of Molten Microdrops: The Physics of Digital Microfabrication*” publicados en 1994 y deducidos por los autores F. & Sonin, A. A.

-Para la determinación teórica del paso máximo distancia horizontal entre centros de gotas sucesivas se ha utilizado un modelo geométrico desarrollado por Félix Faura Mateu, que estudia la geometría de las dos primeras gotas de la columna.

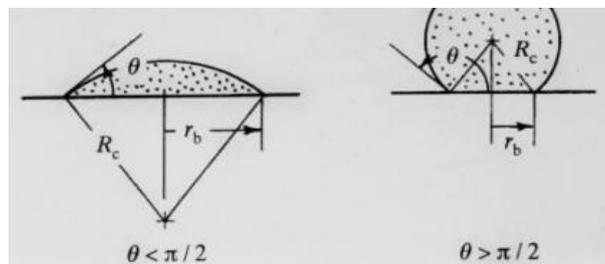
-Para el cálculo de la rugosidad lateral de la columna se han usado los modelos desarrollados en el artículo “Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture authors” [7] publicado en 2015 por los autores Le-Hua Qi, Song-yi-Zhong y otros.

4.1 Estudio del radio de la gota depositada sobre el sustrato

Según F. Gao y A. A. Sonin [5], la forma que adopta la gota depositada sobre el sustrato depende en gran parte ángulo de solidificación θ_s , el cual está relacionado con los efectos térmicos entre la gota y el sustrato. Mientras la propagación se complete mucho más rápido que la solidificación, el ángulo de solidificación para materiales fundidos depende principalmente del subenfriamiento del sustrato y tiende a disminuir a medida que disminuye el subenfriamiento del objetivo.

En la figura 4.1 se distinguen dos formas de gota solidificada en función del ángulo de solidificación θ_s :

Figura 4.1 Radios de la gota solidificada sobre el sustrato y radio de la base o superficie de contacto



Fuente de procedencia: Precise Deposition of Molten Microdrops: The Physics of Digital Microfabrication. (1994).

Donde R_c , r_b y θ se corresponde con los parámetros de radio de solidificación R_1 , radio de la base, R_b y ángulo de solidificación θ_s , de la tabla de nomenclaturas.

Si una gota de radio inicial conocido R_i , se deposita como una tapa esférica con un ángulo θ_s , la conservación de volumen permite obtener el radio de solidificación igualando el volumen de la esfera de caída con el de la gota solidificada en forma de casquete.

El volumen de una esfera se define como:

$$V_i = \frac{4\pi}{3} R_i^3 \quad (4.1)$$

Y el volumen de un casquete esférico viene dado por la expresión:

$$V_{casquete} = \frac{\pi h}{6} (3R_b^2 + h_c^2) \quad (4.2)$$

Aplicando las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\cos\theta_s = \frac{(R_c - h_c)}{R_c} \quad (4.3)$$

Y la correspondiente que relaciona R_c y R_b :

$$\sen\theta_s = \frac{R_b}{R_c} \quad (4.4)$$

Se obtiene que:

$$h_c = R_c \cdot (1 - \cos\theta_s) \quad (4.5)$$

$$R_b = R_c \cdot \sen\theta_s \quad (4.6)$$

Igualando las ecuaciones 4.1 y 4.2 y sustituyendo 4.5 y 4.6:

$$\frac{4\pi}{3} R_i^3 = \frac{\pi R_c \cdot (1 - \cos\theta_s)}{6} (3 \cdot (R_c^2 (\sen\theta_s)^2) + R_c^2 \cdot (1 - \cos\theta_s)^2)$$

Teniendo en cuenta que $(\cos\theta)^2 + (\sen\theta)^2 = 1$ y sacando factor común R_c^3 :

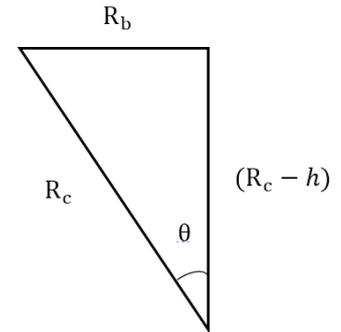
$$R_i^3 = R_c^3 \cdot (1 - \cos\theta_s)(3 - 3(\cos\theta_s)^2 + 1 + (\cos\theta_s)^2 - 2\cos\theta_s)$$

$$R_i^3 = R_c^3 \cdot (1 - \cos\theta)(-2 \cdot (\cos\theta)^2 - 2\cos\theta_s + 4)$$

Sacando (-2) factor común y resolviendo la ecuación de segundo grado $x^2 + x - 2 = 0$ donde $x = \cos\theta$ y que puede dejarse en función de sus raíces en la forma $(x - 1)(x + 2)$ se tiene:

$$R_i^3 = (-2) \cdot R_c^3 \cdot (1 - \cos\theta_s) \cdot (\cos\theta_s - 1) \cdot (\cos\theta_s + 2)$$

Figura 4.2 Triángulo para el cálculo del radio de solidificación



Cambiando el signo del paréntesis y agrupando términos:

$$R_i^3 = 2 \cdot R_c^3 \cdot (1 - \cos\theta_s)^2 \cdot (2 + \cos\theta_s)$$

Operando, se llega a la relación entre el radio de la gota depositada y el radio inicial de caída en función del ángulo de solidificación:

$$\frac{R_c}{R_i} = \left(\frac{4}{(1 - \cos\theta_s)^2(2 + \cos\theta_s)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.7)$$

Operando de la misma forma y despejando en función del radio de la base R_b , se llega a una expresión similar:

$$\frac{R_b}{R_i} = \left(\frac{4 \cdot (\sin\theta_s)^3}{(1 - \cos\theta_s)^2(2 + \cos\theta_s)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.8)$$

Las ecuaciones 4.7 y 4.8 son válidas tanto si el ángulo que forma la gota con el sustrato es mayor que 90° ($\theta_s < \frac{\pi}{2}$) como si es mayor $\theta_s > \frac{\pi}{2}$ según la figura 4.1.

4.2 Estudio del radio de las gotas que conforman la columna

F.Gao y A.A Sonin [5] afirmaron que para el modo de trabajo gota sobre gota o *drop-on-drop* y a bajas frecuencias de deposición, el pilar vertical de gotas depositadas dependía principalmente de tres parámetros:

- El radio de las gotas medido en el punto máximo r y supuesto constante e idéntico para cada una de las gotas que conforman la columna desde la segunda hasta la última de ellas.
- La distancia h entre centros de gotas consecutivas y que se agrega al pilar por cada gota depositada.
- La frecuencia máxima a la que la deposición es independiente de la frecuencia y los efectos gravitacionales son despreciables

El modelo teórico para obtener el radio r de las gotas que conforman la columna y la altura h que se va agregando al pilar, se fundamenta el principio de conservación de la masa. Así, el volumen de la gota de caída se iguala con el volumen de una gota depositada sobre la columna.

La gota de caída se modela como una esfera de radio R_i , y su volumen resulta:

$$V_i = \frac{4\pi}{3} R_i^3 \quad (4.9)$$

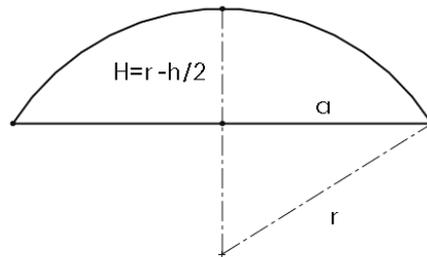
La gota que va depositándose sobre la columna, cuyo volumen es la diferencia entre el volumen de una gota esférica de radio r perteneciente a la gota actual, y el volumen del casquete de la gota inmediatamente anterior que invade la gota reciente como muestra la figura 4.3.

El casquete depositado final puede obtenerse siguiendo la expresión:

$$V_{depositado} = V_{esfera} - 2V_{casquete anterior} = \frac{4\pi}{3}r^3 - \frac{\pi H}{6}(3a^2 + H^2) \quad (4.10)$$

Donde el segundo término de la ecuación se corresponde con el volumen de un casquete esférico cualquiera de altura H y anchura a . (Figura 4.3)

Figura 4.3 Valores característicos del casquete esférico



Igualando volúmenes, se tiene:

$$\frac{4\pi R_i^3}{3} = \frac{4\pi r^3}{3} - 2 \cdot \frac{\pi H}{6}(3a^2 + H^2) \quad (4.11)$$

El ángulo entre gotas consecutivas formado por las líneas tangentes a la superficie de cada gota, resulta igual al formado en las direcciones perpendiculares a cada línea respectivamente, conformando el triángulo de la figura 4.4.

Si se divide el triángulo por la mitad y se aplica el teorema de Pitágoras :

$$r^2 = a^2 + \frac{h^2}{4}$$

Por trigonometría, se conoce también que:

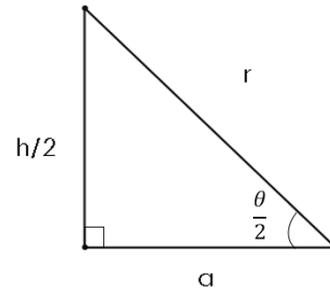
$$\text{sen} \frac{\theta}{2} = \frac{h}{2r}$$

De donde se deduce que:

$$a^2 = r^2 - \frac{h^2}{4} \quad (4.12)$$

$$h = 2r \text{sen} \frac{\theta}{2} \quad (4.13)$$

Figura 4.4 Triángulo característico para el cálculo del radio de las gotas de la columna



Siendo θ , el ángulo existente entre gotas consecutivas de la columna.

Sustituyendo H en la ecuación 4.11:

$$\frac{4\pi R_i^3}{3} = \frac{4\pi r^3}{3} - \frac{\pi}{3} \left(r - \frac{h}{2} \right) \cdot \left[3 \left(r^2 - \frac{h^2}{4} \right) + r^2 - \frac{2hr}{2} + \frac{h^2}{4} \right]$$

Desarrollando términos, se obtiene la siguiente expresión:

$$4R_i^3 = 4r^3 - \left(r - \frac{h}{2} \right) \cdot \left[3r^2 - \frac{3h^2}{4} + r^2 - rh + \frac{h^2}{4} \right]$$

Operando:

$$4R_i^3 = 4r^3 - \left(r - \frac{h}{2} \right) \cdot \left[4r^2 - rh - \frac{h^2}{2} \right] = 4r^3 - \left[4r^3 - r^2h - 2r^2h + \frac{h^3}{4} \right] =$$

Sustituyendo los valores de a^2 y h , anteriormente deducidos y simplificando:

$$4R_i^3 = 4r^3 - \left(4r^3 - 6r^3 \text{sen} \frac{\theta}{2} + 2r^3 \text{sen} \frac{\theta}{2} \right) = 2r^3 \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \left(3 - \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right)^2 \right)$$

Reagrupando los términos, se llega finalmente a:

$$\frac{r}{R_i} = \left(\frac{2}{\text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \left(3 - \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right)^2 \right)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.14)$$

Siendo esta expresión aquella que permite obtener el radio de cualquier gota de la columna (a excepción de la primera) en función del ángulo entre gotas consecutivas de la columna y el radio de la gota que cae R_i .

Despejando ahora de la expresión trigonométrica el radio r para dejar todo en función de la distancia entre centros h :

$$r = \frac{h}{2 \text{sen} \frac{\theta}{2}} \quad (4.15)$$

Dejando todo en función de r en las ecuaciones originales:

$$\frac{r^3}{R_i^3} = \frac{h^3}{8 \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right)^3 R_i} = \left(\frac{2 \cdot 8 \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right)^{32}}{\left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right) \cdot \left(3 - \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right)^2 \right)} \right)$$

Y sacando factores:

$$\frac{h^3}{R_i^3} = \left(\frac{2 \cdot 2^3 \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right)^2}{\left(3 - \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right)^2 \right)} \right)$$

Reagrupando términos se llega la expresión 4.16, que permite obtener la altura añadida al pilar por cada gota depositada:

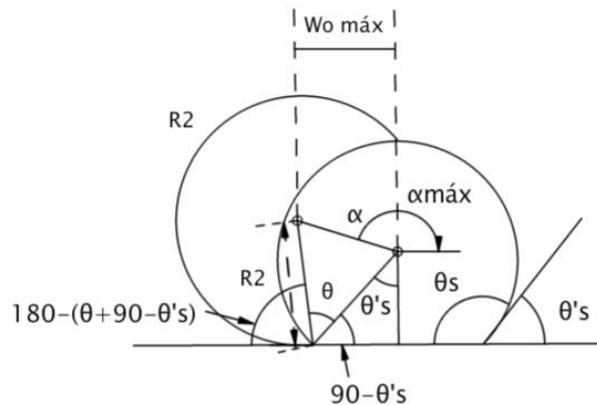
$$\frac{h}{R_i} = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right)^2}{\left(3 - \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right)^2 \right)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.16)$$

4.3 Estudio del desplazamiento máximo entre gotas sucesivas

En el modo de trabajo de este estudio, esto es, gota sobre gota (*drop-on-drop*), existe un paso o desplazamiento entre gotas consecutivas que no puede superar un cierto valor. Es decir, la distancia horizontal W_0 entre gotas consecutivas programada durante la deposición ha de cumplir: $W_0 < W_{0máx}$. Si esto no se cumple, la gota superior de las dos estudiadas, llegaría a tocar el sustrato y la columna dejaría de ser vertical para transformarse en una deposición horizontal.

Según el estudio desarrollado por Félix Faura, el modelo teórico para el cálculo de este valor se muestra en la Figura 4.5, donde se ha representado la primera y segunda gota de la columna. Hay que tener en cuenta que cada una de ellas presenta condiciones distintas: la primera gota de radio R_1 , es depositada sobre una superficie plana (sustrato) y depende del ángulo de solidificación θ_s y del radio de la gota de caída R_i . Por su parte, la segunda gota cae sobre otra anterior a ella y su geometría se verá influenciada por el ángulo entre gotas θ y el radio inicial R_i .

Figura 4.5 Esquema de las dos primeras gotas de una columna con la condición de que la superior llegue a tocar el sustrato



De los ángulos que intervienen puede deducirse que:

$$\theta'_s = 180 - \theta_s \rightarrow \text{sen } \theta'_s = \text{sen } \theta_s \quad (4.17)$$

$$\text{sen } (\theta'_s - \theta) = \text{sen } (180 - \theta_s - \theta) = \text{sen}[180 - (\theta_s + \theta)] = \text{sen } (\theta_s + \theta) \quad (4.18)$$

$$\alpha_{máx} = \text{arcos } \frac{W_{0máx}}{\alpha} \quad (4.19)$$

A su vez, el desplazamiento horizontal entre gotas durante la deposición se determina mediante la siguiente expresión:

$$W_{0m\acute{a}x} = R_1 \cdot \text{sen } \theta'_s - R_2 \cdot \text{sen}(\theta_s + \theta) \quad (4.20)$$

Sustituyendo, se tiene:

$$W_{0m\acute{a}x} = R_1 \cdot \text{sen } \theta'_s - R_2 \cdot \cos(\theta + 90 - \theta'_s) = R_1 \cdot \text{sen } \theta'_s - R_2 \cdot \cos[90 - (\theta'_s - \theta)] = R_1 \cdot \text{sen } \theta'_s - R_2 \cdot \text{sen}(\theta'_s - \theta)$$

Otra forma resulta:

$$W_{0m\acute{a}x} = R_1 \cdot \text{sen } \theta'_s + R_2 \cdot \cos(180 - (\theta + 90 - \theta'_s)) = R_1 \cdot \text{sen } \theta'_s + R_2 \cdot \cos[90 - (\theta)] = R_1 \cdot \text{sen } \theta'_s + R_2 \cdot \text{sen}(\theta - \theta'_s) = R_1 \cdot \text{sen } \theta'_s - R_2 \cdot \text{sen}(\theta'_s - \theta)$$

Aplicando las relaciones entre ángulos expuesta anteriormente:

$$W_{0m\acute{a}x} = R_1 \cdot \text{sen } \theta_s - R_2 \cdot \text{sen}(\theta_s + \theta) \quad (4.21)$$

4.4 Estudio de la rugosidad superficial de la columna

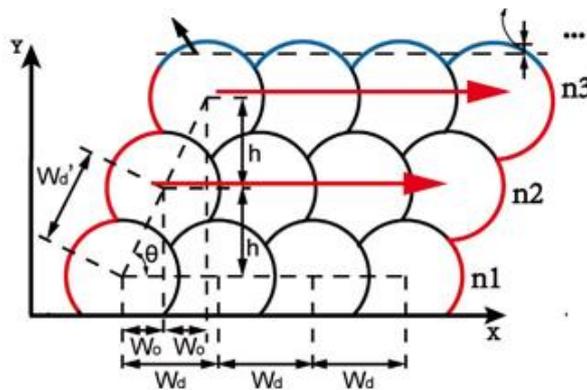
Los autores Qi L. y Chao propusieron dos modelos geométricos para predecir la rugosidad de la superficie superior y lateral. En el caso que nos concierne, es decir, la deposición vertical de gotas, se corresponde con el modelo de la rugosidad en la superficie lateral. Como se mostrará posteriormente, los factores principales que influyen en la rugosidad superficial son:

- El paso W_0 , o distancia horizontal entre centros de las gotas.
- El ángulo θ_i de inclinación de la columna vertical.

Con el objetivo de medir la rugosidad superficial de la columna utilizaron la altura media aritmética R_a como parámetro para caracterizar la calidad de la superficie. Ésta se define como la desviación absoluta media de las irregularidades de la rugosidad desde la línea de referencia que se representa por la línea de mínimos cuadrados del perfil (Figura 7), resultando:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad (4.22)$$

Figura 4.6 Perfil geométrico de la rugosidad lateral en columnas vertical- inclinadas.



Fuente de procedencia: Le Hua Qi, Song-yi Zhong. “Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture,” [7]

La línea de mínimos cuadrados se define como aquella cuya forma es la del perfil geométrico y que lo divide de forma que dentro de la longitud básica, la suma de los cuadrados de las desviaciones a partir de esa línea es mínima.

Además, el ángulo de la estratificación θ , en nuestro caso ángulo de inclinación θ_i , se tomó como otro parámetro de evaluación para describir la superficie lateral, siendo éste el ángulo entre la línea de mínimos cuadrados y el sustrato.

