

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 444 021**

21 Número de solicitud: 201200170

51 Int. Cl.:

B05B 7/06 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

22.02.2012

43 Fecha de publicación de la solicitud:

21.02.2014

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2013/000046

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DE SEVILLA (50.0%)
Otri- Pabellón de Brasil, Paseo de las Delicias s/n
41012 Sevilla ES y
UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA (50.0%)**

72 Inventor/es:

**GAÑAN CALVO, Alfonso Miguel;
HERRADA GUTIÉRREZ, Miguel Angel;
MONTANERO FERNÁNDEZ, Jose Maria;
CABEZAS MARTÍN, María Guadalupe y
VEGA RODRÍGUEZ, Emilio José**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para microfabricación y micro-soldadura**

57 Resumen:

Dispositivo para microfabricación y micro-soldadura mediante deposición de material en fase líquida (1), que comprende dos boquillas, ambas con un orificio de descarga en un extremo, colocadas una (A) en el interior de la otra (B) de forma que los orificios de descarga de ambas queden enfrentados, separados y concéntricos, y alimentadas cada una de ellas per el extremo opuesto al del orificio de descarga. El dispositivo produce micro-gotas de tamaño uniforme y de baja energía cinética debido a la rotura de un chorro por la acción de fuerzas capilares. El aspecto diferencial del dispositivo descrito en esta invención es que utiliza una corriente de gas (2) de suficiente velocidad que rodea al chorro y lo estabiliza para producir chorros de baja energía cinética, que no serian estables de no existir esta corriente. El dispositivo se utiliza para la micro-fabricación de piezas o sistemas, o la realización de micro-recargues o micro-soldaduras mediante deposición controlada, ordenada y sucesiva de gotas de material.

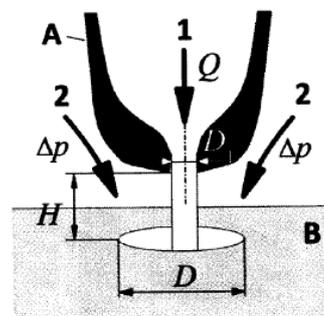


Figura 1

DESCRIPCIÓN

Título: Procedimiento y dispositivo para microfabricación y micro-soldadura

Sector de la técnica

El dispositivo y procedimiento que se describen en esta invención se enmarca dentro de los procesos de deposición de material en fase líquida que se utilizan en fabricación por capas (o fabricación aditiva), y en la realización de soldaduras y recargues. Más concretamente, esta invención se podría enmarcar en la familia de procesos en las que el material que se deposita en forma de gotas y de forma continua procede de la rotura de un chorro estable del material. Los procesos más representativos de esta familia son, probablemente, los procesos de fabricación aditivos que utilizan tecnología de inyección de tinta (*ink-jet technology*).

Estado de la técnica

Los procesos de fabricación aditivos (*AM Additive Manufacturing*), también conocidos como procesos de fabricación por capas, son capaces de producir un objeto a partir de su modelo CAD tridimensional, fabricándolo capa a capa y uniendo cada capa a la anterior. Originalmente, los procesos AM se utilizaban para fabricar prototipos usando una variedad muy limitada de materiales poliméricos. En la actualidad, permiten fabricar objetos funcionales en distintos materiales. La aplicación de estos procesos a la fabricación de componentes metálicos resulta muy interesante, especialmente en sectores en los que los objetos tienen formas complejas y el volumen de producción es bajo. Sin embargo, el número de procesos AM que permiten fabricar objetos metálicos es todavía reducido.

Los procesos AM abordan la preparación de la fabricación de forma similar, aunque producen las capas con tecnologías diferentes. Para comenzar a fabricar es necesario disponer de un fichero con la geometría tridimensional del objeto, que normalmente se exporta al formato STL, y que aproxime la superficie del objeto mediante una malla de triángulos. El programa específico de la máquina analiza la geometría y la descompone en capas paralelas y muy finas, y calcula las trayectorias de los elementos móviles de la máquina y los parámetros del proceso para producir esa sección. Esta información se transfiere a la máquina, que comienza a fabricar el objeto, capa a capa, uniendo cada capa fabricada a la anterior. Finalmente el objeto fabricado se extrae de la máquina y, si es necesario, se realizan operaciones de acabado. Esta forma de trabajar proporciona a los procesos AM capacidades únicas: (i) permiten producir objetos de formas complejas sin imponer prácticamente limitaciones a la geometría, (ii) permiten producir directamente productos funcionales formados por varias piezas, y (iii) permiten producir objetos de materiales compuestos,

con una composición específica en un punto o una capa del mismo. La fabricación es directa y muy flexible, no requiere el uso de utillaje complejo, y altamente automatizada (la fabricación se produce en la máquina prácticamente sin necesidad de supervisión de la operación).

5 Las tecnologías utilizadas en la fabricación de las capas pueden clasificarse en cuatro grupos en función de la forma del material de partida: (i) un baño de resinas fotocurables, (ii) un lecho de partículas discretas, (iii) láminas de material sólido, o (iv) material fundido. En la fabricación de componentes metálicos, las tecnologías se enmarcan principalmente en el segundo y el cuarto grupo. La tecnología que se
10 presenta en esta invención corresponde al último grupo, es decir, a las tecnologías que trabajan con material fundido.

Los procesos aditivos que depositan material fundido tienen que abordar dos problemas: primero, el material de partida debe pasar a estado líquido, y en segundo lugar, la fase líquida debe depositarse de forma adecuada para fabricar el objeto capa
15 a capa. Es frecuente que estos procesos utilicen un material auxiliar para crear estructuras soporte para parte de la capa depositada, que, de otra forma, quedaría en voladizo. Este material soporte puede depositarse mediante distintos procesos y se elimina de la pieza fabricada. La tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*, de Stratasys) utiliza un cabezal extrusor para fundir hilo de un material polimérico. El
20 cabezal se desplaza para depositar el material formando la capa correspondiente a la sección del objeto. La tecnología de deposición de material más extendida es, probablemente, la que se basa en cabezales de impresión con chorro de tinta (*ink-jet technology*). Estas técnicas parten de un depósito del material líquido, normalmente un polímero, y producen de manera controlada pequeñas gotas que se depositan para
25 formar la capa.