Para desarrollar el modelo, se asumió lo siguiente:

1. La forma de la gota depositada se considera como una corona esférica y el perfil de sección transversal simétrico.
2. Mientras que los parámetros del proceso fuesen los mismos, las gotas depositadas eran uniformes.
3. El perfil de la gota anterior se mantuvo sin cambios mientras que la gota posterior se depositó.

Llamando r al radio del arco y θ_s al ángulo de solidificación, el perfil se define por:

$$f(x) = \sqrt{r^2 - x^2} + r \operatorname{sen}\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.23)$$

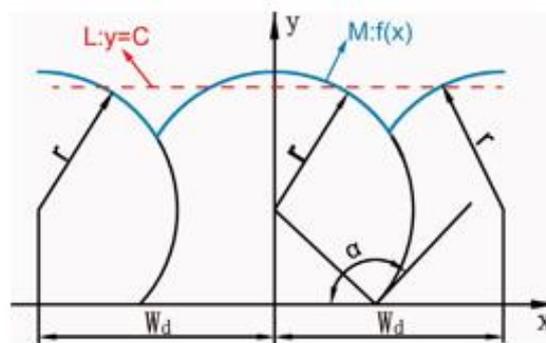
Donde $f(x)$ modela el perfil superior de las gotas sobre el sustrato representado por una secuencia periódica de arcos de circunferencia coloreados en azul. (Figura 4.6)

Aplicando el desarrollo en serie de Taylor limitada al término de segundo orden, la ecuación (4.23) se aproxima:

$$f(x) \cong r - \frac{x^2}{2r} + r \operatorname{sen}\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.24)$$

Como muestra la figura 4.7, la línea de mínimos cuadrados $L: y = C$ se ha representado en color rojo y $Q(C)$ se define como la suma cuadrática de las distancias desde el perfil a la línea L de mínimos cuadrados, esto es, la suma en valor absoluto de las áreas positivas y negativas medidas en un arco de circunferencia (desde $-\frac{W_d}{2}$ a $\frac{W_d}{2}$).

Figura 4.7 Línea de mínimos cuadrados para la determinación de la rugosidad



Fuente de procedencia: Le Hua Qi, Song-yi Zhong.
 “Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture.” [7]

Esta suma cuadrática viene dada por la siguiente integral:

$$C = \int_{-\frac{W_d}{2}}^{\frac{W_d}{2}} (f(x) - C^2) dx \quad (4.25)$$

Donde C puede calcularse sabiendo $Q(C)$ tomaría el valor mínimo cuando $\frac{\partial Q}{\partial C}=0$:

$$C = \frac{1}{W_d} \int_{-\frac{W_d}{2}}^{\frac{W_d}{2}} f(x) dx = r + r \operatorname{sen} \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{W_d^2}{24r} \quad (4.26)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación 4.22, la altura media aritmética viene dada por:

$$R_a = \frac{1}{W_d} \int_{-\frac{W_d}{2}}^{\frac{W_d}{2}} |f(x) - C| dx = \int_{-\frac{W_d}{2}}^{\frac{W_d}{2}} \left| -\frac{x^2}{2r} + \frac{W_d^2}{24r} \right| dx = \frac{W_d^2}{18\sqrt{3}r} \quad (4.27)$$

Donde r es definido en la referencia como el radio de la gota solidificada y según la tabla de nomenclaturas de este trabajo se ha designado como R_c .

El valor de R_c , anteriormente obtenido, venía dado en función del radio inicial de la gota de caída R_i :

$$R_c = R_i \cdot \left(\frac{4}{(1 - \cos \theta_s)^2 (2 + \cos \theta_s)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.28)$$

Sustituyendo la ecuación 4.27 en la expresión anterior de la rugosidad en el perfil de la superficie lateral, la rugosidad finalmente resulta:

$$R_a = \frac{(W_d')^2}{9\sqrt{3} \cdot 2 \cdot R_i \left[\frac{4}{(1 - \cos \theta_s)^2 \cdot (2 + \cos \theta_s)} \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (4.29)$$

Donde W_d' es la distancia entre los centros de una gota superior e inferior medido en la dirección de la columna y que corresponde a la suma vectorial de:

$$W_d' = W_0 + h \quad (4.30)$$

Siendo W_0 la distancia horizontal entre centros de dos gotas consecutivas de la columna y h la distancia vertical entre centros de dos gotas sucesivas de la columna, la cual en la tabla de nomenclaturas se ha designado como h_v .

Si se desea dejar la rugosidad en función del ángulo de inclinación de la columna respecto al eje horizontal, sabiendo que:

$$\tan\theta_i = \frac{h_v}{W_0} \quad (4.31)$$

Despejando y sustituyendo h en la ecuación 4.31, la rugosidad queda en función del paso horizontal, el radio inicial de la gota de caída y del ángulo de inclinación, θ_i :

$$R_a = \frac{W_0^2(1 + (\tan\theta)^2)}{18\sqrt{3} \cdot R_i \left[\frac{4}{(1 - \cos\theta_s)^2 \cdot (2 + \cos\theta_s)} \right]} \quad (4.32)$$

CAPÍTULO 5

ESTUDIO EXPERIMENTAL

5.1 Obtención del radio de la gota de salida

Para la obtención del radio inicial de la gota de salida, según lo explicado en el apartado de metodología se emplearon 3 métodos:

1º Método: Imágenes de gota de caída con cámara Jetlab.

Tabla 5.1 Medidas del radio inicial y la velocidad de caída

Fotografías tomadas entre 450-500 ns	
Radio 1	34,9 μm
Radio 2	32,7 μm
Velocidad	2,8 m/s

Este procedimiento se llevó a cabo tomando capturas durante el proceso de impresión, obteniendo imágenes de la gota de caída de baja resolución, lo cual impidió que las medidas de los radios fueran del todo precisas. A sí mismo, debido al bajo número de experimentos realizados, este método no fue utilizado en cálculos posteriores por no ser del todo consistente.

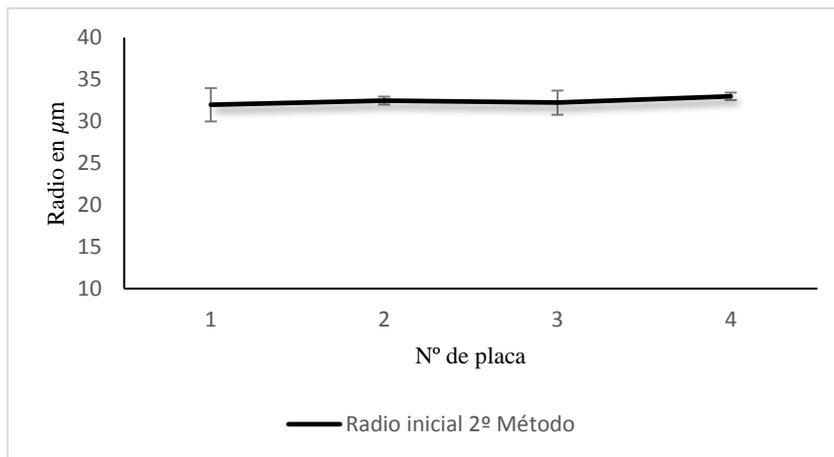
2º Método: Imágenes tomadas del microscopio de 3 gotas solidificadas sobre el sustrato.

Midiendo la anchura a y altura h_c de los tres casquetes esféricos solidificados, se obtuvieron 4 medidas promedio de cada variable. Utilizando la ecuación 5 del apartado 3.3.2 de la metodología y aplicando el tratamiento estadístico, las medidas finales fueron:

Tabla 5.2 Medidas para el cálculo del radio inicial. 2º Método

2º Método	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Medidas directas (μm)	$a: 47,27 \pm 4,63$	$a: 48,62 \pm 0,63$	$a: 47,5 \pm 1,10$	$a: 48,08 \pm 0,95$
	$h_c: 35 \pm 2,11$	$h_c: 32,78 \pm 3,44$	$h_c: 34,44 \pm 0,51$	$h_c: 35 \pm 0,62$
Medidas indirectas (μm)	$R_i: 31,97 \pm 1,99$	$R_i: 32,21 \pm 1,44$	$R_i: 32,47 \pm 0,47$	$R_i: 32,98 \pm 0,45$

Gráfica 5.1 Radio inicial (2º Método)



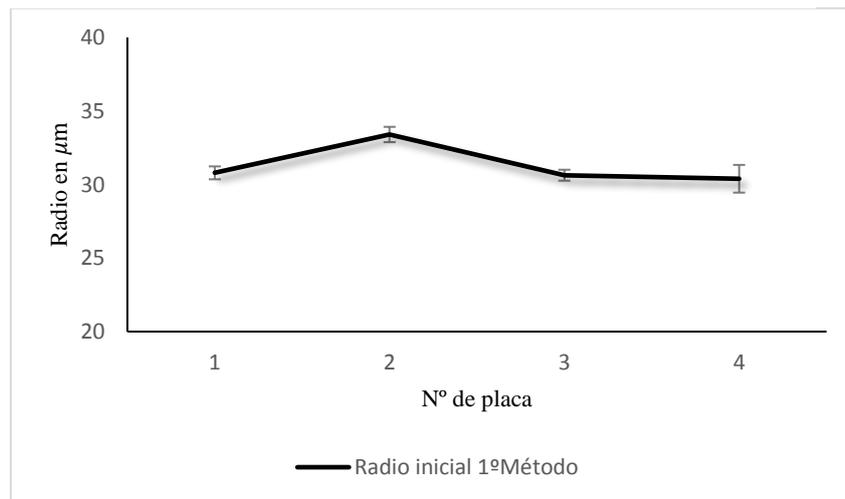
3º Método: Imágenes tomadas del microscopio de las gotas que conforman la columna.

Para este último método, midiendo los radios de las gotas de las columnas r y la distancia entre centros de cada una de ellas h , se obtuvo:

Tabla 5.3 Medidas para el cálculo del radio inicial. 3º Método

3º Método	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Medidas directas (μm)	$r: 39,13 \pm 0,225$	$r: 39,01 \pm 0,335$	$r: 36,84 \pm 0,336$	$r: 39,13 \pm 0,19$
	$h_v: 31,01 \pm 1,371$	$h_v: 30,51 \pm 1,413$	$h_v: 31,6 \pm 0,507$	$h_v: 30,87 \pm 0,572$
Medidas indirectas (μm)	$R_i: 30,79 \pm 0,44$	$R_i: 33,40 \pm 0,52$	$R_i: 30,63 \pm 0,37$	$R_i: 30,39 \pm 0,94$

Gráfica 5.2 Radio inicial (3º Método)



Entre los tres métodos mencionados, se eligió para la determinación del radio inicial de la gota, el segundo método. Esto fue debido a que el número de experimentos realizados fue mayor y por tanto, los datos presentaban menor variabilidad y mejor consistencia, proporcionando un valor más fiable de R_i .

En consecuencia, tomando el segundo método, el valor final del radio inicial de la gota es:

$$\bar{R}_i: 32,56 \pm 1,09 \mu\text{m}$$

5.2 Obtención de los ángulos característicos

Según las expresiones desarrolladas en el apartado 3.5.4 de la metodología y a partir de las fotografías obtenidas por el microscopio se han obtenido los siguientes resultados:

5.2.1. Ángulo de solidificación

Las medidas realizadas se incluyen en los anexos del capítulo 8, así los valores finales obtenidos del ángulo de solidificación para cada placa son:

Placa 1:

$$\theta_s = 71,02^\circ \pm 0,047$$

Placa 2:

$$\theta_s = 67,49^\circ \pm 0,030$$

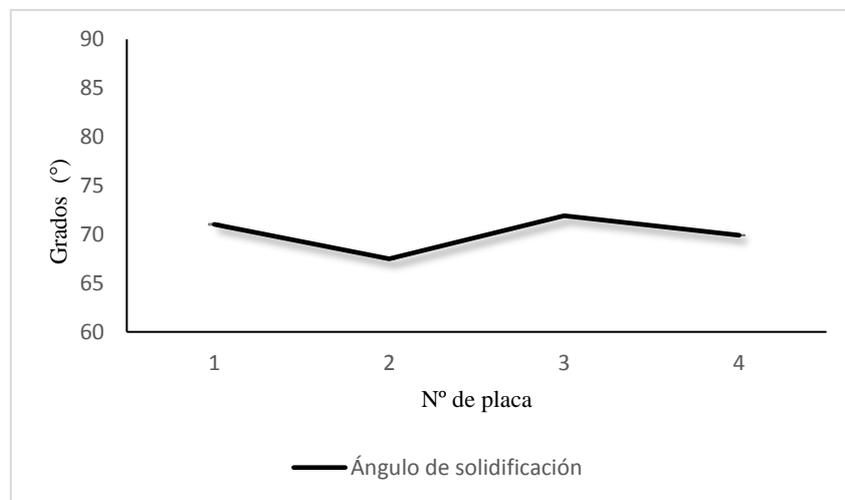
Placa 3:

$$\theta_s = 71,90^\circ \pm 0,020$$

Placa 4:

$$\theta_s = 69,90^\circ \pm 0,010$$

Gráfica 5.3 Ángulo de solidificación



En consecuencia, el ángulo de solidificación es:

$$\bar{\theta}_s = 70,08^\circ \pm 0,03$$

5.2.2. Ángulo de contacto entre gotas

Para cada una de las placas, los resultados en grados, de los ángulos entre gotas consecutivas han sido:

Placa 1:

$$\theta = 46,69^\circ \pm 0,04$$

Placa 2:

$$\theta = 46,61^\circ \pm 0,04$$

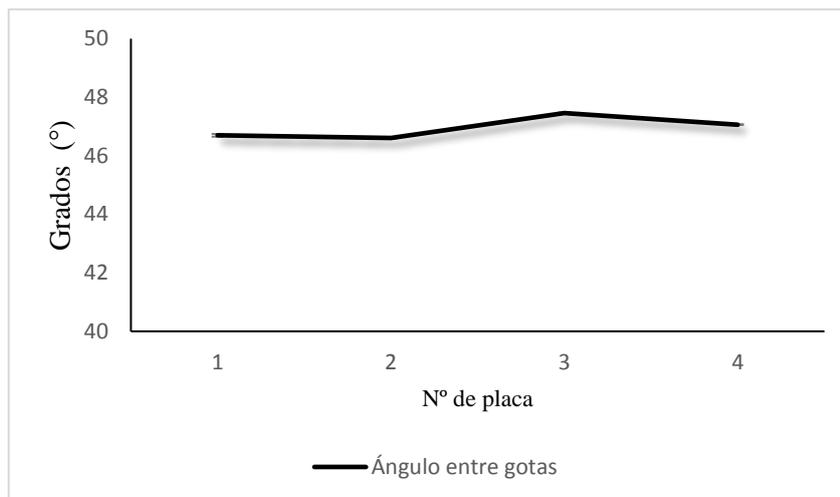
Placa 3:

$$\theta = 47,46^\circ \pm 0,03$$

Placa 4:

$$\theta = 47,06^\circ \pm 0,02$$

Gráfica 5.4 Ángulo de contacto entre gotas



En consecuencia, el valor del ángulo de contacto entre gotas es:

$$\bar{\theta} = 46,96^\circ \pm 0,03$$

5.2.3. Ángulo de inclinación de la columna

Conocida la distancia vertical entre centros de dos gotas sucesivas h_v y el paso o distancia horizontal entre dos gotas, W_0 , se determina el ángulo de inclinación θ_i .

Se obtuvieron 4 ángulos de inclinación (Figura 5.1 y 5.2), uno para cada paso utilizado y dentro de una misma placa. Al tener 4 placas, se tomó la media de cada uno de los ángulos de inclinación correspondientes al paso de 0, 8, 16 y 24 μm .

Figura 5.1 Ángulo de inclinación para un paso $W_0 = 0 \mu\text{m}$ y $W_0 = 8 \mu\text{m}$

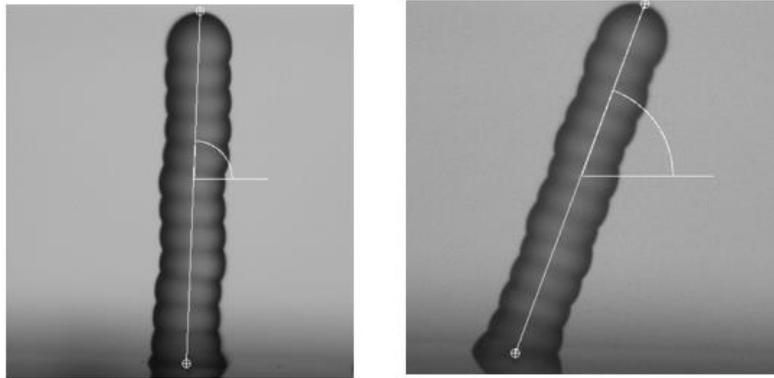
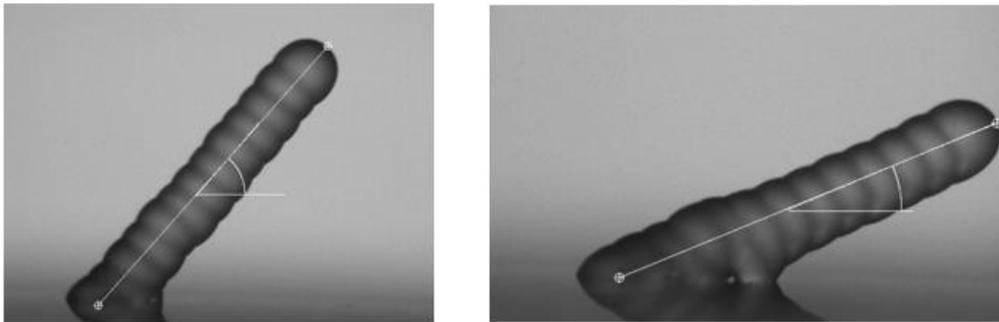


Figura 5.2 Ángulo de inclinación para un paso $W_0 = 16 \mu\text{m}$ y $W_0 = 24 \mu\text{m}$



En consecuencia, el valor del ángulo de inclinación para cada uno de los pasos es:

Para un paso de 0 μm :

$$\bar{\theta}_i = 85,38^\circ \pm 0,04$$

Para un paso de 8 μm :

$$\bar{\theta}_i = 71,57^\circ \pm 0,01$$

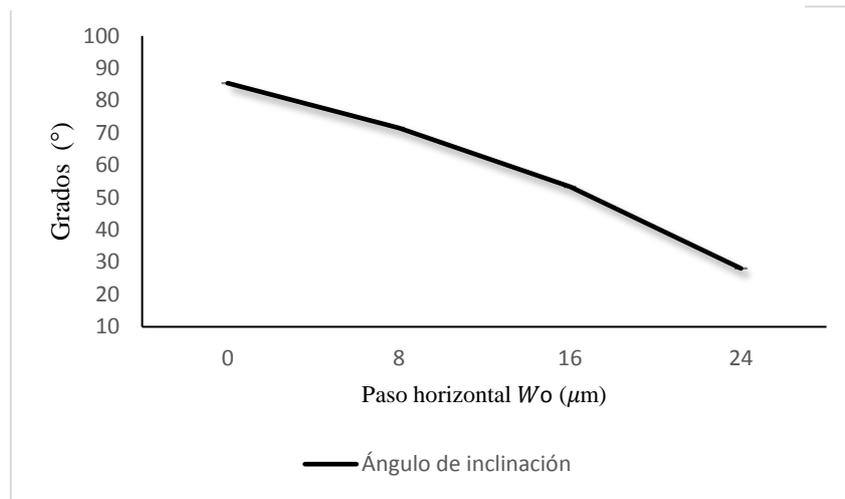
Para un paso de 16 μm :

$$\bar{\theta}_i = 53,32^\circ \pm 0,08$$

Para un paso de 24 μm :

$$\bar{\theta}_i = 28,07^\circ \pm 0,04$$

Gráfica 5.5 Angulo de inclinación en función del paso W_0 .



Como se observa en la gráfica 5.5, el ángulo de inclinación de la columna va disminuyendo al aumentar el paso o distancia horizontal entre gotas W_0 , desde 0 hasta 24 μm .

5.3 Obtención del paso máximo

Conforme a lo deducido según el modelo teórico, el paso resulta ser una función del tipo $W_{0,máx} = f(R1, R2, \theta_s, \theta)$. Así, conociendo el primer y segundo radio de la gota de cada una de las columnas y los ángulos de solidificación y entre gotas, se ha determinado mediante la ecuación 4.21, el desplazamiento máximo entre la primera y segunda gota:

Placa 1:

$$W_{0,máx} = 12,35 \pm 2,38 \mu\text{m}$$

Placa 2:

$$W_{0,máx} = 12,26 \pm 1,74 \mu\text{m}$$

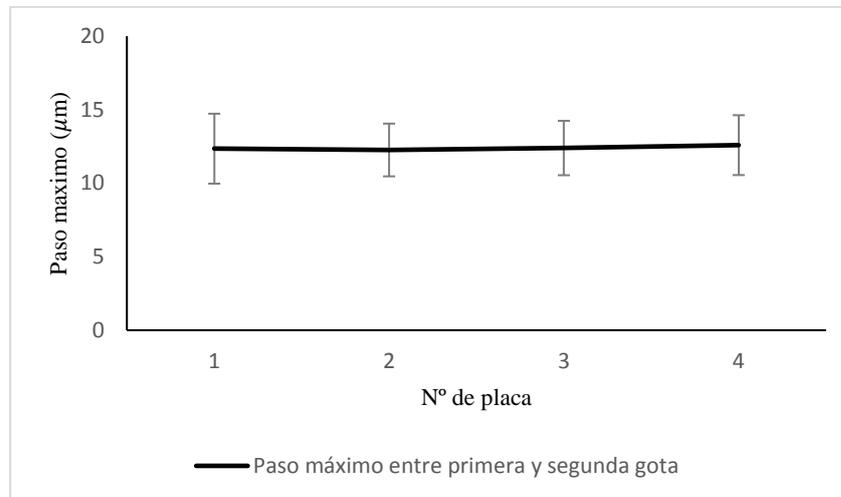
Placa 3:

$$W_{0,máx} = 12,39 \pm 1,85 \mu\text{m}$$

Placa 4:

$$W_{0,máx} = 12,59 \pm 2,04 \mu\text{m}$$

Gráfica 5.6 Paso máximo entre primera y segunda gota $W_{0,máx}$



En consecuencia, el desplazamiento horizontal máximo entre el centro de la primera y segunda gota es:

$$\overline{W_{0,máx}} = 12,41 \pm 2,02 \mu\text{m}$$

5.4 Obtención de la rugosidad

5.4.1. Rugosidad experimental

Conocidos los valores del radio entre gotas r y el paso medido en la dirección de la columna, W'_d se puede determinar el valor de la rugosidad de la superficie lateral de cada una de las columnas mediante la ecuación 3.25.

La rugosidad es por tanto función del paso programado W_0 , ya que W'_d es la suma vectorial del paso horizontal W_0 y la altura vertical entre centros h , y dependerá de los 4 valores utilizados de W_0 (0, 8, 16 y 24 μm) en cada placa. Al tener 4 placas con la misma tendencia, se calculó el valor medio de los resultados obtenidos.

En consecuencia, el valor de la rugosidad experimental para cada paso W_0 es:

Para un paso de 0 μm :

$$\overline{R}_a = 0,81 \pm 0,04 \mu\text{m}$$

Para un paso de 8 μm :

$$\overline{R}_a = 0,79 \pm 0,04 \mu\text{m}$$

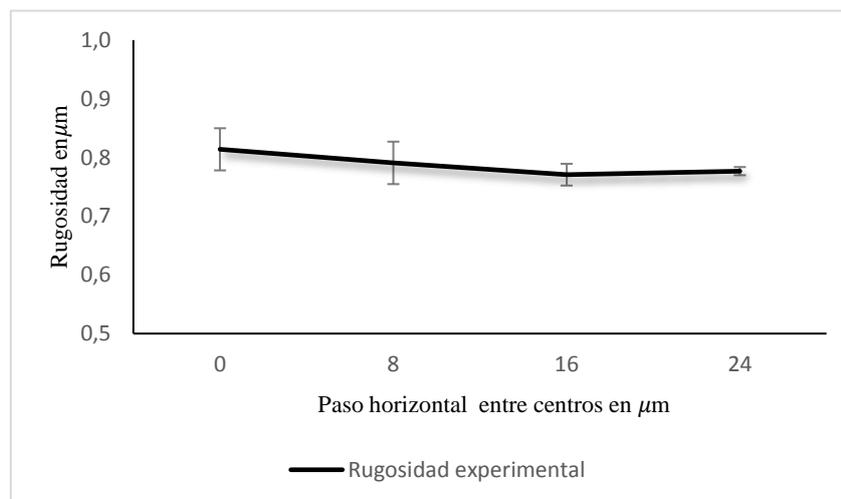
Para un paso de 16 μm :

$$\overline{R}_a = 0,77 \pm 0,02 \mu\text{m}$$

Para un paso de 24 μm :

$$\overline{R}_a = 0,78 \pm 0,01 \mu\text{m}$$

Gráfica 5.7 Rugosidad experimental en función del paso horizontal W_0



5.4.2. Rugosidad teórica

Conocidos los valores del radio inicial de la gota de salida R_i , el paso medido en la dirección de la columna, W'_d , y el ángulo de solidificación θ_s se puede determinar el valor de la rugosidad de la superficie lateral de cada una de las columnas.

Por tanto, procediendo de forma similar al cálculo de la rugosidad experimental, como la rugosidad depende del paso horizontal W_0 se ha calculado el valor medio de 4 rugosidades en función del paso empleado.

En consecuencia, el valor de la rugosidad para cada paso W_0 es:

Para un paso de 0 μm :

$$\overline{R_a} = 0,60 \pm 0,03 \mu\text{m}$$

Para un paso de 8 μm :

$$\overline{R_a} = 0,61 \pm 0,08 \mu\text{m}$$

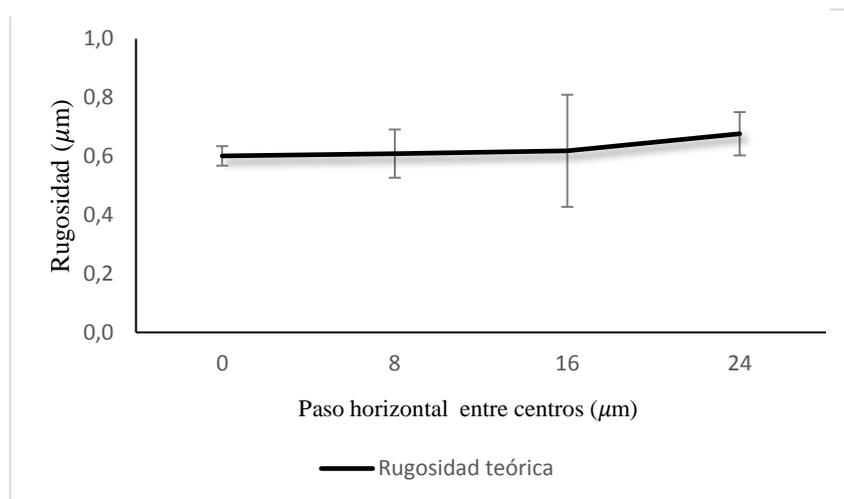
Para un paso de 16 μm :

$$\overline{R_a} = 0,62 \pm 0,19 \mu\text{m}$$

Para un paso de 24 μm :

$$\overline{R_a} = 0,67 \pm 0,07 \mu\text{m}$$

Gráfica 5.8 Rugosidad teórica en función del paso horizontal W_0



CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1 Paso real y paso teórico

Al realizar la impresión, el cabezal de la máquina debe desplazarse en un sistema de coordenadas x e y en cada deposición. Para ello, mediante los *scripts* (secuencia de instrucciones de programación) elaborados, se programan determinados valores de paso entre gotas sucesivas. Sin embargo, este paso teórico, llamado W_0 , difiere del paso real medido posteriormente con la imagen obtenida de la columna, que denominamos $W_{0,real}$, cometándose un cierto error que se denomina error de deposición. Y puede deberse a una generación inexacta de la gota donde la trayectoria de la misma no es totalmente vertical, a efectos de rozamiento de la propia gota con el aire o incluso a fenómenos de solapamiento y desplazamiento de una gota sobre otra antes de solidificar y formar una columna estable.

Así, se distinguen dos tipos de paso:

- Paso teórico o programado: coordenadas x - y con la que se programan los *scripts* para depositar las gotas en el lugar deseado del sustrato.
- Paso real: paso o distancia horizontal entre los centros de gotas sucesivas una vez llevada a cabo la deposición.

En la tabla 6.1 se recoge el error cometido por la máquina o “error de deposición” para cada uno de los pasos programados en una de las placas:

Tabla 6.1 Error entre el paso real y paso teórico programado al cabezal para una placa.

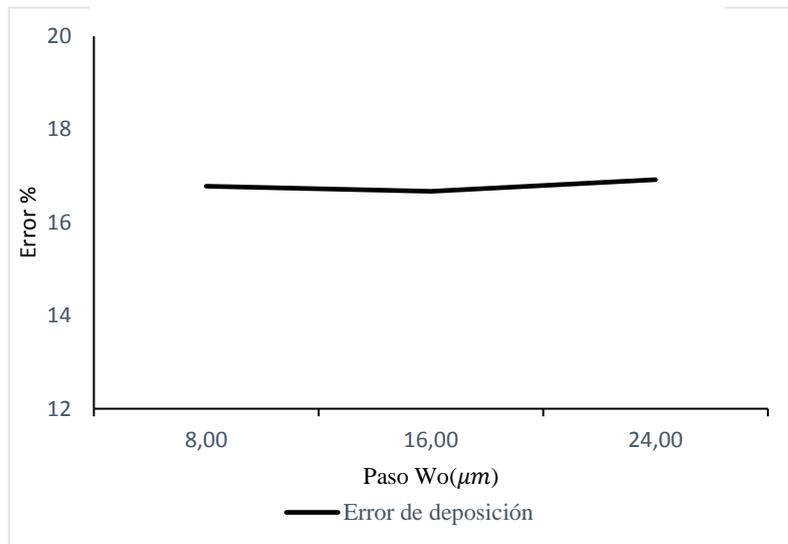
W_0 (μm)	$W_{0,real}$ (μm)	Error rel. e_w
8	$9,61 \pm 1,74$	16,78%
16	$19,19 \pm 0,70$	16,67%
24	$28,89 \pm 1,04$	16,92%

Calculado a partir de la fórmula del error relativo:

$$e_w = \frac{W_{0,real} - W_{0,programado}}{W_{0,real}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Así, se observa que su valor se mantiene constante para cada paso con un valor del 17% aproximadamente.

Gráfica 6.1 Error entre paso programado y real



Nota: se despreció el resultado para la columna de paso 0 (vertical) ya que el error no es cuantitativo puesto que el valor real es un valor nulo y por tanto el error relativo sale del 100 %.

6.2 Desplazamiento máximo entre gotas

Uno de los objetivos de este estudio es analizar la influencia del paso o distancia horizontal máxima $W_{0,máx}$ entre los centros de la primera y segunda gota de la columna.

Con ello se pretende establecer cuál es el máximo desplazamiento que puede existir entre las dos primeras gotas para garantizar una morfología vertical e inclinada de la columna.

Realizando un análisis de las dos primeras gotas de la columna, se ha estimado este desplazamiento mediante modelos teóricos desarrollados en capítulos anteriores y se ha contrastado con lo obtenido en la realidad mediante las fotografías de las columnas depositadas, realizándose una serie de predicciones:

- Predicción teórica:

A partir de los modelos desarrollados en el capítulo 4 del estudio teórico, el paso máximo resultó ser función de cuatro parámetros, concretamente del radio de la primera y segunda gota $R1$ y $R2$, del ángulo de solidificación θ_s y del ángulo entre gotas θ , siendo $W_{0,máx} = f(R1, R2, \theta_s, \theta)$.

Mediante la expresión:

$$W_{0,máx} = R_1 \cdot \text{sen } \theta_s - R_2 \cdot \text{sen}(\theta_s + \theta)$$

El resultado promedio del desplazamiento horizontal o paso máximo entre los centros de la primera y segunda gota fue:

$$\overline{W_{0,máx}} = 12,41 \pm 2,02 \mu\text{m}$$

Así, según los modelos teóricos, cuando el paso o desplazamiento horizontal entre los centros de la primera y segunda gota supera el valor de $12,41 \mu\text{m}$, la segunda gota comienza a deslizarse sobre la primera quedando apoyada sobre el sustrato. Cuando esto ocurre, las siguientes gotas depositadas también se apoyan sobre el sustrato y el modo de deposición pasa a ser horizontal.

No obstante, ha de tenerse en cuenta que el modelo geométrico es aplicable cuando el ángulo de contacto entre ambas es el ángulo entre gotas, es decir, cuando la condición es de una gota sobre otra, como se observa en la Figura 6.2.

Nota: R1 resulta siempre mayor que R2 por ser el correspondiente a la gota apoyada sobre el sustrato a diferencia de las demás gotas de la columna que están apoyadas unas sobre otras, no sobre el sustrato.

Seguidamente, se muestra un esquema de las condiciones teóricas de la primera y segunda gota en función del paso:

Figura 6.2 Esquema teórico del inicio de la columna cuando $W_0 < 12,4 \mu\text{m}$

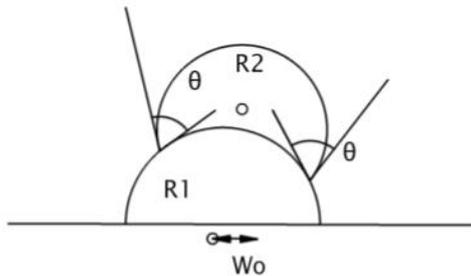


Figura 6.1 Esquema teórico del inicio de la columna cuando $W_0 = 12,4 \mu\text{m}$

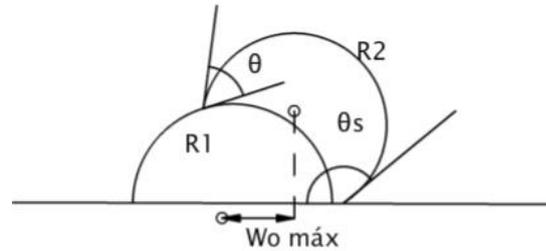
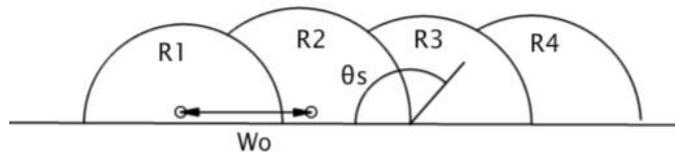


Figura 6.3 Esquema teórico de la morfología de la columna completa si se mantiene $W_0 = 12,4 \mu\text{m}$ durante toda la deposición.



En la primera figura, cuando la distancia horizontal entre la primera y segunda gota es menor que el paso máximo, se observa que la segunda gota presenta el ángulo de contacto entre gotas tanto en su perfil derecho como izquierdo, estando en equilibrio con el resto de gotas. La columna mantiene su morfología y los modelos son aplicables a esta condición.