Para aleaciones de baja temperatura de fusión (aleaciones de estaño o de aluminio) se han desarrollado sistemas de producción controlada de gotas a partir de una masa de metal fundido. El metal se funde en el interior de un depósito-horno, y las gotas se producen cuando el metal fluye hacia el exterior a través de una boquilla con un orificio
30 de pequeño tamaño. El diámetro de las gotas es igual o superior al del orificio de la boquilla. En esta tecnología cabe distinguir entre sistemas que trabajan por rotura de un chorro (modo *jetting*), por una parte, y aquellos que producen gotas a demanda, por otra.

Los sistemas que trabajan en modo *jetting* logran una producción continua de gotas
35 mediante la rotura de un chorro capilar, aplicando principios de "impresión de tinta". Se aplica una presión constante sobre la superficie libre del metal en el depósito para que el metal fundido fluya a través del orificio de la boquilla formando un chorro. Mediante

un piezoeléctrico se transmite una vibración en el metal fundido que se transmite al chorro provocando que éste se rompa en pequeñas gotas iguales. Las gotas formadas están separadas una distancia igual a la longitud de la onda generada por la vibración. Para evitar la coalescencia de las gotas durante la caída, se coloca un electrodo a la salida de la boquilla. De esta forma, las gotas se cargan eléctricamente. Esta carga permite, además, el control de la trayectoria de las gotas, y por lo tanto el control de la deposición. Con este procedimiento se han obtenido gotas de una aleación de estaño de aproximadamente 75 μm de diámetro utilizando boquillas de acero inoxidable con un orificio de 50 μm .

10 Aunque la rotura del chorro capilar permite depositar rápidamente patrones complejos sobre superficies horizontales, pueden presentar problemas en la fabricación de "muros" verticales. En este tipo de geometría es importante controlar el ritmo con el que las gotas se depositan unas sobre otras. Un ritmo excesivo, puede producir la fusión de secciones de espesores bajos.

15 Los sistemas de producción de gotas "a demanda" no presentan esta limitación. Al igual que los anteriores, estos sistemas disponen de un depósito-horno de metal fundido con una boquilla con un orificio en la parte inferior. En este caso, el diámetro del orificio es lo suficientemente pequeño para que la tensión superficial impida la formación de un chorro a través de él. Para producir las gotas, se aplica un pulso de presión sobre la superficie libre del metal en el depósito. La sobrepresión empuja el material a través del orificio formándose una gota (modo *dripping*). Con este procedimiento se han logrado gotas de 1 mm y 0.18 mm, utilizando una boquilla de grafito de 0.3 mm, y una de zafiro artificial de 0.18 mm, respectivamente.

20 Los procesos aditivos de fabricación de objetos metálicos también han utilizado tecnologías típicas de soldadura para producir gotas de la aleación fundida. Estas tecnologías también son frecuentes en otras aplicaciones como la realización de recubrimientos o recargues. Mediante una fuente de energía, se calienta el sustrato o la capa anterior de forma localizada, produciendo un baño fundido que se desplaza con la fuente de energía de manera controlada. El metal de aportación se introduce fundido en ese baño de forma que, al cesar el calentamiento, solidifica y queda soldado a la capa anterior. Se puede utilizar el metal de aportación en forma de partículas, que son arrastradas mediante una corriente de gas dirigida hacia el foco de calor, o en forma de hilo, que avanza hacia la fuente de calor produciéndose la fusión del extremo. Algunos investigadores han combinado ambos métodos y utilizan partículas e hilo simultáneamente.

35 La técnica más extendida y que ha recibido más atención es la Deposición Directa de Metal por Láser (también conocida por los nombres comerciales: *Laser Engineered*

Net Shaping, LENS, o *Direct Light Fabrication*, DLF). Esta técnica utiliza un haz láser de alta energía para producir un baño fundido en el sustrato. El material se aporta generalmente en forma de polvo mediante el flujo de un gas inerte, que actúa además como atmósfera protectora. La Deposición Directa de Metal por Láser se ha aplicado con éxito a la fabricación de componentes metálicos, produciendo piezas de densidad completa y características mecánicas iguales o superiores a las de las técnicas convencionales, aunque con una rugosidad superficial (media) de 10 μm , lo que puede hacer necesarias operaciones de acabado para ciertas aplicaciones. Otro proceso similar, que también utiliza una alta concentración de energía, es la deposición directa de metal con haz de electrones. En este caso, el metal se aporta en forma de hilo, y las gotas formadas en el extremo del metal se desprenden y caen al baño de metal fundido.

Las técnicas que utilizan un haz de alta energía requieren el uso de equipos y materiales de elevado precio. La búsqueda de alternativas más económicas ha motivado la aplicación de las diferentes técnicas de soldadura por arco (MIG, *Metal Inert Gas*, TIG, *Tungsten Inert Gas*, y plasma) a la fabricación por capas. Esto se ha realizado combinando el cabezal y el equipo de soldadura con sistemas de control de trayectorias de control numérico (CN) para su aplicación a la fabricación de objetos por capas.

En la soldadura MIG el calor para producir el baño de fusión lo aporta un arco eléctrico que se establece entre un electrodo consumible y el sustrato, o la capa anterior cuando se aplica a la fabricación por capas. El calor del arco produce la formación de un baño fundido en el sustrato y la fusión del extremo del electrodo, cayendo el material hacia el baño fundido. Para mantener la distancia entre el electrodo y el sustrato, el hilo avanza compensando así la fusión de su extremo. Se utiliza un gas inerte para proteger el metal fundido de la oxidación, y facilitar la estabilidad del arco. Para aplicar el cabezal MIG a la fabricación por capas, se coloca en un sistema de control de trayectorias de control numérico. Se ha estudiado la generación de trayectorias más adecuada para la fabricación por capas con soldadura MIG. Además, se ha analizado la influencia de los parámetros del proceso en la calidad del producto fabricado.

En la soldadura TIG el calor para producir el baño de fusión lo aporta un arco eléctrico que se establece entre el sustrato (o la capa anterior de material) y un electrodo de tungsteno no consumible. Para proteger el baño fundido y favorecer la estabilidad del arco se utiliza una atmósfera protectora que fluye alrededor del electrodo. El metal utilizado para fabricar el objeto se aporta en forma de varilla, introduciendo su extremo en el baño fundido. Distintos investigadores han estudiado los parámetros del proceso

más adecuados para aleaciones de aluminio, níquel-cromo (Inconel 600) y titanio. La utilización de soldadura TIG aporta la ventaja, frente a la MIG, de que el control del aporte de calor y del aporte de material se realiza de forma independiente. Además, el metal se introduce directamente en el baño, por lo que no se produce salpicado y se reduce la porosidad.