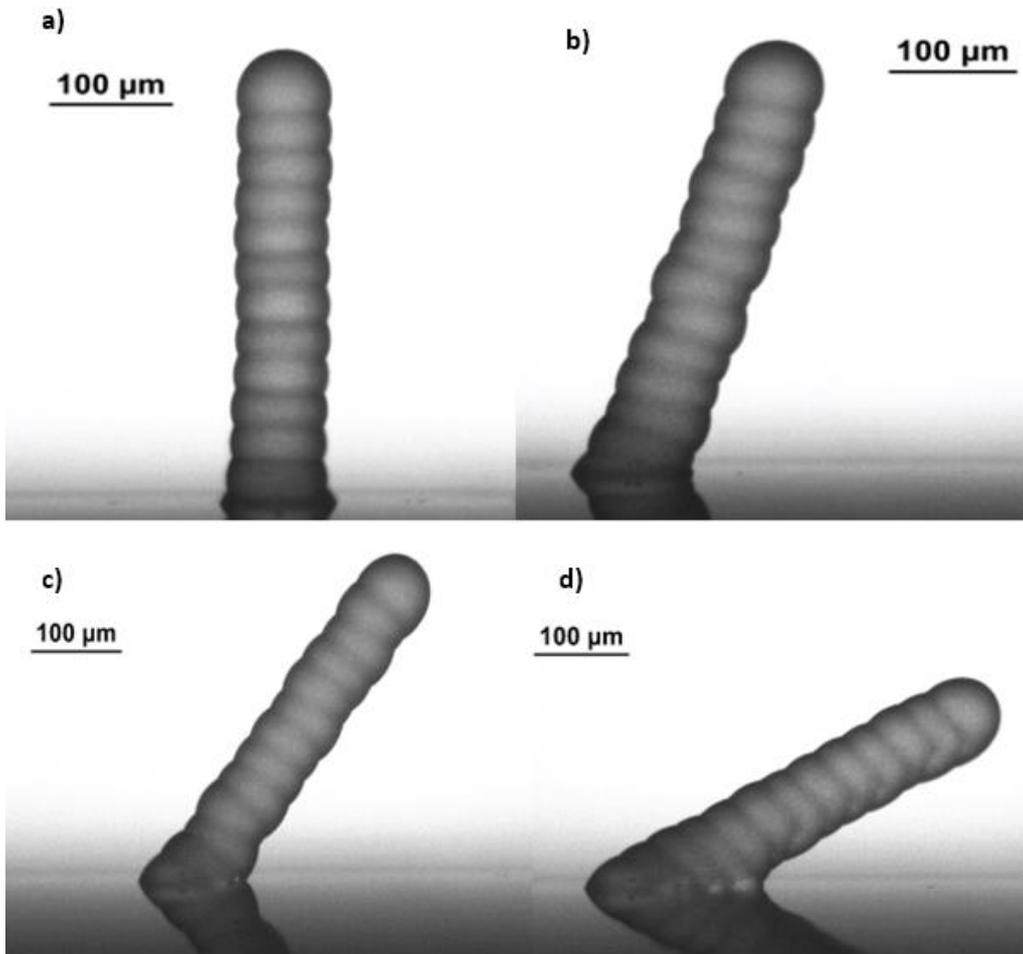
En la Figura 6.2, se alcanza el valor límite cuando $W_0 = 12,4 \mu\text{m}$ y la segunda gota comienza a tocar el sustrato presentando una condición distinta. El ángulo de contacto ahora es el ángulo de solidificación por estar la segunda gota apoyada sobre el sustrato.

El modelo teórico deja de ser válido por alcanzarse la condición límite $W_0 = W_{0,máx}$ y si se sigue utilizando el mismo valor de paso durante toda la deposición, las gotas posteriores a la 2ª, se apoyan también sobre el sustrato y la columna pasa a ser un cordón horizontal.

▪ Resultado experimental:

En la realidad, los valores del paso máximo difieren de los obtenidos por los modelos teóricos. Con el fin de estimar lo que sucede experimentalmente, en la Gráfica 6.2 se reúnen las fotografías de una placa en función del paso programado:

Gráfica 6.2 Morfología de las columnas de una placa para cada uno de los pasos utilizados: (a) Paso $W_0 = 0\mu\text{m}$; (b) Paso $W_0 = 8\mu\text{m}$; (c) Paso $W_0 = 16\mu\text{m}$; Paso $W_0 = 24\mu\text{m}$



Así, se observa que el paso máximo se da para un valor programado de $16\mu\text{m}$ ($19\mu\text{m}$ realmente debido al error de deposición), donde la segunda gota se encuentra ya apoyada sobre el sustrato.

Para un paso teórico de $24\mu\text{m}$ ($28\mu\text{m}$ reales), la columna se encuentra más inclinada y son ahora las cuatro primeras gotas las que tocan el sustrato. Quedando solapadas para formar una base de apoyo que soporte el peso de la columna.

A continuación, se muestran las distintas etapas y condiciones experimentales de la primera y segunda gota en función del paso:

Figura 6.5 Esquema experimental del inicio de la columna cuando $W_0 < 16 \mu\text{m}$

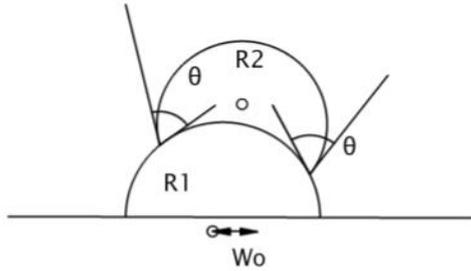


Figura 6.4 Esquema experimental del inicio de la columna cuando $W_0 = 16 \mu\text{m}$

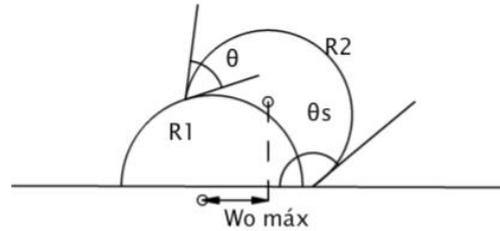


Figura 6.6 Esquema teórico de la morfología de la columna completa si se mantiene $W_0 = 16 \mu\text{m}$ en la deposición completa

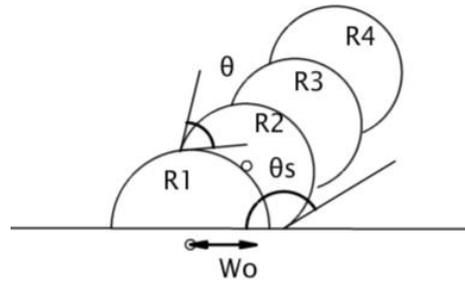


Figura 6.7 Esquema experimental cuando se mantiene el paso $W_0 = 24 \mu\text{m} > W_{0,máx} = 16 \mu\text{m}$ durante toda la deposición

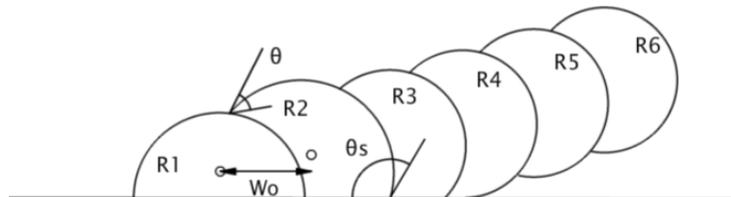
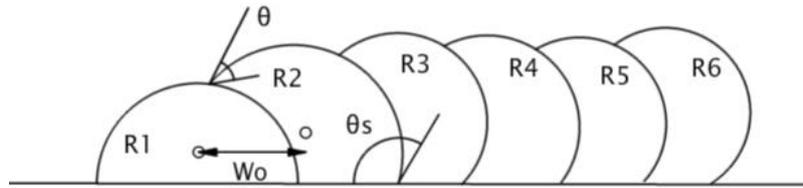


Figura 6.8 Esquema experimental del inicio de la columna cuando $W_0 = 32 \mu\text{m} > W_{0,m\acute{a}x} = 16 \mu\text{m}$ durante toda la deposición



Como reflejan las figuras, manteniendo el paso máximo de $16 \mu\text{m}$ e incluso $24 \mu\text{m}$ en toda la deposición, la columna sigue manteniendo una morfología inclinada a diferencia de la predicción teórica comentada, donde una vez que la segunda gota se apoya sobre el sustrato y si se mantiene el paso durante toda la deposición, la columna cae pasando al modo de deposición horizontal

Por tanto, puede deducirse lo siguiente:

- Teóricamente, el paso máximo promedio entre la primera y segunda gota es de $12,4 \mu\text{m}$, Sin embargo, experimentalmente este valor cambia alcanzando los $16 \mu\text{m}$ programados ($19,9 \mu\text{m}$ reales). Se comete un error relativo entre ambos del orden de:

$$e_w = \frac{W_{0,m\acute{a}x \text{ real}} - W_{m\acute{a}x, \text{teórico}}}{W_{0,m\acute{a}x \text{ real}}} \cdot 100 = 37,67\%$$

- Haciendo uso de la tabla 6. 2se han calculado en función de los valores de $W_{0,m\acute{a}x}$, la inclinación máxima de la columna antes de caer y pasar al modo horizontal.

Tabla 6.2 Ángulo de inclinación promedio de la columna en función del paso programado.

Paso programado W_0 en μm	Angulo inclinación promedio en $^\circ$
0	85,38
8	71,57
16	53,32
24	28,07

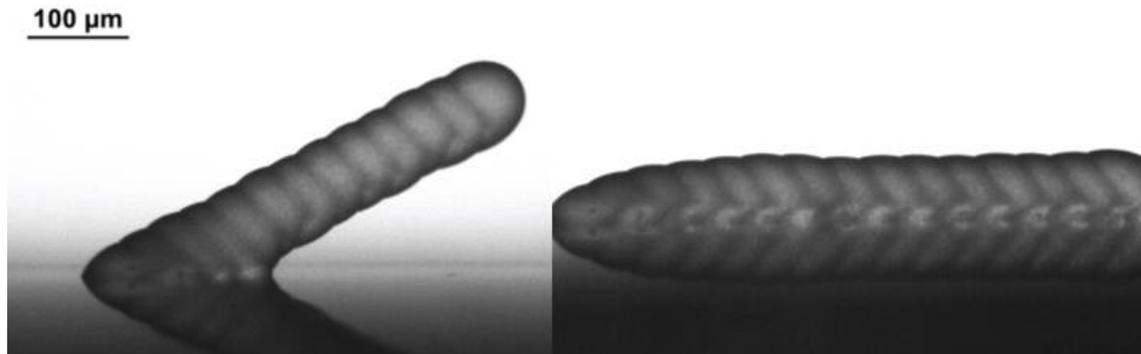
Para el modelo teórico, con un desplazamiento máximo de $12,4 \mu\text{m}$ interpolando entre los pasos de 8 y $16 \mu\text{m}$, el valor mínimo del ángulo de inclinación de la columna antes de caer y pasar al modo horizontal, es de $62,45^\circ$ respecto del eje horizontal. Experimentalmente, se comprueba que la columna puede mantenerse inclinada hasta los $28,07^\circ$ como mínimo. Cometiéndose un error relativo entre ambos del $55,4\%$.

- En el modelo teórico, a partir de un paso máximo de $12,4 \mu\text{m}$, la segunda gota de la columna se apoya sobre el sustrato y si se sigue utilizando este valor de paso durante la deposición, las siguientes gotas tocan a su vez el sustrato adquiriendo la forma de un cordón horizontal.

Sin embargo, la realidad muestra que la columna sigue inclinada manteniendo el paso máximo experimental de $16 \mu\text{m}$ para toda la columna según muestra la Figura 6.6, y no es hasta un paso de $32 \mu\text{m}$ cuando el modo de deposición pasa a ser horizontal (Figura 6.9).

- Experimentalmente se demuestra que la columna puede garantizar la morfología inclinada teniendo hasta la cuarta gota apoyada sobre el sustrato, a diferencia de como predice el modelo teórico donde una vez que la segunda toca, las gotas sucesivas deben tocar el sustrato también, pasando al modo de deposición horizontal.
- Se concluye que existe una zona transitoria entre el modo de deposición vertical-inclinada y el horizontal, donde la segunda gota al estar apoyada sobre el sustrato manteniendo gotas apoyadas por encima, presenta condiciones distintas a las recogidas por el modelo teórico (donde la condición es gota sobre gota y solo es la primera gota la que se encuentra apoyada sobre el sustrato). Así, los valores de paso obtenidos teórica y experimentalmente son distintos debido a que el modelo geométrico no tiene en cuenta la condición que se presenta experimentalmente, siendo válido hasta el valor límite de $W_0 \leq W_{0_{m\acute{a}x}}$, cuando las gotas están unas encima de otras.

Figura 6.9 Paso del modo de deposición vertical al horizontal. Imagen izquierda, paso programado $W_0 = 24\mu m$. Imagen derecha, paso programado $W_0 = 32\mu m$



6.3 Comparación de la rugosidad teórica y experimental.

En esta sección, se lleva a cabo una comparativa de los valores de rugosidad obtenidos a partir de modelo experimental y teórico.

En el modelo teórico, la rugosidad se ve influenciada por varios parámetros calculados con anterioridad: el radio inicial de la gota R_i , la distancia entre centros de gotas consecutivas medida en la dirección de la columna W'_d y el ángulo de solidificación θ_s .

A su vez, el modelo experimental utiliza una la rugosidad aritmética media que depende también de la distancia entre centros de gotas consecutivas medida en la dirección de la columna W'_d y el diámetro de las gotas de cada columna r .

Los valores de rugosidad obtenidos acompañados de su respectiva variabilidad, se recogen en las tablas siguientes:

Tabla 6.3 Rugosidades teórica y experimental. Placa 1.

Placa1.Comparación de las rugosidades teórica y experimental					
Paso (μm)		Ra según modelo teórico(μm)		Ra según modelo experimental(μm)	
W teórico	W exp.	Ra teórica	Variabilidad	Ra exp.	Variabilidad
0	2,82	0,61	0,03	0,79	0,03
8	9,18	0,62	0,08	0,77	0,04
16	16,86	0,65	0,19	0,79	0,02
24	28,07	0,68	0,07	0,75	0,01

Tabla 6.4 Rugosidades teórica y experimental. Placa 2.

Placa 2.Comparación de las rugosidades teórica y experimental					
Paso(μm)		Ra según modelo teórico(μm)		Ra según modelo experimental(μm)	
W teórico	W exp.	Ra teórica	Variabilidad	Ra exp.	Variabilidad
0	2,89	0,59	0,03	0,78	0,05
8	10,18	0,58	0,08	0,77	0,03
16	19,30	0,59	0,18	0,75	0,02
24	28,9	0,64	0,07	0,81	0,01

Tabla 6.5 Rugosidades teórica y experimental. Placa 3.

Placa 3.Comparación de las rugosidades teórica y experimental					
Paso(μm)		Ra según modelo teórico(μm)		Ra según modelo experimental(μm)	
W teórico	W exp.	Ra teórica	Variabilidad	Ra exp.	Variabilidad
0	2,33	0,64	0,03	0,86	0,03
8	9,60	0,64	0,0	0,80	0,04
16	19,19	0,63	0,18	0,76	0,01
24	28,89	0,67	0,08	0,75	0,01

Tabla 6.6 Rugosidades teórica y experimental. Placa 4.

Placa 4.Comparación de las rugosidades teórica y experimental					
Paso(μm)		Ra según modelo teórico(μm)		Ra según modelo experimental(μm)	
W teórico	W exp.	Ra teórica	Variabilidad	Ra exp.	Variabilidad
0	2,14	0,63	0,03	0,82	0,03
8	10,18	0,62	0,08	0,81	0,04
16	18,83	0,61	0,19	0,77	0,04
24	29,26	0,66	0,07	0,77	0,03

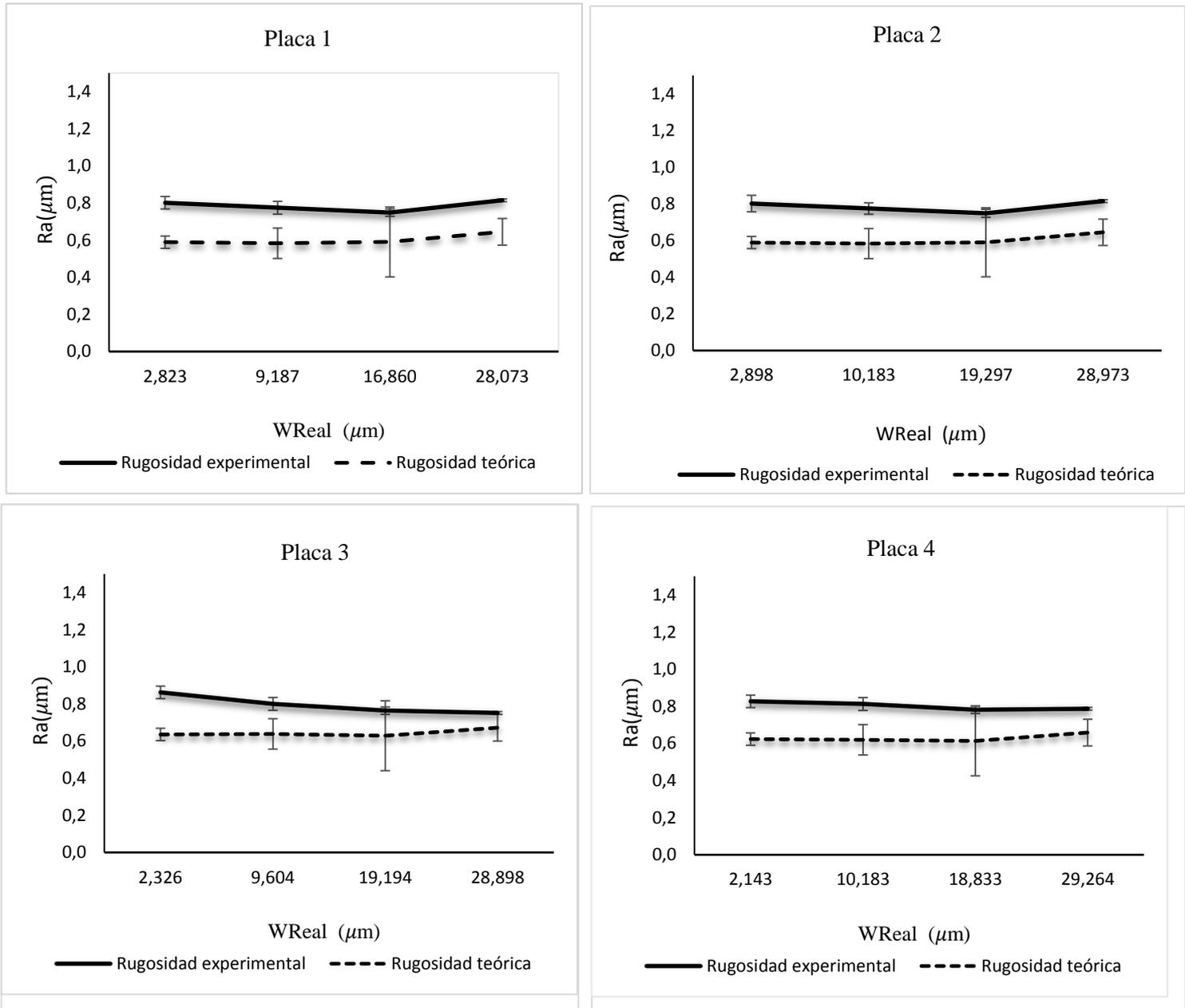
Con el fin de representar una tendencia global para la rugosidad experimental y teórica, se ha hallado el valor medio de las rugosidades para cada tipo de paso (0, 8,16 y 24 μm), obteniendo 4 valores de rugosidad promedio que se reflejan en la tabla siguiente:

Tabla 6.7 Valores promedio de la rugosidad experimental y teórica en función del paso

Valores finales promedio en μm					
\bar{W} teórico	$\bar{W}_{\text{exp.}}$	\bar{R}_a teórica	Variabilidad	\bar{R}_a experimental	Variabilidad
0	2,55	0,61	0,03	0,81	0,03
8	9,80	0,62	0,08	0,79	0,04
16	18,55	0,62	0,19	0,77	0,02
24	28,80	0,66	0,07	0,78	0,01

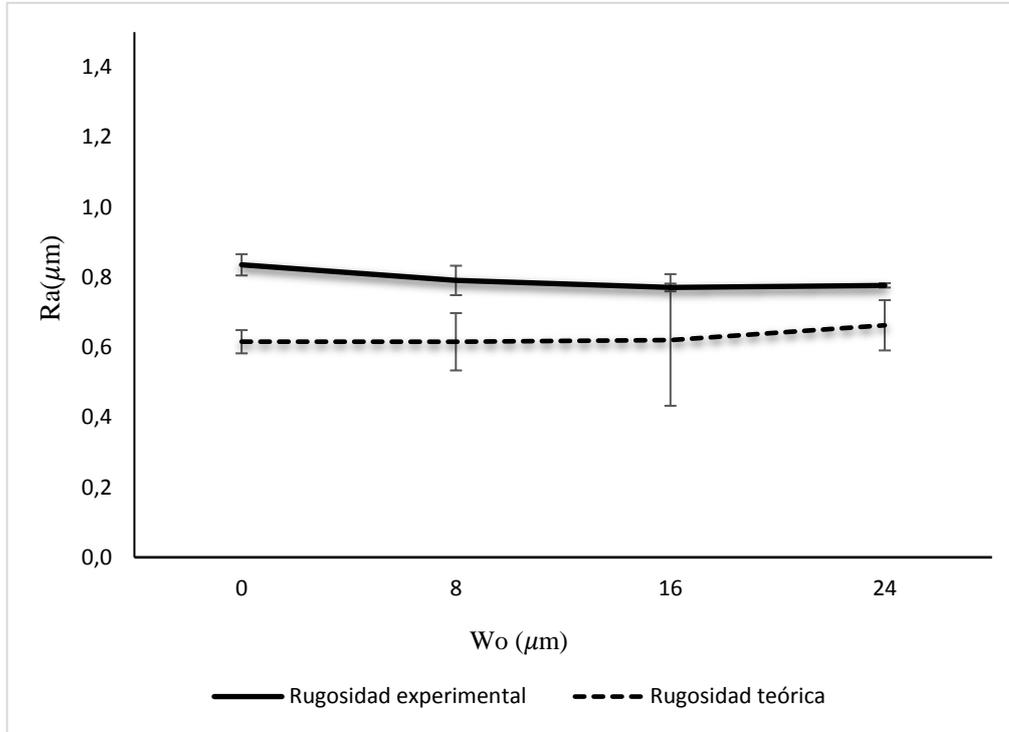
La siguiente figura muestra la tendencia de la rugosidad experimental y teórica para cada una de las placas:

Gráfica 6.3 Comparación entre rugosidad experimental y teórica en función del paso para cada una de las 4 placas



Simplificando, con los valores obtenidos de la tabla 6.7 se ha representado la tendencia global en la figura 6.4:

Gráfica 6.4 Comparativa de la rugosidad experimental y teórica en función del paso



Los resultados muestran que la tendencia global de ambas rugosidades es lineal con el paso programado W_0 . Para la rugosidad teórica, representada mediante la línea de tendencia con guiones, se observa que el comportamiento es creciente a medida que se aumenta la distancia horizontal entre centros de las gotas.

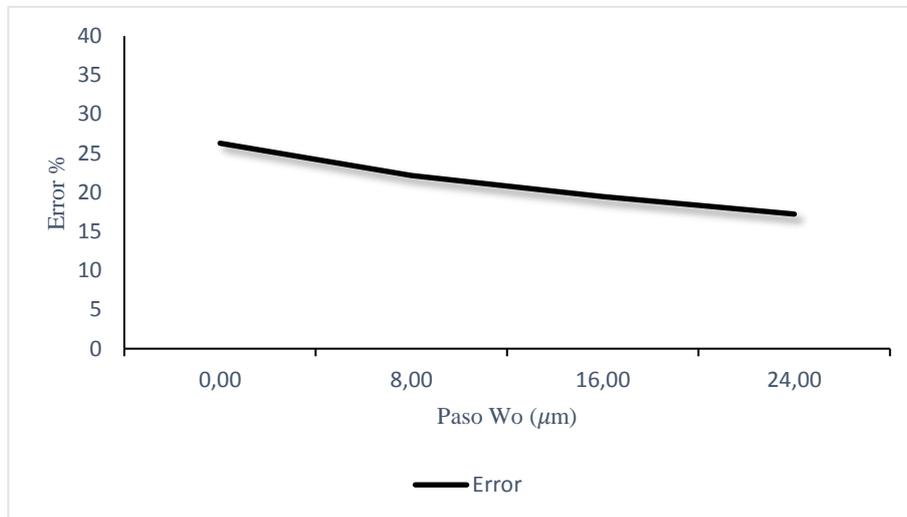
A su vez, la tendencia de la rugosidad experimental no es del todo clara, ya que los valores oscilan ligeramente con una variación de 3 mm. A simple vista, la línea de tendencia de la rugosidad experimental se encuentra por encima de la rugosidad teórica y parece disminuir progresivamente. Sin embargo, para el paso de 24 μm vuelve a aumentar en una décima de micra, por lo que el comportamiento que sigue es prácticamente constante.

Con el objetivo de cuantificar las diferencias entre los valores experimentales y teóricos, se ha realizado una gráfica que muestra el error relativo entre ambas rugosidades:

Tabla 6.8 Valores promedio del error entre rugosidades en función del paso

Paso W_0 (μm)	Error (%)
0	24,30
8	22,15
16	19,47
24	17,23

Gráfica 6.5. Error entre rugosidad teórica y experimental en función del paso



La línea de tendencia muestra que el error va disminuyendo a medida que se alcanza un paso o distancia horizontal entre gotas (W_0) mayor. Esto ocurre porque la tendencia de la rugosidad experimental se mantiene prácticamente constante con el paso, mientras que la rugosidad teórica va creciendo linealmente. Así, para pasos mayores, las dos gráficas estarán más próximas y el error cometido será menor.

▪ Predicción del modelo teórico:

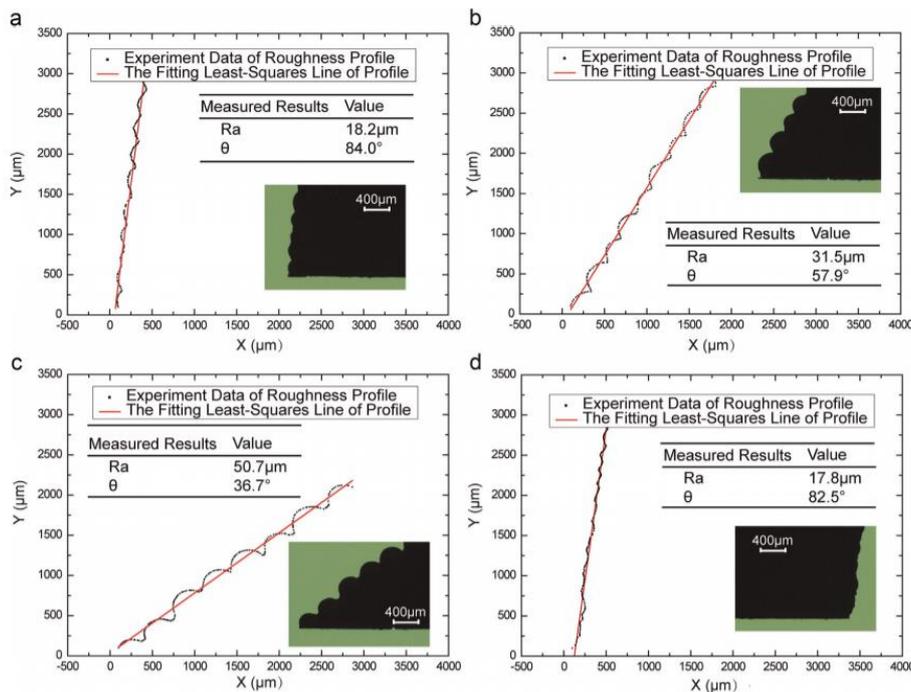
La tendencia de la rugosidad teórica es lineal y creciente con el paso. Cuanto mayor es la distancia horizontal con la que se depositan las gotas consecutivamente, mayor es la rugosidad de la columna.

Así, las columnas verticales (de 0 y 8 μm de paso) presentarán menor rugosidad que las de morfología inclinada (de 16 y 24 μm de paso) y por tanto, mejores características a la hora de formar superficies o piezas.

No obstante, el modelo geométrico no resulta válido para todos los pasos programados. Como se mencionó en el apartado 6.2, existe un valor de paso en el que la deposición pasa de ser vertical a horizontal, en concreto entre 24 y 32 μm . En este rango, las gotas pueden experimentar fenómenos de solapamiento en la transición al modo horizontal, que pueden afectar a la rugosidad y que el modelo teórico no tiene en cuenta.

Así lo demuestran los estudios realizados por los autores Le Hua y Song-yi Zhong[7] para gotas de metal apiladas por niveles, confirmando que a medida que se incrementa el paso horizontal W_0 , la rugosidad va aumentando y el perfil se distorsiona separándose de la línea teórica de rugosidad.

Figura 6.10 Rugosidad lateral ampliada en función de los diferentes pasos:(a) $W_0 = 40\mu\text{m}$, lado izquierdo.(b) $W_0 = 180\mu\text{m}$, (c) $W_0 = 360\mu\text{m}$,(d) $W_0 = 40\mu\text{m}$ en el lado derecho final.



Fuente de procedencia: Le Hua Qi, Song-yi Zhong. “Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture,”[7]

El modelo geométrico predicho por estos autores, establece un valor de W_0 a partir del cual el modelo ya no resulta válido, produciéndose un colapso en el rango de 160 a 200 μm donde el ángulo de inclinación y la rugosidad varían bruscamente y las diferencias entre los valores experimental y teóricos son muy grandes como refleja la Figura 6.10.

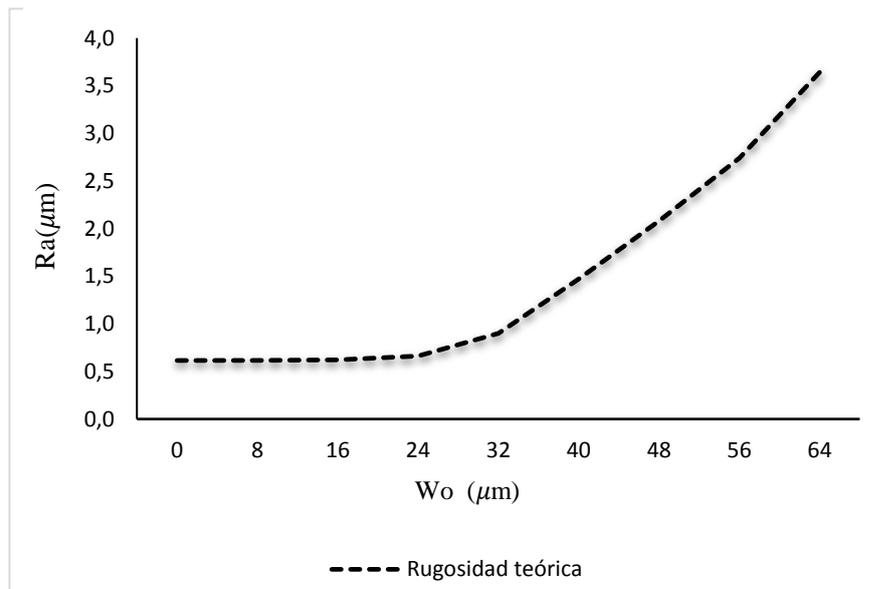
Análogamente, en el caso que nos ocupa, se puede estimar el valor de paso que produce el colapso donde la rugosidad y el ángulo de inclinación varían drásticamente. Este rango precisamente es el cambio de un modo de deposición a otro (entre 24 y 32 μm).

Tabla 6.9 Valores de la rugosidad teórica para todos los pasos

W_0 en μm	Ra teórica en μm
0	0,61
8	0,62
16	0,62
24	0,66
32	0,90
40	1,47
48	2,08
56	2,74
64	3,64

Tomando los valores de rugosidad obtenidos también para cordones horizontales se ha elaborado la siguiente gráfica:

Gráfica 6.6 Rugosidad teórica en función del paso horizontal W_0



Como se observa, dentro del rango de la gráfica, el modo de deposición en el que se centra este TFG se corresponde con un paso de 0 a 24 μm , donde se tienen columnas verticales e inclinadas y el comportamiento de la rugosidad es lineal y ligeramente creciente. No obstante, entre 24 y 32 μm , el modo deposición pasa a ser horizontal y la rugosidad comienza a crecer bruscamente de modo exponencial, a su vez, el ángulo de inclinación de la columna aumenta rápidamente para formar cordones horizontales. Por tanto, el colapso del que los autores anteriores hablan, se da en nuestro caso, entre un paso entre gotas W_0 de 24 y 32 μm donde la rugosidad abandona su comportamiento lineal para crecer exponencialmente.

▪ Resultado experimental:

Según se observa en la gráfica 6.4, la línea de tendencia de la rugosidad experimental se mantiene prácticamente constante y siempre por encima de la línea del modelo teórico.

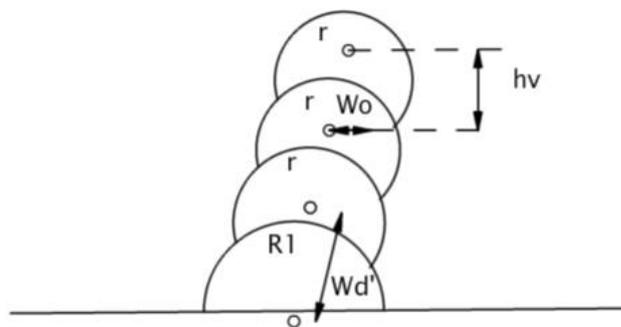
Para abordar esto último, es necesario realizar una comparativa del modelo teórico y experimental estudiando la influencia de los parámetros que intervienen en cada fórmula.

La expresión utilizada para la rugosidad experimental se ha extraído del apartado 3.2.8 de la metodología:

$$R_a = \frac{W_d'^2}{3^2 \cdot 2 \cdot r}$$

Donde W_d' representa el paso medido en la dirección de la columna y r el radio de cualquier gota de la columna excepto la primera, y supuesto constante por el modelo.

Figura 6.11 Esquema de los parámetros que intervienen en la rugosidad experimental.



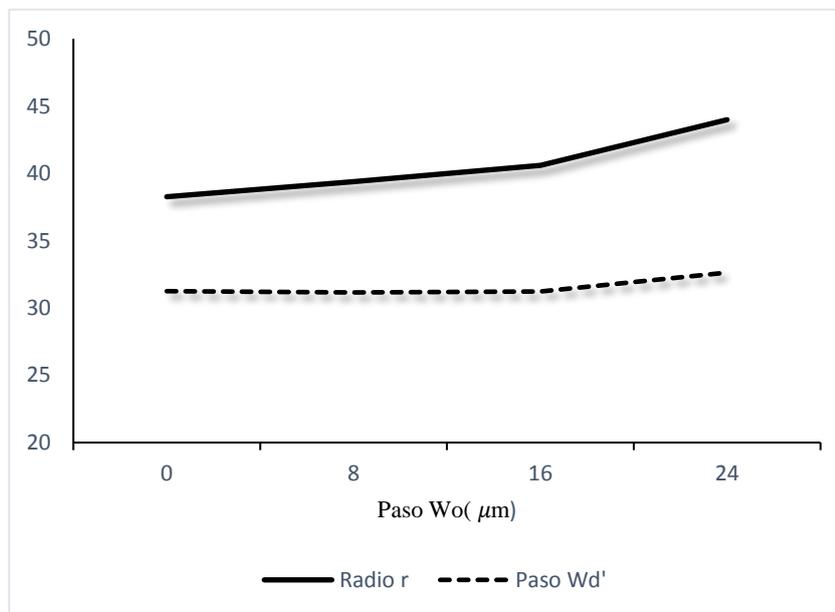
En la siguiente tabla se muestran los valores promedio obtenidos para cada uno de los parámetros:

Tabla 6.10 Resultados promedios del radio y la distancia Wd'

Valores promedios			
W_0 teórico (μm)	r (μm)	Wd' (μm)	Ra exp (μm)
0	38,26	31,24	0,8354
8	39,38	31,15	0,7908
16	40,61	31,23	0,7707
24	43,99	32,63	0,7767

Para estudiar cuál de las dos variables influye en mayor medida se han representado ambas en la siguiente gráfica:

Gráfica 6.7 Variación del radio r y el paso W_0



Así, se observa que la variación del radio de las gotas r , es claramente superior a la variación de distancia entre centros $W'd$, que se mantiene prácticamente constante para cada paso horizontal programado W_0 .

Nota: como muestra la figura 6.11, $W'd$ es la suma vectorial del paso o distancia horizontal entre centros de las gotas W_0 y la altura vertical entre centros de gotas sucesivas h_v . Por tanto a medida que se aumenta el paso W_0 , la columna se vuelve más inclinada y h_v disminuye. Manteniéndose $W'd$ prácticamente constante.

Por tanto, aunque en la fórmula de la rugosidad experimental, W'_d se encuentre elevado al cuadrado, es el valor de r en los pasos iniciales, el que provoca una disminución en el denominador, que se traduce en un valor de rugosidad experimental mayor para las columnas más verticales de 0 y 8 μm de paso (Gráfica 6.8), en contraposición con lo que predice el modelo teórico donde la rugosidad mínima se da en este tipo de columnas.

Gráfica 6.8 Tendencia de la rugosidad experimental

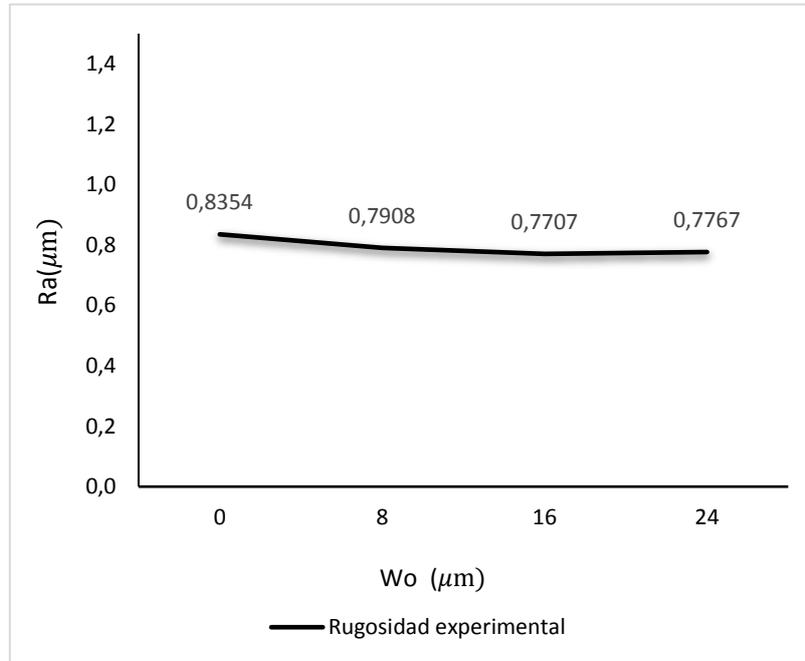
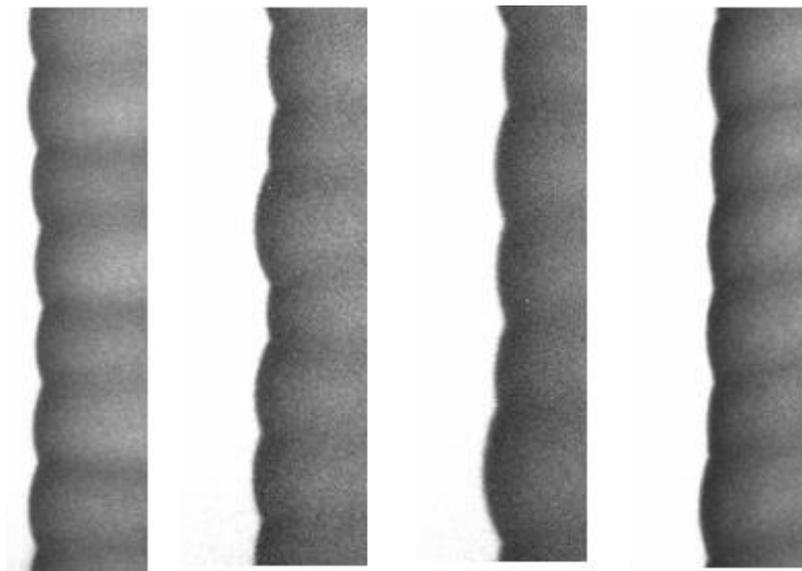
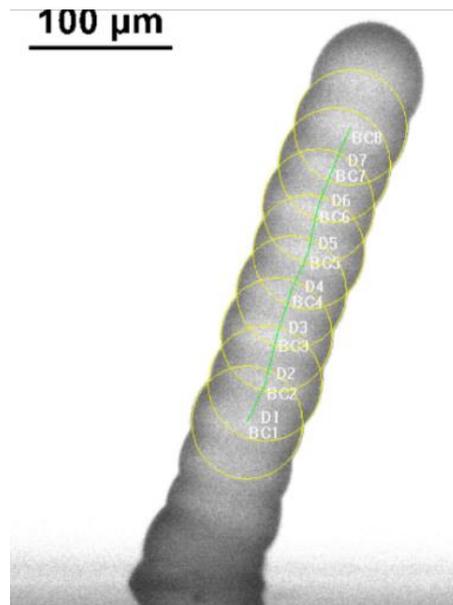


Figura 6.12 Rugosidad lateral izquierda ampliada para cada paso horizontal programado. (a) Paso $w_0 = 0\mu\text{m}$; (b) Paso $w_0 = 8\mu\text{m}$; (c) Paso $w_0 = 16\mu\text{m}$; Paso $w_0 = 24\mu\text{m}$



Por tanto, el radio de las gotas de la columna r es uno de los causantes de que la rugosidad experimental se mantenga por encima de la rugosidad teórica sobre todo en los primeros pasos. La medición de este parámetro se efectuó a partir de la quinta gota de la columna, despreciando los efectos transitorios de las primeras gotas (donde los radios de las primeras gotas de las columnas son mayores que las demás gotas de la columna) que distorsionarían aún más la rugosidad experimental.

Figura 6.13 Medida del radio de las gotas de la columna a partir de la 5ª gota

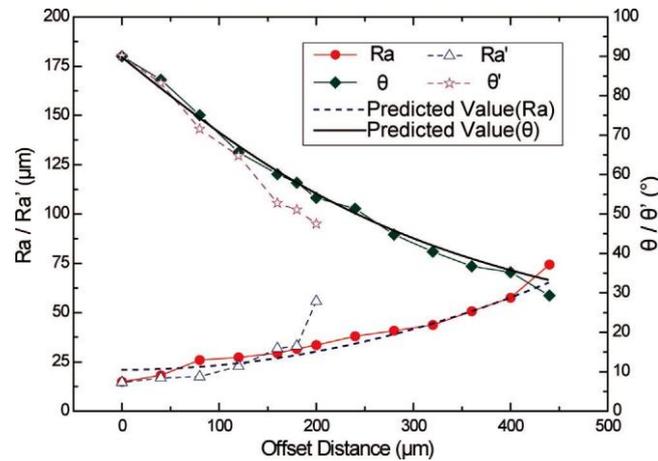


A pesar de que el modelo experimental consigue en parte, ajustarse al modelo teórico. Sin embargo, se deduce que si el radio de las gotas r fuera constante y no se incrementara para cada tipo de paso programado, el modelo experimental se ajustaría con mayor precisión.

Influencia del ángulo de inclinación en la rugosidad

Otro aspecto a abordar, es el ángulo de inclinación o estratificación, θ_i . Según los artículos de la bibliografía, los autores Le.Hua Qi y S. Zhong [7] demostraron que al aumentar el paso o distancia de separación entre gotas W_0 , el ángulo de estratificación, θ_i , disminuye. Esto es, la columna se vuelve cada vez más inclinada.

Figura 6.14 Rugosidad y ángulo de inclinación



Fuente de procedencia: Le Hua Qi, Song-yi Zhong. “Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture,”[7]

Teniendo en cuenta que las cuatro placas siguen la misma tendencia, se realizará el estudio enfocándonos en una única placa. Los datos recogidos se muestran en la tabla 6.11:

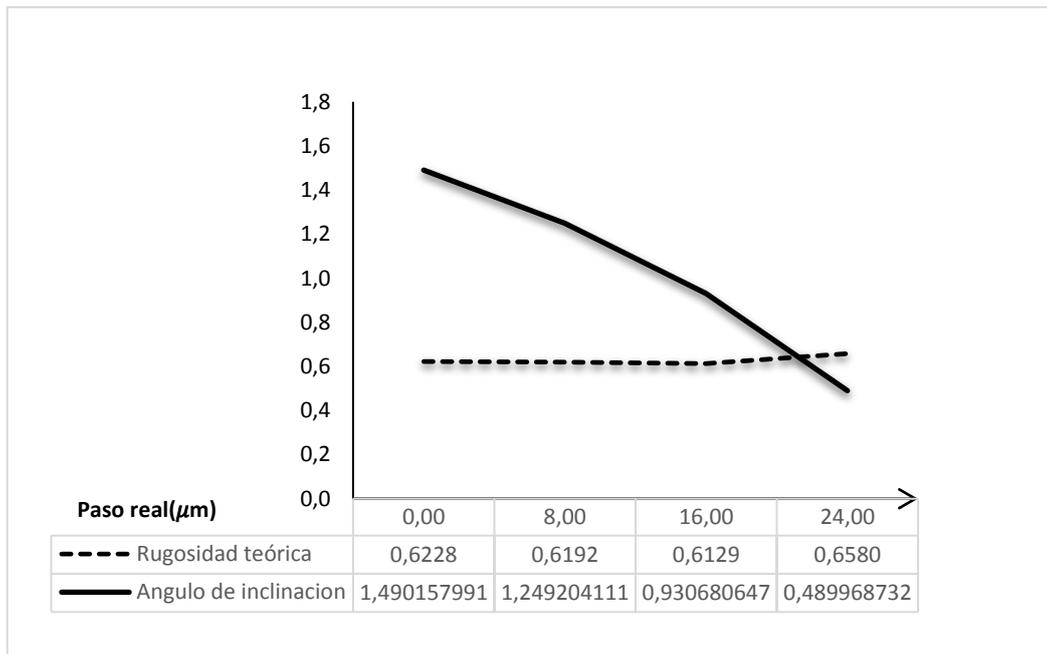
Tabla 6.11 Rugosidad y ángulo de inclinación de la columna en función del paso

Valores promedio		
Paso $W_0(\mu\text{m})$	Ra teórica(μm)	Angulo inclinación($^\circ$)
0	0,61	85,38
8	0,62	71,57
16	0,62	53,32
24	0,66	28,07

En la gráfica que se muestra a continuación, para visualizarlo con mayor claridad, se ha representado la rugosidad en micras y el ángulo de inclinación en radianes frente al paso o distancia horizontal entre gotas situado en el eje horizontal. Donde se observa como la rugosidad crece ligera y progresivamente conforme disminuye el ángulo de inclinación respecto al eje horizontal.

La tendencia es parecida a los estudios realizados por los autores Le Hua Qi, Song-yi Zhong en la Gráfica 6.9:

Gráfica 6.9 Variación de la inclinación y la rugosidad teórica con el paso horizontal



Respecto al ángulo crítico de inclinación, se observa en nuestros experimentos que para un paso $24 \mu\text{m}$, el ángulo resulta de 28° respecto a la horizontal. Resultado que concuerda en parte con lo predicho por los autores mencionados anteriormente, donde no se alcanza un ángulo de 20° y se está por tanto en un rango de morfología inclinada estable. Para pasos W_0 mayores de $24 \mu\text{m}$, el ángulo continuará bajando hasta llegar a un valor límite, en nuestro caso $32 \mu\text{m}$, a partir del cual la columna se derrumba y la deposición pasa a ser horizontal.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

Como se expuso en capítulos iniciales, los objetivos fundamentales de este trabajo se centraban en estudiar la influencia de la rugosidad superficial de las columnas impresas, así como determinar el máximo desplazamiento horizontal entre gotas sucesivas que garantizara una morfología de tipo vertical e inclinada de la columna. Por otro lado, se pretendía abordar el estudio del ángulo máximo de inclinación y su repercusión sobre la rugosidad.

Por ello, con los recursos materiales, los métodos de medición expuestos y con el empleo de los modelos geométricos desarrollados en el capítulo 4, se ha conseguido realizar el estudio de cada una de las magnitudes y parámetros que se pretendía.

Los resultados obtenidos han permitido realizar una comparativa entre lo teórico y lo experimental, con el objetivo de cuantificar la validez de las medidas y de los modelos geométricos empleados.

Así, se valorará la capacidad de predicción de los modelos teóricos respecto a los resultados experimentales estimados con el uso de fórmulas y mediante la observación de la realidad. Evaluándose las posibles causas que provocan las diferencias entre las predicciones experimentales y teóricas.

7.1 Validez de los modelos

7.1.1. Modelo teórico de predicción del paso máximo

El modelo desarrollado para estimar el desplazamiento máximo entre la primera y segunda gota de la columna que garantice una morfología vertical-inclinada de la columna, presenta una serie de limitaciones y es necesario hacer uso de él conociendo sus restricciones.

Así, se ha comprobado que existe un error entre el paso máximo que predice el modelo teórico y lo que se observa en la realidad. En el apartado 6.2 del capítulo anterior, se ha calculado el error, resultando ser del 36,67 %.

La explicación de por qué el modelo teórico no se ajusta a los valores reales de paso máximo radica en las condiciones para las cuales resulta aplicable:

-El modelo geométrico desarrollado depende de las dos primeras gotas de la columna, y es válido y aplicable cuando $W_0 < W_{0máx}$, es decir, cuando la condición entre las dos primeras gotas es de gota sobre gota. Así, la segunda gota se apoya sobre la primera sin llegar a tocar el sustrato y su geometría solo se ve influenciada por el ángulo entre gotas θ como se muestra en la Figura 6.2. Cuando se alcanza la condición límite, $W_0 = W_{0máx}$ la segunda gota y las gotas posteriores tocan el sustrato, la columna cae y la deposición pasa a ser horizontal.

-Sin embargo, experimentalmente las condiciones son distintas. La segunda gota llega a tocar al sustrato y la columna se mantiene inclinada sin llegar a caer. Ahora, la segunda gota se ve influenciada por el ángulo de solidificación al estar apoyada sobre el sustrato, y por otro lado, depende del ángulo de contacto entre gotas por seguir teniendo una gota depositada sobre ella (Figura 6.6). Por tanto, la condición en la que nos encontramos experimentalmente no es explicada por el modelo teórico y es por esto, por lo que los valores obtenidos presentan notables diferencias.

-Además, otro de los aspectos que el modelo teórico no tiene en cuenta, es el fenómeno transitorio que se da entre las cuatro o cinco primeras gotas de la columna al pasar del modo vertical de deposición al horizontal. Existe una interfase, donde las primeras gotas de la columna se solapan por efectos de capilaridad y tensión superficial generando una especie de base que mantiene la columna inclinada el mayor tiempo posible para evitar pasar al modo de horizontal de deposición. Esta puede ser una de las causas de que los valores obtenidos de inclinación máxima de la columna teórica y experimentalmente presenten un error del 55,4% calculado en capítulos anteriores.

7.1.2. Modelo teórico de predicción de la rugosidad

Con el objetivo de estudiar la rugosidad lateral de las columnas depositadas, se ha hecho uso del modelo geométrico desarrollado por los autores Qi L. y Chao [7]. El cual se fundamenta en la altura media aritmética y modela el perfil superior de las gotas sobre el sustrato representado por una secuencia periódica de arcos de circunferencia.

Así, mediante la expresión 4.29, la rugosidad teórica se ve influenciada por los siguientes parámetros: el radio inicial de la gota R_i , la distancia entre centros de gotas consecutivas medida en la dirección de la columna W_d' y el ángulo de solidificación θ_s .

La validez del modelo puede estimarse en función de los resultados discutidos en el capítulo 6 de este trabajo. Mostrando que la tendencia de la rugosidad teórica es lineal y creciente con el paso horizontal W_0 y se ajusta en general a los resultados obtenidos experimentalmente. Las diferencias más notables se dan para los pasos de 0 y 8 μm y el error disminuye ligeramente conforme aumenta el paso, oscilando entorno a valores del 17 y 24 %.

Estas inexactitudes pueden deberse a las restricciones y fundamentos en los que el modelo se basa y en los aspectos que en la realidad suceden y no se tienen en cuenta:

- Las principales premisas en las que el modelo se fundamenta (geometría de casquete esférico de la gota depositada, perfil de sección transversal simétrica y gotas perfectamente uniformes) se ven truncadas por lo que en la realidad acontece, donde debido tanto al error de deposición de la máquina, como a los propios fenómenos de capilaridad y tensión superficial de las gotas de la columna, el perfil no resulta simétrico y las gotas no son uniformes en toda la columna. Existiendo un transitorio entre las gotas iniciales donde el radio de la gota es mayor.
- Por otra parte el modelo teórico ha sido desarrollado en condiciones que difieren a las llevadas a cabo en este experimento, realizando la deposición de gotas en distintas capas con el objetivo de generar superficies. Donde se distinguen dos perfiles laterales (lado derecho y lado izquierdo) y condiciones de soporte diferentes según la posición de la gota dentro de una misma capa o nivel.
- Finalmente el material utilizado no es el mismo que se emplea en este trabajo. El modelo teórico fue aplicado a microgotas de metal con propiedades y parámetros característicos distintos al material polimérico usado en este estudio.

7.1.3. Método experimental de medida de la rugosidad

Debido a que no se ha podido utilizar un rugosímetro para medir la rugosidad de las columnas de parafina, se ha empleado una expresión de la rugosidad aritmética media en función de los parámetros medidos experimentalmente.

Así, se ha demostrado que el modelo empleado en la rugosidad experimental no se ajusta completamente al modelo teórico. En las gráficas obtenidas en capítulos anteriores, la rugosidad experimental se mantiene constante y siempre por encima de la tendencia teórica. Llegando a confundir su comportamiento, debido a que los resultados de máxima rugosidad experimental que arroja, se corresponden con las columna de $0 \mu\text{m}$. Oponiéndose totalmente a lo estimado por el modelo teórico.