La tecnología de arco-plasma también se ha aplicado a la fabricación por capas debido a que tiene una mayor densidad de energía, temperatura y estabilidad del arco. Esto permite una mayor velocidad del proceso y una zona térmicamente afectada inferior. Además, posibilita el trabajo con metales de mayor temperatura de fusión. Los sistemas que utilizan equipos de soldadura por plasma, al igual que los que hacen uso de equipos TIG, aportan el metal en forma de varilla. También se han aplicado equipos de recubrimiento por plasma en los que el metal se aporta en forma de polvo arrastrado por el gas a través de la boquilla. Se han desarrollado algunos sistemas mixtos plasma-láser para la fusión de metales refractarios.

Los sistemas de soldadura por arco también se han utilizado trabajando en modo de arco no transferido en el proceso denominado microcolada (*microcasting*). El calor del arco se utiliza para la fusión del extremo de un hilo de metal de aportación, obteniéndose gotas de entre 1 y 10 mm de diámetro. Como el arco no se establece con la pieza, se reduce significativamente la aportación de calor a ésta.

Las características geométricas y propiedades físicas de los objetos fabricados mediante deposición directa de metal, independientemente del proceso de formación de la gota, dependen del fenómeno complejo que se produce al impactar la gota de aleación fundida sobre el sustrato (o la capa anterior). Para que se produzca una unión metalúrgica del material de la gota con el sustrato es necesario que la gota aporte calor suficiente para producir una fusión localizada de éste. Así, el fenómeno incluye el impacto y expansión (salpicado) de la gota, el enfriamiento de la gota, la transmisión de calor al sustrato y su fusión, y la solidificación de la gota y el sustrato. Numerosos autores han estudiado este fenómeno tanto de forma teórica como experimental. Se han utilizado modelos cada vez más complejos gracias a las posibilidades de cálculo de los equipos informáticos. Los parámetros considerados incluyen el volumen y la temperatura de la gota, la velocidad de impacto sobre el sustrato, y la temperatura de éste, todos ellos relacionados entre sí de una manera compleja. El volumen de la gota afecta a la cantidad de calor aportada, y a la precisión del proceso. Las temperaturas de la gota y del sustrato afectan al fenómeno de mojado, y por tanto a la relación de aspecto (altura-diámetro) de la gota depositada, y a la fusión del sustrato. Por último, la velocidad de impacto está relacionada con la producción de salpicaduras, y con la relación de aspecto del depósito.

Algunas tecnologías de fabricación de Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS) también permiten la fabricación de componentes tridimensionales metálicos con un proceso de fabricación por capas similar a los procesos AM. Por ejemplo, el proceso MICA *freeform* (de Microfabrica, www.microfabrica.com) produce objetos metálicos por

5 capas en cuatro etapas: (i) litografía UV en la que se deposita una fina capa de polímero fotosensible, y se produce una máscara con la geometría adecuada para que la radiación ultravioleta sólo produzca el curado de la resina correspondiente a un molde para la sección del objeto; (ii) deposición de los iones del metal mediante un proceso electroquímico en la sección donde no se ha curado la resina; (iii) eliminación

10 del polímero y deposición de un material conductor (cobre) en su lugar, que actuará como soporte estructural y como conductor eléctrico para producir las siguientes capas, y que deberá eliminarse del objeto terminado; y (iv) mecanizado para ajustar el espesor de la capa depositada.

Descripción de la invención

La presente invención describe un dispositivo y procedimiento para la micro-fabricación de piezas o sistemas, o la realización de micro-recargues o micro-soldaduras mediante deposición controlada de micro-gotas de material. El dispositivo
5 está formado por dos boquillas, ambas con un orificio de descarga en un extremo, colocadas una en el interior de la otra de forma que los orificios de descarga de ambas queden enfrentados, separados y concéntricos. A través de la boquilla interior del dispositivo fluye el material que se va a depositar en fase líquida, y por el espacio
10 entre las dos boquillas fluye una corriente de gas. El material en fase líquida sale por el orificio de descarga de la boquilla interior, y la corriente de gas lo rodea al atravesar el orificio de la boquilla exterior. Utilizando una corriente de gas de velocidad suficientemente elevada el dispositivo produce, en el interior de la corriente de gas, un chorro estable de material en fase líquida, incluso cuando el caudal de metal es tan bajo que, de no existir la corriente, no podría producir chorro estable.

15 El dispositivo se puede utilizar para depositar gotas de materiales metálicos o cerámicos en fase líquida. El material puede introducirse en el dispositivo en fase líquida, procedente de un horno o depósito, o en fase sólida, caso en el que sería necesario producir el cambio de fase en el interior del dispositivo. El material en fase líquida sale a través de la boquilla debido a la aplicación de una presión en el interior
20 de la boquilla por algún procedimiento mecánico o electromecánico, como la acción de un gas presurizado aplicado en la superficie libre del material en fase líquida o el avance de un émbolo.

Para depositar el material, el dispositivo se coloca frente al punto del sustrato donde se desea depositar el material y a una distancia suficiente para que el chorro de baja
25 energía cinética del material en fase líquida pueda romperse en gotas antes de impactar contra el sustrato. El chorro rompe por acción de las fuerzas capilares y origina un tren continuo de gotas, altamente uniformes y de baja energía cinética. La temperatura del material en el dispositivo se ajusta para garantizar que el calor transportado por las gotas en el impacto es suficiente para compensar el calor cedido
30 al sustrato por conducción y producir la fusión de la capa superficial del sustrato, de forma que el material fundido de la gota y el sustrato se mezclen y se produzca una unión metalúrgica al solidificar conjuntamente. El movimiento relativo controlado entre el dispositivo y el sustrato permite la deposición sucesiva y ordenada de gotas de material, dando lugar a capas de la geometría, en primer lugar, y la geometría
35 tridimensional finalmente por fabricación sucesiva de capas. En el procedimiento de deposición de material puede depositarse a la vez una estructura de material, igual o

distinto al del objeto que se desea fabricar, que sirva de soporte a capas de material que pudieran quedar en voladizo durante el proceso de fabricación, y que se eliminarán al finalizar el proceso de fabricación.