Estas discrepancias, ocurren porque el modelo no considera los siguientes aspectos:

- El radio de las gotas depositadas r va incrementándose con el paso horizontal W_0 . Así, las gotas de las columnas inclinadas de $24 \mu\text{m}$ son mayores que las verticales de $0 \mu\text{m}$. Dado que este parámetro se encuentra en el denominador de la expresión del modelo, la rugosidad toma valores más grandes en los pasos iniciales. Si el radio r se mantuviera constante, los valores de rugosidad seguirían una tendencia creciente más clara como el modelo teórico.
- El efecto transitorio de las primeras gotas tampoco es considerado por el modelo. Las gotas iniciales presentan unas dimensiones de radio mayores a las del resto de la columna hasta que la morfología se estabiliza (entorno a la 4ª gota) y el radio r se mantiene constante. A pesar de ello, para descartar esta influencia, en las mediciones se han tomado medidas de los radios de las gotas a partir de la 5ª gota cuando la columna ya se encontraba estable.

7.2 Parámetros de estudio

7.2.1. Máximo desplazamiento horizontal entre dos gotas

Según se ha comprobado mediante los experimentos realizados en el presente trabajo, el modelo que predice el desplazamiento máximo entre los centros de las dos primeras gotas de la columna no se ajusta a los valores estimados en la realidad. Se concluye que esto es debido a unas condiciones reales de geometría y posicionamiento de las primeras gotas diferente a las que el modelo teórico tiene en cuenta. La explicación y las causas de ello quedan reflejadas en apartado 7.1.1 concluyendo que:

- El modelo teórico no puede ser aplicado para las condiciones que se tienen experimentalmente, donde las primeras gotas de la columna comienzan a apoyarse sobre el sustrato. Resultando válido y aplicable únicamente cuando la condición entre las gotas iniciales es de una gota sobre otra.
- Se demuestra experimentalmente que la columna puede ser más inclinada sin llegar a caer y pasar a formar un cordón horizontal, en contraposición con lo que el modelo teórico predice.
- Existen fenómenos transitorios entre las cuatro primeras gotas que el modelo teórico no tiene en cuenta y que no se estudian en este trabajo, pero provocan la existencia de una interfase entre un modo de deposición y otro, donde las gotas iniciales se solapan para mantener la morfología inclinada de la columna el mayor tiempo posible antes de pasar al modo horizontal de deposición.

7.2.2. Rugosidad superficial

Con respecto a la rugosidad, pueden concluirse los siguientes aspectos más destacables:

- La rugosidad teórica es creciente con el paso horizontal y sigue una tendencia lineal hasta un valor determinado. En concreto, entre 24 y 32 μm . Donde se produce el cambio del modo de deposición vertical al horizontal y la rugosidad teórica abandona su tendencia lineal para crecer exponencialmente.
- La rugosidad experimental no sigue una tendencia visiblemente creciente, sino que parece mantenerse constante y siempre ligeramente superior a la rugosidad teórica.
- El ajuste de los resultados teóricos y experimentales resulta válido pero con ciertos matices que es necesario considerar y explican estas pequeñas diferencias: uno es que el modelo experimental no tiene en cuenta que el radio r de las gotas de la columna va incrementando su valor conforme el paso aumenta, provocando discrepancias sobre todo en pasos iniciales entre los modelos teórico y experimental, por otro lado ambos modelos no tienen en cuenta los fenómenos transitorios de solapamiento entre las gotas iniciales que se dan en el cambio del modo de deposición.
- Se concluye por tanto que el modelo experimental no es del todo consistente y se precisa de otro método como es el rugosímetro, si se quieren obtener resultados más precisos.
- Para finalizar, el ángulo de inclinación influye en la rugosidad teórica disminuyendo a medida que la rugosidad crece. Como era de esperar, las columnas más inclinadas presentan mayor rugosidad superficial.

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hoath, S. D. *Fundamentals of inkjet printing: the science of inkjet and droplets* (2016)
- [2] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [3] B. Derby, “Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution,” *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 395–414, Jun. 2010.
- [4] Y. Guo, H. S. Patanwala, B. Bognet, and A. W. K. Ma, “Inkjet and inkjet-based 3D printing: connecting fluid properties and printing performance,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 562–576, Apr. 2017.
- [5] F. Gao and A. A. Sonin, “Precise Deposition of Molten Microdrops: The Physics of Digital Microfabrication,” *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 2006.
- [6] L. Qi, Y. Chao, J. Luo, J. Zhou, X. Hou, and H. Li, “A novel selection method of scanning step for fabricating metal components based on micro-droplet deposition manufacture,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 56, pp. 50–58, May 2012.
- [7] L. Qi, S. Zhong, J. Luo, D. Zhang, and H. Zuo, “Quantitative characterization and influence of parameters on surface topography in metal micro-droplet deposition manufacture,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 88, pp. 206–213, Jan. 2015.
- [8] D. Zhang, L. Qi, J. Luo, H. Yi, W. Xiong, and Y. Mo, “Parametric mapping of linear deposition morphology in uniform metal droplet deposition technique,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 264, pp. 234–239, Feb. 2019.

- [9] Kruth, «Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, » CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 40, pp. 603-614, 1991
- [10] Fabricación aditiva. La evidencia de una necesidad - Metalmecánica.” Disponible en:<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/116342fabricacion-aditiva-La-evidencia-de-una-necesidad.html>. Consulta:2 de mayo,2019.
- [11] García Perez, M. Estudio teórico y experimental del acabado superficial en la deposición de gotas sobre superficies planas horizontales en procesos de impresión “material jetting”(2019).
- [12] Faura Mateu.F. Modelo geométrico del desplazamiento o distancia horizontal máxima entre gotas sucesivas de la columna en deposiciones verticales.
- [13] 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
- [14] H. Tan, J. Chen, F. YZhang, X. Lin, W.D. Huang, Process analysis for laser solid forming of thin-walled structure, International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 (2010) 1–8
- [15] D. Ahn, H. Kim, S. Lee, Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing, J. Mater. Process. Technol. 209 (2009) 664–671. [16] E.S. Gadelmaw
- [16] López Rodríguez, J. Fundamentos de metrología, tolerancias y ajustes en fabricación mecánica. (2017).
- [17] Ink-Jet Microdispensing Basic Set-up..MicroFab Technologies Copyright 2012 MicroFab Technologies, Inc., Plano, TX, USA
- [18] Jetlab Control Program Tutorial Guide.Micro Fab 2013.

ANEXOS

Para todas las medidas llevadas a cabo en el desarrollo de este trabajo, se han aplicado una serie de tratamientos estadísticos con el fin de representarlas de forma correcta y precisa, asignándole a cada una de ellas su respectiva variabilidad.

Así, entre las mediciones efectuadas, se distinguen: medidas directas, obtenidas directamente de los datos proporcionados por el software de tratamiento de imagen y medidas indirectas, cuyo valor depende de otras variables o medidas directas ya calculadas.

Según lo expuesto en el apartado 3.2.3 de la metodología, se aplicará el Criterio de rechazo de Chauvenet para filtrar las medidas directas realizadas, eliminando aquellos valores numéricos que se hayan obtenido de forma incorrecta debido a errores accidentales o por falta de precisión.

Posteriormente, se procederá a determinar la expresión final de las medidas directas con el uso de intervalos de confianza y parámetros estadísticos que permiten determinar el valor promedio y la variabilidad de las mediciones.

Finalmente, se presentarán las medidas indirectas aplicando la ley de propagación de varianzas con el uso de la distribución t de Student y determinados factores estadísticos, determinando las incertidumbres asociadas a los diferentes parámetros que influyen y que por tanto, condicionan la medida indirecta final.

A.1 Expresión final de las medidas directas y Criterio de rechazo de Chauvenet

Se definirá para cada una de las medidas realizadas los límites del intervalo de rechazo. Eliminando todas aquellas que no se encuentren dentro del rango y repitiendo de nuevo el proceso.

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

A modo de ejemplo, se muestra el criterio aplicado y la expresión final para el radio de la gota depositada R_c . Posteriormente se recogerán los datos obtenidos mediante el uso de tablas.

Aplicación del criterio de Chauvenet: radio de la gota depositada R_c

-Medidas realizadas: $n=3$

-Media R_c : 50,4844967

-Desviación típica (s): 1,505

- $k(n)=1,38$.

Límites:

$$50,484 - 1,38 \cdot 1,505 \leq x_i \leq 50,484 + 1,38 \cdot 1,505$$

Intervalo: [49'085,51'887]

Comprobación:

1ª medida

$$49,085 \leq 51,495 \leq 51,887$$

2º medida

$$49,085 \leq 51,204 \leq 51,887$$

3º medida

$$49,085 \leq 48,754 \leq 51,887$$

Rechazamos la 3ª medida, y volvemos a aplicar Chauvenet, ahora $n=2$. Por tanto según la tabla 3.9, $k(n)=1,15$.

-Media R_s : 51,3497

-Desviación típica (s): 0,2025

Límites:

$$51,3497 - 1,15 \cdot 0,2025 \leq x_i \leq 51,3497 + 1,15 \cdot 0,2025$$

Intervalo: [51'113,51,586]

Comprobación:

1ª medida

$$51,113 \leq 51,495 \leq 51,586$$

2º medida

$$51,113 \leq 51,204 \leq 51,586$$

Expresión final de la medida directa con un nivel de confianza del 95%:

$$\bar{x} \pm t_{0,975;n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Según la tabla de la distribución t de Student (Tabla 3.10): $t_{0,975;n-1=1} = 12,7062$

Desviación típica (s): 0,2025

n=2

Por tanto:

$$Rs: 51,3497, \pm 1,8467 \mu\text{m}$$

A continuación se procederá a mostrar los resultados de las medidas directas en forma de tablas:

Medidas directas: $h_c, a, y, R_c, h, r, W'_d$

▪ **Altura del casquete esférico**

Chauvenet aplicado a la altura del casquete esférico: h_c				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Media h_c :	34,995	32,780	34,441	34,998
Desviación típica (s):	0,852	1,383	0,507	0,248
k(n)	1,380			
Lím.Inferior	33,819	30,871	33,741	34,655
Lím.Superior	36,171	34,689	35,141	35,341
n	3,000			
Medidas rechazadas	0,000	1,000	0,000	0,000
$t_{0,975;n-1}$	4,303			
Variabilidad	2,117	3,437	1,260	0,617
\bar{h}_c	35	32,780	34,441	34,998

Expresión final de la medida:

Placa 1:

$$h_c: 35 \pm 2,11 \mu\text{m}$$

Placa 2:

$$h_c: 32,78 \pm 3,44 \mu\text{m}$$

Placa 3:

$$h_c: 34,44 \pm 0,51 \mu\text{m}$$

Placa 4:

$$h_c: 35 \pm 0,62 \mu\text{m}$$

▪ **Anchura del casquete esférico**

Chauvenet aplicado a la altura del casquete esférico: a				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Media a :	47,267	48,617	47,500	48,083
Desviación típica (s):	1,862	0,252	0,444	0,382
k(n)	1,380			
Lím.Inferior	44,698	48,269	46,887	47,556
Lím.Superior	49,836	48,964	48,113	48,610
n	3,000			
Medidas rechazadas	0,000	0,000	0,000	0,000
$t_{0,975;n-1}$	4,303			
Variabilidad	4,625	0,625	1,104	0,949
\bar{a}	47,267	48,617	47,500	48,083

Expresión final de la medida:

Placa 1:

$$a: 47,27 \pm 4,63 \mu\text{m}$$

Placa 2:

$$a: 48,62 \pm 0,63 \mu\text{m}$$

Placa 3:

$$a: 47,5 \pm 1,10 \mu\text{m}$$

Placa 4:

$$a: 48,08 \pm 0,95 \mu\text{m}$$

▪ **Radio de la gota solidificada**

Chauvenet aplicado al radio de la gota solidificada: R_c				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Media R_c :	50,484	52,381	49,931	50,710
Desviación típica (s):	1,506	0,383	0,553	0,608
k(n)	1,380			
Lím.Inferior	48,407	51,852	49,168	49,871
Lím.Superior	52,562	52,909	50,694	51,549
n	2,000			
Medidas rechazadas	1,000	0,000	0,000	0,000
$t_{0,975;n-1}$	12,706	4,303	4,303	4,303
Variabilidad	13,527	3,442	4,969	5,461
$\overline{R_c}$	50,484	52,381	49,931	50,710

Expresión final de la medida:

Placa 1:

$$R_c: 50,84 \pm 13,5 \mu\text{m}$$

Placa 2:

$$R_c: 52,38 \pm 3,44 \mu\text{m}$$

Placa 3:

$$R_c: 49,93 \pm 4,97 \mu\text{m}$$

Placa 4:

$$R_c: 50,71 \pm 5,41 \mu\text{m}$$

▪ **Distancia al sustrato**

Chauvenet aplicado desde el centro de la gota al sustrato : y				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Media y :	15,450	20,055	15,512	34,998
Desviación típica (s):	2,198	1,430	0,903	0,248
k(n)	1,380			
Lím.Inferior	12,417	18,082	14,265	34,655
Lím.Superior	18,484	22,029	16,759	35,341
n	3,000			
Medidas rechazadas	0,000	0,000	0,000	0,000
t	4,303			
Variabilidad	5,462	3,553	2,245	0,617
\bar{y}	15,450	20,055	15,512	17,412

Expresión final de la medida:

Placa 1:

$$y: 15,45 \pm 5,46 \mu\text{m}$$

Placa 2:

$$y: 20,05 \pm 3,55 \mu\text{m}$$

Placa 3:

$$y: 15,51 \pm 2,25 \mu\text{m}$$

Placa 4:

$$y: 17,41 \pm 0,62 \mu\text{m}$$

▪ **Distancia entre centros de gotas sucesivas**

Chauvenet aplicado a distancia entre centros : h				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Media h :	31,01	30,51	31,6	30,87
Desviación típica (s):	0,363	0,652	0,667	0,363
k(n)	1,86			
Lím.Inferior	30,335	29,297	30,359	30,195
Lím.Superior	31,685	31,723	32,841	31,545
n	7			
Medidas rechazadas	0,000	0,000	0,000	0,000
t	4,303			
Variabilidad	1,371	1,413	0,507	0,572
\bar{y}	31,01	30,51	31,6	30,87

Expresión final de la medida:

Placa 1:

$$h: 31,01 \pm 1,37\mu\text{m}$$

Placa 2:

$$h: 30,51 \pm 1,41\mu\text{m}$$

Placa 3:

$$h: 31,6 \pm 0,51\mu\text{m}$$

Placa 4:

$$h: 30,87 \pm 0,57\mu\text{m}$$

▪ **Radio de las gotas de la columna**

Chauvenet aplicado al radio de las gotas de la columna: r				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Media r :	39,13	39,01	36,84	39,13
Desviación típica (s):	0,363	0,652	0,667	0,363
k(n)	1,86			
Lím.Inferior	38,45482	37,91728	37,88938	38,45482
Lím.Superior	39,80518	40,34272	40,37062	39,80518
n	7			
Medidas rechazadas	0,000	0,000	0,000	0,000
t	4,303			
Variabilidad	0,231	0,339	0,342	0,572
\bar{r}	39,13	39,01	36,84	39,13

Expresión final de la medida:

Placa 1:

$$r: 39,13 \pm 0,23\mu\text{m}$$

Placa 2:

$$r: 39,01 \pm 0,34$$

Placa 3:

$$r: 36,84 \pm 0,34\mu\text{m}$$

Placa 4:

$$r: 39,13 \pm 0,19\mu\text{m}$$

▪ **Distancia entre centros medido en la dirección de la columna**

Chauvenet aplicado al radio de las gotas de la columna: $R1$				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Media $R1$:	52,02	51,25	51,3	53,2
Desviación típica (s):	0,53740115	2,757	1,2727	1,272
$k(n)$	1,15			
Lím.Inferior	51,401	48,0786	49,836	51,736
Lím.Superior	52,638	54,421	52,763	54,663
n	2			
Medidas rechazadas	0,000	0,000	0,000	0,000
t	12,706			
Variabilidad	4,828356	6,353	11,437	11,489
$\bar{R1}$	52,02	51,25	51,30	53,21

Expresión final de la medida:

Placa 1:

$$R1: 52,02 \pm 4,83\mu\text{m}$$

Placa 2:

$$R1: 51,25 \pm 6,35\mu\text{m}$$

Placa 3:

$$R1: 51,3 \pm 11,45\mu\text{m}$$

Placa 4:

$$R1: 53,21 \pm 11,49\mu\text{m}$$

▪ **Distancia entre centros medido en la dirección de la columna**

Chauvenet aplicado al radio de las gotas de la columna: R_2				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Media R_2 :	41,3	41,4	40,34	41,295
Desviación típica (s):	0,53740115	2,757	1,2727	1,272
$k(n)$	1,15			
Lím.Inferior	40,974	40,912	39,429	40,636
Lím.Superior	41,625	41,887	41,250	41,953
n	2			
Medidas rechazadas	0,000	0,000	0,000	0,000
t	12,706			
Variabilidad	2,541	3,811	7,1154	5,1460
\bar{R}_2	41,3	41,4	40,34	41,295

Expresión final de la medida:

Placa 1:

$$R_2: 41,30 \pm 2,54 \mu\text{m}$$

Placa 2:

$$R_2: 41,40 \pm 3,81 \mu\text{m}$$

Placa 3:

$$R_2: 40,34 \pm 7,12 \mu\text{m}$$

Placa 4:

$$R_2: 41,29 \pm 5,15 \mu\text{m}$$

▪ **Distancia entre centros medido en la dirección de la columna**

Chauvenet aplicado a la altura del casquete esférico: W'_d				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
Media W'_d :	31,554	31,456	31,653	31,595
Desviación típica (s):	0,691	1,333	0,469	0,507
k(n)	1,54			
Lím.Inferior	30,489	29,404	30,930	30,815
Lím.Superior	32,618	33,508	32,375	32,376
n	4			
Medidas rechazadas	0,000	0,000	0,000	0,000
t	3,182			
Variabilidad	1,100	2,120	0,747	0,806
$\overline{W'_d}$	31,554	31,456	31,653	31,595

Expresión final de la medida:

Placa 1:

$$W'_d: 31,55 \pm 1,10\mu\text{m}$$

Placa 2:

$$W'_d: 31,46 \pm 2,12\mu\text{m}$$

Placa 3:

$$W'_d: 31,65 \pm 0,75\mu\text{m}$$

Placa 4:

$$W'_d: 31,59 \pm 0,81\mu\text{m}$$

A.2 Medidas Indirectas y aplicación de la ley de covarianzas

Como se detalla el apartado 3.2.3 de la metodología, se obtendrán las incertidumbres de cada una de las variables que influyen en la incertidumbre global de la medida final. A continuación, se recogen los resultados obtenidos para cada una de las medidas indirectas que intervienen en el estudio, como son: R_i , θ_s , θ , $W_{0,máx}$, $R_{a,exp}$, $R_{a,teór}$.