Descripción del contenido de las figuras

Figura 1.- Esquema de la configuración SJ. Una tobera (A) con un orificio de salida de diámetro D_1 , está situada a una distancia H de una placa (B) con un orificio de diámetro D concéntrico con el de la tobera. Por la tobera fluye un caudal Q de material en fase líquida (1) que al salir forma un chorro estabilizado por la acción de una corriente externa de gas (2). El gas fluye debido a la aplicación de una diferencia de presión Δp y rodea al chorro al atravesar el orificio de la placa.

Figura 2.- Esquema del montaje experimental del dispositivo: (A) tobera, (B) placa con orificio, (C) celda de succión, (M) bomba de inyección, (N) jeringa con mercurio, (O) bomba de succión de aire. El metal líquido (1) que fluye por el interior de la tobera es mercurio y se utiliza una corriente de aire (2) para estabilizar el chorro.

Figura 3.- Montaje experimental utilizado para la observación del chorro: (A) tobera, (B) placa con orificio, (C) celda de succión, (D) sistema de orientación, (E) plataforma de traslación, (F) cámara CMOS de alta velocidad, (G) lentes ópticas, (H) plataforma de traslación triaxial, (I) fibra óptica (sistema de iluminación), (J) mesa óptica con sistema de asilamiento anti-vibración. El metal líquido (1) que fluye por el interior de la tobera es mercurio y se utiliza una corriente de aire (2) para estabilizar el chorro.

Figura 4.- Modos de emisión del chorro para la configuración SJ: (I) emisión de un chorro estable, (II) emisión intermitente de un chorro, (III) emisión de un chorro con perturbaciones, y (IV) funcionamiento por goteo (*dripping*).

Figura 5.- Imágenes correspondientes a tres instantes de la emisión del chorro (mercurio) variando las condiciones experimentales: a) Modo I, chorro estable ($Q=7\text{ml/h}$, $\Delta p=57\text{mbar}$), b) Modo II, chorro intermitente ($Q=2\text{ml/h}$, $\Delta p=402\text{ mbar}$), c) Modo III, chorro con perturbaciones ($Q=4.7\text{ ml/h}$, $\Delta p=65\text{ mbar}$), d) Modo IV, goteo ($Q=3\text{ ml/h}$, $\Delta p= 112\text{ mbar}$), y e) Resultados de las simulaciones numéricas del experimento mostrado en las micrografías a)-d), correspondientes a las condiciones $Q=4\text{ ml/h}$ y $\Delta p=411\text{ mbar}$, mostrando las líneas de corriente del gas y el mercurio, así como la formación de las gotas metálicas.

Figura 6.- Condiciones experimentales en las que se ha conseguido una emisión estable de un chorro, sin (triángulos) y con (círculos) corriente externa. La línea

discontinua corresponde a la predicción de Leib & Goldstein para la transición de inestabilidad convectiva/absoluta.

Figura 7.- Montaje experimental utilizado para la observación de las gotas: (A) tobera,
 5 (B) placa con orificio de salida, (C) cámara presurizada, (D) sistema de orientación, (F)
 cámara CMOS de ultra-alta velocidad, (G) lentes ópticas, (H) plataforma de traslación
 triaxial, (I) fibra óptica (sistema de iluminación), (J) mesa óptica con sistema de
 asilamiento anti-vibración y (P) recipiente para la recogida del metal. El metal líquido
 (1) que fluye por el interior de la tobera es mercurio y se utiliza una corriente de aire (2)
 10 para estabilizar el chorro.

Figura 8.- Distribución de probabilidad $P(D_d)$ del diámetro de las gotas D_d producidas
 por el dispositivo SJ con un caudal $Q=2.8\text{ml/h}$ sin corriente externa $\Delta p=0\text{mbar}$ (barras
 grises) y con la corriente externa (barras blancas) causada por una presión
 15 $\Delta p=632\text{mbar}$. La línea discontinua corresponde al diámetro de las gotas que, según la
 predicción de Rayleigh, se forman al romperse un chorro de $20\mu\text{m}$.

Figura 9.- Imágenes de las gotas correspondientes a tres instantes variando las
 condiciones experimentales: a) gotas producidas con emisión del metal por goteo
 20 ($Q=2.8\text{ ml/h}$, $\Delta p=0\text{mbar}$), y b) gotas producidas por rotura de un chorro estable ($Q=2.8$
 ml/h , $\Delta p=632\text{mbar}$). Debido al uso de iluminación a contraluz en el experimento las
 gotas aparecen casi de color negro sobre un fondo de color gris. Se ha aumentado el
 contraste de la imagen para mejorar la visualización de las gotas. Se aprecia cierta
 inclinación del eje de la cámara respecto a la dirección del flujo.

Realización preferente

Esta invención describe un nuevo procedimiento y dispositivo para la producción controlada de gotas altamente uniformes de aleaciones metálicas u otros materiales de alta resistencia, elevadas características mecánicas (e. g. alto módulo de Young) y/o elevado punto de fusión para su uso en procesos de deposición de material, como los procesos aditivos de microfabricación de piezas o sistemas, o la realización de microsoldaduras o recargues.

El dispositivo, basado en una nueva configuración que denominamos *surf-jetting* (SJ), produce gotas de metal fundido de tamaño uniforme que se mueven a baja velocidad que se originan por la rotura de un chorro de baja energía cinética estabilizado mediante una corriente gaseosa que fluye alrededor del mismo y en la misma dirección. El dispositivo se puede alimentar con metal en estado líquido. La fusión del metal puede realizarse utilizando equipos comunes. Por ejemplo, la aleación puede fundirse en el interior de un horno o crisol calentado mediante resistencias eléctricas externas o mediante bobinas de inducción. En ese caso, el metal fundido se alimenta al dispositivo de producción de gotas a través de un orificio en la parte inferior del horno. La inyección del metal al dispositivo y el control del caudal se lograrían gracias a la acción de un sistema mecánico de inyección (émbolo) o, como es frecuente, utilizando un gas inerte presurizado para empujar el material desde el interior del horno. Otra posibilidad para alimentar el dispositivo es partir de la aleación sólida en forma de hilo y fundirlo progresivamente. En ese caso, se utilizaría un sistema automático de alimentación de hilo para controlar el avance del material, y una bobina de inducción para producir la fusión del extremo.

La configuración SJ (Figura 1) que se utiliza en el dispositivo está formada por una tobera convergente (A) con un orificio de diámetro D_1 , frente a la que se sitúa una placa (B) con un orificio de diámetro D concéntrico con el de la tobera y separada de ésta una distancia H . Por la tobera fluye un caudal Q de material fundido (1) que al salir forma un chorro estable debido a la acción de una corriente externa de gas (2). Esta corriente fluye debido a la aplicación de una diferencia de presión Δp con el exterior de la placa, y rodea al chorro al atravesar el orificio de la placa. Cuando la corriente de gas es suficientemente rápida para estabilizar el chorro, el diámetro de éste es muy similar al diámetro de la tobera, y es independiente de la magnitud de la corriente exterior, lo cual ofrece un grado de libertad muy ventajoso. Por lo tanto, la velocidad del chorro dependerá del caudal Q de material (metal) líquido y del diámetro de salida de la tobera. El diámetro y la velocidad del chorro al salir de la tobera se mantienen aproximadamente invariables aguas abajo del orificio de la placa y hasta el

punto de rotura del mismo (Figura 1). La rotura se produce debido a la inestabilidad de Plateau-Rayleigh y origina gotas de tamaño uniforme y diámetro del orden del diámetro del chorro y de la tobera.

La presencia de la corriente de gas desempeña un papel fundamental en la estabilización del chorro. De hecho, permite la existencia de un chorro continuo con velocidades tan bajas que sería imposible mantenerlo en ausencia de esta corriente. Si no existiera esta corriente, las perturbaciones podrían viajar aguas arriba a través de la superficie del chorro que se mueve a baja velocidad y provocar su rotura prematura (el chorro no sería estable). Sin embargo, cuando está presente una corriente gaseosa lo suficientemente rápida, ésta arrastra y acelera la interfase, haciendo que la superficie del chorro se mueva a una velocidad superior a la media en dirección axial. De esta forma, se impide la propagación de las perturbaciones en dirección opuesta al avance del líquido, manteniéndolas lejos del punto de emisión e impidiendo la rotura prematura del chorro. Finalmente, el chorro se rompe aguas abajo debido al crecimiento convectivo de perturbaciones axisimétricas en la interfase (inestabilidad de Plateau-Rayleigh).

El control del tamaño de las gotas, su velocidad y su temperatura permiten el control y reproducibilidad de la deposición. Así, se puede controlar con precisión el espesor y la geometría de la capa de material que se está depositando. El dispositivo que se presenta permite un control independiente de: (i) el tamaño de la gota, mediante la elección de una tobera con un orificio de diámetro adecuado; (ii) de su velocidad, ajustando el caudal Q ; y (iii) de la velocidad de la corriente de gas, ajustando la caída de presión a ambos lados de la placa. El control independiente de estos factores es importante para optimizar el proceso de deposición y solidificación en el sustrato. En primer lugar, los fenómenos mecánicos de salpicado (*splash*) que son indeseables en la deposición, aumentan con la velocidad de impacto, o con el número de Weber $We = \rho v_j^2 R_j / \sigma$, donde R_j es el radio del chorro que origina la gota, $v_j = Q / (\pi R_j^2)$ su velocidad, σ es la tensión superficial y ρ es la densidad del líquido. Idealmente, el salpicado puede eliminarse eligiendo una velocidad de deposición suficientemente baja, tal que la energía cinética de la gota por unidad de volumen $\rho v_j^2 / 2$ sea comparable a la sobrepresión capilar en su interior $4\sigma / D_d$, donde D_d es el diámetro de la gota. Además, la temperatura y velocidad de la corriente de gas se regulan en combinación con el diámetro de la gota de forma que su temperatura permita una rápida solidificación tras su impacto con el sustrato y parcial fusión de la zona cubierta por la huella del impacto.

Los procesos actuales de deposición de material basados en rotura de chorros se basan en las tecnologías de impresión con chorro de tinta (*ink-jet technology*), y

trabajan emitiendo chorros estables a través de un orificio en la parte inferior del horno o crisol. Utilizan una perturbación mecánica para producir la rotura del chorro y aplican campos eléctricos para evitar fenómenos de coalescencia entre las gotas. Además, cuando trabajan con materiales metálicos, la formación y rotura del chorro se realiza

5 en atmósfera controlada para evitar la oxidación de la interfase del chorro y los fenómenos indeseables asociados. Para generar un chorro estable, éste debe tener una energía cinética suficientemente alta, por lo que al romperse produce gotas de material que se mueven con velocidad elevada. Aunque esto permite un elevado ratio de deposición de material, empeora el control de la deposición, debido al fenómeno de

10 salpicado que se produce cuando la gota impacta contra el sustrato a alta velocidad. El dispositivo que se describe en esta invención utiliza una corriente gaseosa impuesta que fluye alrededor del chorro para conseguir estabilizar chorros de menor energía cinética que, de no existir la corriente externa, no serían estables. La rotura, que no se provoca mediante una perturbación mecánica impuesta, sino que se produce debido a

15 una inestabilidad capilar de la misma naturaleza que la de Rayleigh, origina gotas altamente uniformes y con baja energía cinética, lo que mejora la deposición de material al reducir los efectos negativos del fenómeno de salpicado. La presencia de la corriente gaseosa exterior, además de proteger las gotas evitando la oxidación de la interfase, controla su dinámica evitando la coalescencia, por lo que se elimina la

20 necesidad del uso de campos eléctricos con este fin. De esta forma, el dispositivo presentado en esta invención produce gotas de tamaño uniforme que se mueven a la misma velocidad (inferior a la de dispositivos actuales), lo que permite un mejor control de la deposición de material y, por lo tanto, una mayor precisión en el proceso de fabricación.

25 También existen diferencias significativas entre la configuración SJ utilizada en el dispositivo que se presenta en esta invención y la configuración de flujo enfocado (FF *Flow Focusing*). En la configuración FF, el chorro se emite desde un extremo de un menisco capilar cuasi-estático que se forma en el extremo del tubo de alimentación. La emisión del chorro se debe a la acción de una corriente de gas coaxial que lo arrastra

30 y rodea a su paso a través del orificio de la placa situada frente al tubo de alimentación. La tobera sólida en la configuración SJ realiza el mismo papel físico que el menisco capilar en la configuración FF, con la ventaja de que la superficie sólida de la tobera es insensible a cualquier perturbación. En SJ el chorro se emite a una velocidad que depende del caudal Q de material (metal) líquido y del diámetro de

35 salida de la tobera, mientras que en FF la velocidad del chorro sólo es función de la velocidad de la corriente de gas a través del orificio de la placa. En FF, la velocidad de la corriente externa también afecta al diámetro del chorro emitido. Por lo tanto, el

dispositivo basado en la configuración SJ que se presenta en esta invención permite un control independiente de los parámetros que controlan la deposición de material, que no es posible obtener con la configuración FF.