- Radio de la gota de caída

Placa 1. Radio inicial $R_i(\mu\text{m})$							
$\frac{\partial R_i}{\partial a}$	0,38887927	$\left(\frac{\partial R_i}{\partial a}\right)^2$	0,15122708	u_h^2	0,38509259	UR_i	0,80261107
$\frac{\partial R_i}{\partial h}$	0,40658297	$\left(\frac{\partial R_i}{\partial h}\right)^2$	0,16530971	u_a^2	0,08069477	\bar{R}_i	31,9779048
Expresión final	31,977 \pm 0,802 μm						

Placa 2. Radio inicial $R_i(\mu\text{m})$							
$\frac{\partial R_i}{\partial a}$	0,38371448	$\left(\frac{\partial R_i}{\partial a}\right)^2$	0,1472368	u_h^2	0,00703704	UR_i	0,58069645
$\frac{\partial R_i}{\partial h}$	0,41390702	$\left(\frac{\partial R_i}{\partial h}\right)^2$	0,17131902	u_a^2	0,21265289	\bar{R}_i	32,225
Expresión final	32,225 \pm 0,581 μm						

Placa 3. Radio inicial $R_i(\mu\text{m})$							
$\frac{\partial R_i}{\partial a}$	0,38781794	$\left(\frac{\partial R_i}{\partial a}\right)^2$	0,15040276	u_h^2	0,02194444	UR_i	0,269354735
$\frac{\partial R_i}{\partial h}$	0,40803169	$\left(\frac{\partial R_i}{\partial h}\right)^2$	0,16648986	u_a^2	0,02859529	\bar{R}_i	32,470
Expresión final	32,470 \pm 0,270 μm						

Placa 4. Radio inicial $R_i(\mu\text{m})$							
$\frac{\partial R_i}{\partial a}$	0,38801704	$\left(\frac{\partial R_i}{\partial a}\right)^2$	0,15055722	u_h^2	0,0162037	UR_i	0,17948015
$\frac{\partial R_i}{\partial h}$	0,40775762	$\left(\frac{\partial R_i}{\partial h}\right)^2$	0,16626628	u_a^2	0,00685438	\bar{R}_i	32,220
Expresión final	32,220 \pm 0,180 μm						

▪ Ángulo de solidificación

Placa 1. Ángulo de solidificación θ_s							
$\frac{\partial \theta_s}{\partial R_s}$	-0,0063676	$\left(\frac{\partial \theta_s}{\partial R_s}\right)^2$	4,0546E-05	$u_{R_s}^2$	0,251855701	$U\theta_s$	0,046731338
$\frac{\partial \theta_s}{\partial y}$	-0,0208064	$\left(\frac{\partial \theta_s}{\partial y}\right)^2$	0,00043291	u_y^2	0,536918474	$\bar{\theta}_s$	71,022
Expresión final	71,022° \pm 0,047						

Placa 2. Ángulo de solidificación θ_s							
$\frac{\partial \theta_s}{\partial R_s}$	-0,0079124	$\left(\frac{\partial \theta_s}{\partial R_s}\right)^2$	6,2607E-05	$u_{R_s}^2$	0,016306373	$U\theta_s$	0,029711153
$\frac{\partial \theta_s}{\partial y}$	-0,0206658	$\left(\frac{\partial \theta_s}{\partial y}\right)^2$	0,00042707	u_y^2	0,227273926	$\bar{\theta}_s$	67,489
Expresión final	67,489° \pm 0,030						

Placa 3. Ángulo de solidificación θ_s							
$\frac{\partial \theta_s}{\partial R_s}$	-0,0065458	$\left(\frac{\partial \theta_s}{\partial R_s}\right)^2$	4,2847E-05	$u_{R_s}^2$	0,033980954	$U\theta_s$	0,019377939
$\frac{\partial \theta_s}{\partial y}$	-0,0210703	$\left(\frac{\partial \theta_s}{\partial y}\right)^2$	0,00044396	u_y^2	0,090699577	$\bar{\theta}_s$	71,904
Expresión final	71,904° ± 0,020						

Placa 4. Ángulo de solidificación θ_s							
$\frac{\partial \theta_s}{\partial R_s}$	-0,0188068	$\left(\frac{\partial \theta_s}{\partial R_s}\right)^2$	0,0003537	$u_{R_s}^2$	0,041057596	$U\theta_s$	0,013285551
$\frac{\partial \theta_s}{\partial y}$	-0,0272501	$\left(\frac{\partial \theta_s}{\partial y}\right)^2$	0,00074257	u_y^2	0,006854376	$\bar{\theta}_s$	69,906
Expresión final	69,906° ± 0,013						

▪ Ángulo entre gotas

Placa 1. Ángulo entre gotas θ							
$\frac{\partial \theta}{\partial y}$	0,027836114	$\left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)^2$	0,00077484 9	$u_{R_s}^2$	0,2442328	$U\theta$	0,0416165 5
$\frac{\partial \theta}{\partial R_j}$	- 0,022063601	$\left(\frac{\partial \theta}{\partial R_j}\right)^2$	0,00048680 2	u_y^2	0,0065608 5	$\bar{\theta}$	46,698
Expresión final	46,698° ± 0,042						

Placa 2.Ángulo entre gotas θ							
$\frac{\partial\theta}{\partial y}$	0,027849491	$\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)^2$	0,00077559 4	$u_{R_s}^2$	0,2594179 9	U_θ	0,043280 3
$\frac{\partial\theta}{\partial R_j}$	- 0,021781953	$\left(\frac{\partial\theta}{\partial R_j}\right)^2$	0,00047445 3	u_y^2	0,0146031 7	$\bar{\theta}$	46,067
Expresión final	46,067° ± 0,043						

Placa 3.Ángulo entre gotas θ							
$\frac{\partial\theta}{\partial y}$	0,03005967 8	$\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)^2$	0,00090358 4	$u_{R_s}^2$	0,0674074 1	U_θ	0,0252237 7
$\frac{\partial\theta}{\partial R_j}$	-0,02579209	$\left(\frac{\partial\theta}{\partial R_j}\right)^2$	0,00066523 2	u_y^2	0,0147089 9	$\bar{\theta}$	50,740
Expresión final	47,458° ± 0,025						

Placa 4.Ángulo entre gotas θ							
$\frac{\partial\theta}{\partial y}$	0,02820296	$\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)^2$	0,00079540 7	$u_{R_s}^2$	0,0424867 7	U_θ	0,0180452 6
$\frac{\partial\theta}{\partial R_j}$	- 0,022514442	$\left(\frac{\partial\theta}{\partial R_j}\right)^2$	0,0005069	u_y^2	0,0047089 9	$\bar{\theta}$	47,064
Expresión final	47,064° ± 0,018						

▪ **Desplazamiento máximo entre gotas**

Placa 1. Desplazamiento máximo entre gotas consecutivas $W_{0,máx.}(\mu\text{m})$					
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R1}$	0,94564352	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R1}\right)^2$	0,89424166	u_{R2}^2	0,32035126
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R2}$	-0,8868496	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R2}\right)^2$	0,78650221	u_{R2}^2	0,00074307
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta_s}$	36,0010172	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta_s}\right)^2$	1296,07324	$u_{\theta_s}^2$	0,00024263
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta}$	11,8273495	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta}\right)^2$	139,886196	u_{θ}^2	0,00019238
$U_{w0,max.}$	2,378219212				
$\overline{W_{0,max}}$	12,34601775				
Resultado final	12,346 \pm 2,378 μm				

Placa 2. Desplazamiento máximo entre gotas consecutivas $W_{0,máx.}(\mu\text{m})$					
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R1}$	0,92380605	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R1}\right)^2$	0,85341761	u_{R2}^2	0,31056914
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R2}$	-0,9166699	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R2}\right)^2$	0,84028372	u_{R2}^2	0,03420931
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta_s}$	36,620897	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta_s}\right)^2$	1341,0901	$u_{\theta_s}^2$	0,00009801
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta}$	-36,278241	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta}\right)^2$	1316,11075	u_{θ}^2	0,00020813
$U_{w0,max.}$	2,50845817				
$\overline{W_{0,max}}$	12,2584277				
Resultado final	12,258 \pm 0,018 μm				

Placa 4. Desplazamiento máximo entre gotas consecutivas $W_{0,máx.}(\mu m)$					
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R1}$	0,93913023	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R1}\right)^2$	0,8819656	u_{R2}^2	0,357576357
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R2}$	-0,8912441	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial R2}\right)^2$	0,79431607	u_{R2}^2	0,016864869
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta_s}$	37,1033677	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta_s}\right)^2$	1376,6599	$u_{\theta_s}^2$	1,95954E-05
$\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta}$	31,1541351	$\left(\frac{\partial W_{0,máx.}}{\partial \theta}\right)^2$	970,580132	u_{θ}^2	3,61802E-05
$U_{w0,max.}$	1,87555926				
$\overline{W_{0,max}}$	12,9306228				
Resultado final	$12,931 \pm 1,880 \mu m$				

▪ **Rugosidad teórica**

Placa 1.Medida de la rugosidad Ra(μm)				
Paso	0	8	16	24
$\frac{\partial R_a}{\partial R_i}$	0,019528196	-0,0179246	-0,0185468	-0,0205913
$\frac{\partial R_a}{\partial W}$	0,003636838	0,01183316	0,02171752	0,03616021
$\frac{\partial R_a}{\partial h_v}$	0,039943171	0,03655899	0,03249902	0,01971542
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta_s}$	0,035636195	0,03827903	0,04519116	0,06261408
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial W}\right)^2$	0,00038135	0,00032129	0,00034398	0,000424
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial R_i}\right)^2$	1,32266E-05	0,00014002	0,00047165	0,00130756
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial h_v}\right)^2$	0,001595457	0,00133656	0,00105619	0,0003887
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial \theta_s}\right)^2$	0,001269938	0,00146528	0,00204224	0,00392052
u_{Ri}^2	0,071576403			
u_W^2	0,171099793	0,96680361	0,75504459	0,40266208
u_{Hv}^2	0,244230345	0,70194942	1,97020881	1,18183525
$u_{\theta_s}^2$	2,69592E-05			
U_{Ra}	0,033209269	0,07915372	0,19336331	0,07329572
$\overline{R_{a,teór.}}$	0,5156	0,6219	0,6515	0,6765

Placa 2.Medida de la rugosidad Ra(μm)				
Paso	0	8	16	24
$\frac{\partial R_a}{\partial R_i}$	-0,019536776	-0,0193468	-0,019579	-0,0213889
$\frac{\partial R_a}{\partial W}$	0,003732748	0,0131161	0,0248557	0,03731993
$\frac{\partial R_a}{\partial h_v}$	0,039943171	0,03770553	0,03154467	0,01921412
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta_s}$	0,035650927	0,03894619	0,04823748	0,06439026
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial W}\right)^2$	0,000381686	0,0003743	0,00038334	0,00045748
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial R_i}\right)^2$	1,39334E-05	0,00017203	0,00061781	0,00139278
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial h_v}\right)^2$	0,001595457	0,00142171	0,00099507	0,00036918
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial \theta_s}\right)^2$	0,001270989	0,00151681	0,00232685	0,00414611
u_{Ri}^2	0,037466764			
u_W^2	0,171099793	0,96680361	0,75504459	0,40266208
u_{Hv}^2	0,244230345	0,70194942	1,97020881	1,18183525
$u_{\theta_s}^2$	0,00001089			
U_{Ra}	0,033212835	0,08189617	0,18805015	0,07184971
$\overline{R_{a,teór.}}$	0,5909	0,5865	0,5912	0,6456

Placa 3.Medida de la rugosidad Ra (μm)				
Paso	0	8	16	24
$\frac{\partial R_a}{\partial R_i}$	0,019476562	-0,01994	-0,0195198	-0,0217941
$\frac{\partial R_a}{\partial W}$	0,002995521	0,01237	0,02472276	0,03722233
$\frac{\partial R_a}{\partial h_v}$	0,039943171	0,0386	0,03157183	0,02024458
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta_s}$	0,03554754	0,03855	0,04810011	0,06423862
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial W}\right)^2$	0,000379336	0,0004	0,00038102	0,00047498
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial R_i}\right)^2$	8,97315E-06	0,00015	0,00061122	0,0013855
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial h_v}\right)^2$	0,001595457	0,00149	0,00099678	0,00040984
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial \theta_s}\right)^2$	0,001263628	0,00149	0,00231362	0,0041266
$u_{R_i}^2$	0,008061047			
u_W^2	0,171099793	0,9668	0,75504459	0,40266208
$u_{H_v}^2$	0,244230345	0,70195	1,97020881	1,18183525
$u_{\theta_s}^2$	4,63206E-06			
U_{Ra}	0,033187831	0,08371	0,18819536	0,07538964
$\overline{R_{a,teór.}}$	0,6408	0,6412	0,6321	0,6698

Placa 4. Medida de la rugosidad Ra(μm)				
Paso	0	8	16	24
$\frac{\partial R_a}{\partial R_i}$	-0,019460146	-0,0200733	-0,0200471	-0,0220867
$\frac{\partial R_a}{\partial W}$	0,002760587	0,0131161	0,02425836	0,03769364
$\frac{\partial R_a}{\partial h_v}$	0,039943171	0,03849101	0,03260303	0,01996585
$\frac{\partial R_a}{\partial \theta_s}$	0,035519354	0,03894619	0,04762599	0,06497455
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial W}\right)^2$	0,000378697	0,00040294	0,00040188	0,00048782
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial R_i}\right)^2$	7,62084E-06	0,00017203	0,00058847	0,00142081
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial h_v}\right)^2$	0,001595457	0,00148156	0,00106296	0,00039864
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial \theta_s}\right)^2$	0,001261624	0,00151681	0,00226823	0,00422169
u_{Ri}^2	0,00357935			
u_W^2	0,171099793	0,96680361	0,75504459	0,40266208
u_{Hv}^2	0,244230345	0,70194942	1,97020881	1,18183525
$u_{\theta_s}^2$	2,17726E-06			
U_{Ra}	0,033181023	0,08361129	0,19424183	0,07454346
$\overline{R_{a,teór.}}$	0,6228	0,6192	0,6129	0,658

Por tanto, para cada paso se tiene una rugosidad global calculada a partir de las tablas anteriores:

Para un paso de 0 μm:

$$\overline{R_{a,teór.}} = 0,60 \pm 0,03 \mu\text{m}$$

Para un paso de 8 μm:

$$\overline{R_{a,teór.}} = 0,61 \pm 0,08 \mu\text{m}$$

Para un paso de 16 μm:

$$\overline{R_{a,teór.}} = 0,62 \pm 0,19 \mu\text{m}$$

Para un paso de 24 μm:

$$\overline{R_{a,teór.}} = 0,67 \pm 0,07 \mu\text{m}$$

▪ **Rugosidad experimental**

Placa 1.Medida de la rugosidad Ra exp.(μm)				
Paso	0	8	16	24
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial h}\right)^2$	0,002700735	0,002700735	0,002700735	0,002700735
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial r}\right)^2$	0,000443109	0,000443109	0,000443109	0,000443109
u_h^2	0,071576403	0,07487103	0,05673821	0,04513321
u_r^2	0,171099793	0,236680361	0,125504459	0,40236208
U_{Ra}	0,0337	0,0345	0,0199	0,0072
$\overline{R_{a,exp.}}$	0,8518	0,7769	0,87897	0,7546

Placa 2.Medida de la rugosidad Ra exp.(μm)				
Paso	0	8	16	24
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial h}\right)^2$	0,001595457	0,001328156	0,00116296	0,00039864
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial r}\right)^2$	0,001595457	0,00148156	0,00106296	0,00039864
u_h^2	0,031576403	0,03456123	0,05987110	0,032513301
u_r^2	0,237105671	0,1236480361	0,16710293	0,3983123
U_{Ra}	0,0450	0,0312	0,0219	0,0075
$\overline{R_{a,exp.}}$	0,8014	0,7743	0,7483	0,8147

Placa 3.Medida de la rugosidad Ra exp.(μm)				
Paso	0	8	16	24
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial h}\right)^2$	0,00381234	0,00189700735	0,002700735	0,002700735
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial r}\right)^2$	0,000773109	0,000543102	0,000136782	0,000897212
u_h^2	0,081579903	0,064567103	0,05665431	0,0345891076
u_r^2	0,1201099553	0,48363321	0,098255096	0,32025412
U_{Ra}	0,0304	0,0420	0,0110	0,0063
$\overline{R_{a,exp.}}$	0,8620	0,7999	0,7637	0,7513

Placa 4.Medida de la rugosidad Ra exp.(μm)				
Paso	0	8	16	24
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial h}\right)^2$	0,001100735	0,004370689	0,002610787	0,003700790
$\left(\frac{\partial R_a}{\partial r}\right)^2$	0,000772915	0,000243108	0,00077819	0,000231567
u_h^2	0,055157642	0,05631377	0,06647812	0,011513301
u_r^2	0,27109435	0,3245987	0,09876321	0,3994587
U_{Ra}	0,03450	0,0370	0,0213	0,0068
$\overline{R_{a,exp.}}$	0,8263	0,8119	0,7810	0,7863

Por tanto, para cada paso se tiene una rugosidad global experimental calculada como el promedio de los datos de las tablas anteriores:

Para un paso de 0 μm :

$$\overline{R_{a,exp.}} = 0,81 \pm 0,04 \mu\text{m}$$

Para un paso de 8 μm :

$$\overline{R_{a,exp.}} = 0,79 \pm 0,04 \mu\text{m}$$

Para un paso de 16 μm :

$$\overline{R_{a,exp.}} = 0,77 \pm 0,02 \mu\text{m}$$

Para un paso de 24 μm :

$$\overline{R_{a,exp.}} = 0,78 \pm 0,01 \mu\text{m}$$