Para probar el funcionamiento del dispositivo descrito en esta invención (i.e. control
5 independiente de la velocidad y tamaño de las gotas, así como la corriente de gas), se han construido dos de los posibles montajes experimentales del dispositivo utilizando la configuración SJ. Estos montajes se han incorporado en montajes experimentales más complejos que permiten observar el chorro emitido por el dispositivo (ejemplo 1), o las gotas producidas por la rotura del chorro (ejemplo 2). En ambos casos, el
10 dispositivo se alimenta con Mercurio, un metal líquido a temperatura ambiente, y se utiliza aire como gas enfocante. Según las especificaciones del proveedor, las propiedades del Mercurio a la temperatura ambiente de trabajo (20 °C) son: densidad $\rho = 13.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, viscosidad $\mu = 1.55 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$, y tensión superficial $\sigma = 0.487 \text{ N/m}$.

15 En el ejemplo 1 se demuestra que el dispositivo es capaz de producir chorros estables de baja energía cinética, con un número de Weber inferior a la unidad, gracias a la acción de la corriente enfocante. El dispositivo, que en este caso incorpora una tobera con un orificio de $40 \mu\text{m}$ de diámetro, permite producir un chorro de diámetro ligeramente inferior, y reducir significativamente su energía cinética, sin que se vuelva
20 inestable aumentando la velocidad del gas enfocante. En el ejemplo 2 se demuestra que el dispositivo permite una producción de gotas altamente uniforme, de menor tamaño y energía cinética. El dispositivo, que en este caso incorpora una tobera con un orificio de $22,5 \mu\text{m}$, produce una colección de gotas de tamaño próximo al de la predicción de Rayleigh, gracias a la presencia del gas enfocante que estabiliza el
25 chorro y evita la coalescencia.

Ejemplo 1. Emisión del chorro con el dispositivo SJ

Se han realizado experimentos con un dispositivo basado en la configuración SJ para demostrar que la presencia de la corriente exterior mejora la estabilidad del chorro emitido y permite producir chorros estables de menor energía cinética. En las Figuras
30 2 y 3 se muestran esquemas de las distintas partes del montaje experimental. El dispositivo utilizado está formado por una tobera (A) con un orificio de salida de diámetro $D_1 = 40 \mu\text{m}$ situada a una distancia $H = 100 \mu\text{m}$ de una placa (B) con un orificio de diámetro $D = 200 \mu\text{m}$ concéntrico con el de la tobera. Para inyectar el metal líquido (1), mercurio, al dispositivo, la tobera se conecta a una jeringa (*Hamilton*) (N)
35 montada en una bomba de inyección (*Harvard Apparatus PHD 4400 Hpsi programmable*) (M), que permite ajustar el caudal Q y proporciona un caudal constante.

La placa tapa la parte superior de la celda cúbica (C), en la que se aplica una presión manométrica negativa utilizando una bomba de succión (*Busch SV 1005 D*) (O), que produce la diferencia de presión Δp responsable del flujo de gas enfocante (2), aire en este caso. La celda y la tobera están montados, cada uno, en un sistema de
5 orientación (goniómetro) de alta precisión (D) y en una plataforma de traslación triaxial (E) que permiten ajustar su orientación y la posición relativa entre ambos utilizando tornillos micrométricos.

En los experimentos realizados se ha observado la emisión del chorro utilizando una cámara CMOS de alta velocidad (*Photonfocus MV-D1024-160*) (F) equipada con una
10 serie de lentes ópticas (G): un objetivo-zoom *Mitutoyo* con magnificación 10× y un conjunto de lentes *Optem* compuesto por 2× *TV Tube* más zoom *70XL* con magnificación entre 0.75× y 5.25×. La cámara también está montada sobre una plataforma de traslación triaxial (H) que permite ajustar el encuadre y el enfoque. Las imágenes se obtienen iluminando el chorro a contraluz utilizando luz blanca fría
15 proporcionada por una fibra óptica conectada a una fuente de luz (I). Para comprobar la axisimetría del chorro y la correcta alineación de los elementos que componen el dispositivo SJ, éste se observa también con una cámara CCD auxiliar equipada con lentes ópticas con un eje óptico perpendicular al de la cámara CMOS.

Para aislar la zona expuesta a posibles emisiones asociadas al metal líquido, todos los
20 elementos están encerrados en el interior de una urna de PMMA (polimetilmetacrilato) incoloro, con PVC (policloruro de vinilo) flexible en las entradas de las cámaras, fibras ópticas de iluminación y del sistema de sujeción del capilar. Todos los componentes del montaje experimental, salvo la bomba de succión, se fijan sobre una mesa óptica (J) provista de un sistema neumático para reducir y amortiguar
25 las vibraciones procedentes del edificio.

En cada experimento, primero se ajusta la diferencia de presión Δp y la distancia tobera-orificio H , y después se observa la emisión del chorro para distintos valores del caudal Q , comenzando por el máximo caudal que permite el montaje experimental (alrededor de 30ml/h), y reduciéndolo en escalones de 0.1 ml/h para observaciones
30 posteriores.

La Figura 4 presenta los Modos de emisión del chorro observados en función de los valores de la diferencia de presión Δp y el caudal Q , y la Figura 5 muestra imágenes de la emisión del chorro en tres instantes de experimentos en los que se producen los distintos modos. El Modo I corresponde a una emisión estable del chorro, en la que no
35 se observan perturbaciones de ningún tipo en el chorro (Figura 5.a). En el Modo II, se producen interrupciones periódicas en la emisión del chorro cada pocos segundos (Figura 5.b). Tras una interrupción breve, el chorro se vuelve a formar. La frecuencia

de este fenómeno aumenta al reducir el caudal (fijada la diferencia de presión). En el Modo III se observan oscilaciones evidentes y permanentes de la interfase del chorro, pero no se producen interrupciones en la emisión porque las oscilaciones no estrangulan lo suficiente la interfase (Figura 5.c). Por último, el Modo IV corresponde al régimen clásico de goteo o *dripping* (Figura 5.d). Las simulaciones numéricas pueden proporcionar más información de la que se obtiene en estos experimentos. La Figura 5.e muestra el resultado de una simulación numérica del experimento (manteniendo la geometría y los materiales utilizados en el mismo) realizada con el programa comercial Fluent v. 6.3 para el caso de un chorro de mercurio estabilizado gracias a la presencia de la corriente gaseosa ($Q=4\text{ml/h}$, $\Delta p=411\text{ mbar}$). La imagen muestra las líneas de corriente tanto en el mercurio como en el gas enfocante, y la rotura del chorro en gotas debido a la acción de la tensión superficial. El diámetro de las gotas que se producen es aproximadamente dos veces el del chorro.

Los resultados demuestran que el flujo externo de gas produce una mejora importante en la estabilidad de la emisión del chorro. El caso estándar de la emisión de un chorro a través de un orificio sin flujo externo corresponde al caso $\Delta p=0$, y requiere para producir un chorro estable un caudal superior a 6 ml/h . Este valor es superior al doble del caudal necesario para emitir un chorro estable con el flujo exterior de gas que produce una diferencia de presión $\Delta p=250\text{ mbar}$. Por lo tanto, se ha demostrado que el dispositivo que se presenta en esta invención, trabajando con una corriente de gas adecuada, permite producir chorros estables de menor energía cinética (menor caudal) que los dispositivos existentes que funcionan por rotura de chorros (modo *jetting*).

Todos los chorros estables observados en los experimentos eran prácticamente cilíndricos a partir de la emisión, y tenían un diámetro de unas $33\mu\text{m}$, ligeramente inferior al radio del cuello de la tobera. Por lo tanto, se comprueba que la velocidad de la corriente externa no modifica el diámetro del chorro, y que éste depende fundamentalmente del diámetro del orificio de la tobera. Esto puede ser una ventaja en los casos en los que se precise un método robusto y predecible de producción de gotas, ya que puede producirse un chorro de diámetro controlado seleccionando una tobera con la geometría adecuada.

La Figura 6 muestra las condiciones experimentales en las que se han producido chorros estables con el dispositivo en el plano (Re , We), donde el número de Reynolds $Re=\rho v_j R_j/\mu$ y el número de Weber $We=\rho v_j^2 R_j/\sigma$, se definen en función del radio R_j y la velocidad $v_j=Q/(\pi R_j^2)$ del chorro. Los triángulos representan las condiciones correspondientes a chorros sin corriente externa ($\Delta p=0$) y los círculos corresponden a chorros estabilizados con corriente externa. El umbral $We=1$ constituye el límite de estabilidad para las técnicas existentes, como la técnica de flujo enfocado (FF), ya que

para líquidos con viscosidad tan baja, la mayor parte de la disipación de energía se produce debido a la tensión superficial. En los experimentos, en ausencia de corriente externa, sólo se ha conseguido producir chorros estables para valores del número de Weber bastante por encima de la unidad. El dispositivo que se presenta permite
 5 superar ese umbral de estabilidad gracias al efecto combinado de la forma convergente de la tobera (que se puede ver como una protección frente al medio exterior que previene la inestabilidad del chorro por recirculación del líquido, ventaja que desaparece con el menisco existente en FF) y la corriente externa. Así, en los experimentos se han conseguido chorros estables con valores del número de Weber
 10 de hasta 0.2. El papel de la corriente externa es fundamental y se producen chorros con una inercia (energía cinética) inferior a la necesaria para superar la tensión interfacial, que es el límite de los dispositivos basados en las tecnologías de impresión con chorro de tinta (*ink jet*).

Ejemplo 2. Producción de gotas con el dispositivo SJ

15 Se han realizado experimentos con un dispositivo basado en la configuración SJ distinto al utilizado en el ejemplo anterior para observar cómo la presencia de la corriente exterior evita la coalescencia de las gotas aguas abajo y estudiar el tamaño de las gotas producidas. El montaje experimental utilizado en los experimentos se muestra en la Figura 7. El dispositivo consta de una cámara presurizada (C), cerrada
 20 en su parte inferior por una placa (B) con un orificio de diámetro $D = 500 \mu\text{m}$. En el interior de la cámara se coloca una tobera (A), con un orificio de salida de diámetro $D_1 = 22.5 \mu\text{m}$, enfrentado y concéntrico con el de la placa. La cámara está conectada a un circuito neumático, por lo que se produce una corriente de aire (2) en el interior de la cámara que rodea al metal líquido, mercurio, (1) que sale de la tobera, logrando que
 25 se forme un chorro estable que rompe en gotas aguas abajo. Se utiliza un sistema de orientación (D) para colocar verticalmente el dispositivo de SJ. Frente al orificio de la cámara se coloca un recipiente (P) para recoger las gotas de metal líquido.

El dispositivo se coloca en un montaje experimental similar al descrito en el experimento anterior. En este caso se utiliza una cámara CMOS de ultra-alta velocidad
 30 (*Photron, FASTCAM SA5*) (F) equipada con un conjunto de lentes ópticas (G): un objetivo-zoom *OPTEM 10x HR* y un zoom *NAVITAR 12x*. Se toman imágenes de las gotas producidas (y que viajan aguas abajo) en una zona próxima a la salida del dispositivo de SJ (es decir, al orificio de salida). Se han realizado experimentos para un mismo caudal de metal líquido, sin corriente externa ($\Delta p = 0 \text{ mbar}$) con el dispositivo
 35 emitiendo el metal por goteo (Modo IV descrito en el experimento anterior), y con una Δp que produzca una corriente externa suficiente para que se emita un chorro estable,

comprobando de nuevo el efecto estabilizador de la corriente externa enfocante. En cada experimento, se ajusta primero la diferencia de presión Δp , y después el caudal Q .

5 La Figura 8 muestra la distribución de probabilidad $P(D_d)$ para el diámetro D_d de las gotas observadas aguas abajo para un caudal $Q=2.8\text{ml/h}$, sin corriente externa $\Delta p=0\text{mbar}$ (barras grises) y con la corriente externa producida por una presión $\Delta p=632\text{mbar}$ (barras blancas). Con la corriente externa, el dispositivo emitía un chorro de unas $20\mu\text{m}$ de diámetro. La línea discontinua representa el diámetro de las gotas que se producirían al romper un chorro de ese diámetro según la predicción de
10 Rayleigh ($D_d=1.89D_j$). En el experimento sin corriente externa (Figura 9.a), se produce una colección de gotas de diámetro variable y superior al que proporciona la predicción de Rayleigh. La variación de diámetro puede atribuirse en parte al fenómeno de coalescencia. En el experimento con corriente externa (Figura 9.b) se consigue un chorro estable que rompe aguas abajo del orificio debido a la inestabilidad
15 de Rayleigh en una colección de gotas de diámetro uniforme y aproximadamente igual al doble del diámetro del chorro.

Reivindicaciones

1. Dispositivo para microfabricación y micro-soldadura mediante deposición de material en fase líquida, que comprende dos boquillas, ambas con un orificio de descarga en un extremo, colocadas una en el interior de la otra de forma que los orificios de descarga de ambas queden enfrentados, separados y concéntricos, y alimentadas cada una de ellas por el extremo opuesto al del orificio de descarga.
5
2. Procedimiento para microfabricación y micro-soldadura mediante deposición de material en fase líquida, según el dispositivo descrito en el reivindicación 1, caracterizado porque comprende los siguientes pasos:
10
 - el material que se deposita se introduce en la boquilla interior en fase líquida, desde un horno o depósito, o en fase sólida, produciéndose en este caso el cambio a fase líquida en el interior de la boquilla;
 - el material que se deposita es forzado a salir en fase líquida a través del orificio de descarga de la boquilla interior debido a la aplicación de una presión en el interior de la boquilla por cualquier procedimiento mecánico o electromecánico, como la acción de un gas presurizado aplicado en la superficie libre del material en fase líquida o el avance de un émbolo;
 - se introduce una sustancia gaseosa en la boquilla exterior, que fluye por el espacio entre las dos boquillas del dispositivo a una velocidad suficiente para que el material en fase líquida que sale por el orificio de la boquilla interior forme un chorro estable;
 - el chorro de material en fase líquida sale por el orificio de la boquilla exterior a velocidad constante y rodeado de una corriente del gas;
 - el chorro rompe debido a fuerzas de tensión superficial o fuerzas capilares originando un tren o corriente continua de gotas;
 - el dispositivo es posicionado frente al punto del sustrato donde se desea depositar el material, a una distancia de éste que permite la rotura del chorro en forma de gotas antes de que el material líquido impacte contra el sustrato;
 - la temperatura del material en fase líquida que sale a través del orificio de descarga de la boquilla interior es lo suficientemente elevada para garantizar que el calor transportado por las gotas al impactar el sustrato es suficiente, no sólo para no solidificar instantáneamente (es decir para compensar la cantidad
20
25
30

de calor cedida al sustrato por conducción), sino para producir la fusión de parte del sustrato de forma que se produzca una unión metalúrgica y solidifiquen juntos (es decir, que se produzca soldadura).

- 5 • se produce un desplazamiento relativo entre el dispositivo y el sustrato para que la acumulación de material por deposición sucesiva y ordenada en capas conforme la geometría de la pieza que se desea fabricar, el recargue o el cordón de soldadura.

3. Procedimiento para microfabricación y micro-soldadura mediante deposición de material en fase líquida, según reivindicación 2, caracterizado por que el material
10 que se deposita en fase líquida es un material metálico o cerámico.

4. Procedimiento para microfabricación y micro-soldadura mediante deposición de material en fase líquida, según reivindicación 2, caracterizado por que además de depositar el material correspondiente a la pieza que se fabrica, se puede depositar otro material, igual o distinto al de la pieza y utilizando el mismo procedimiento
15 que para el material de la pieza, para formar estructuras o elementos de soporte que se eliminarán en un paso posterior, una vez el proceso de fabricación es completado y el material que constituye la pieza ha solidificado.

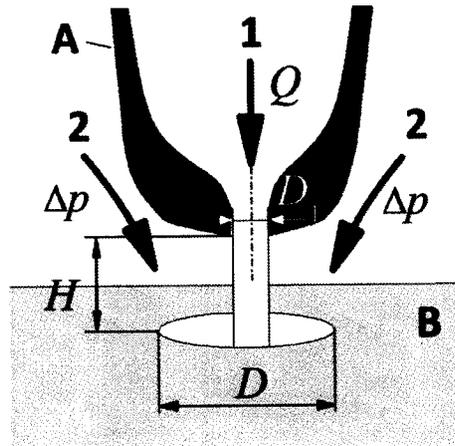


Figura 1

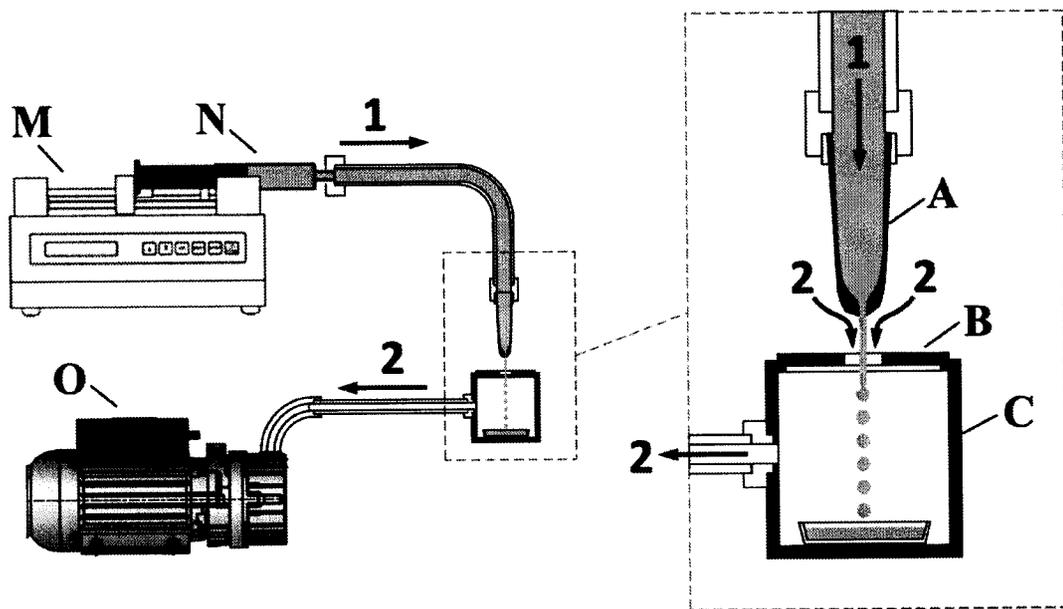


Figura 2

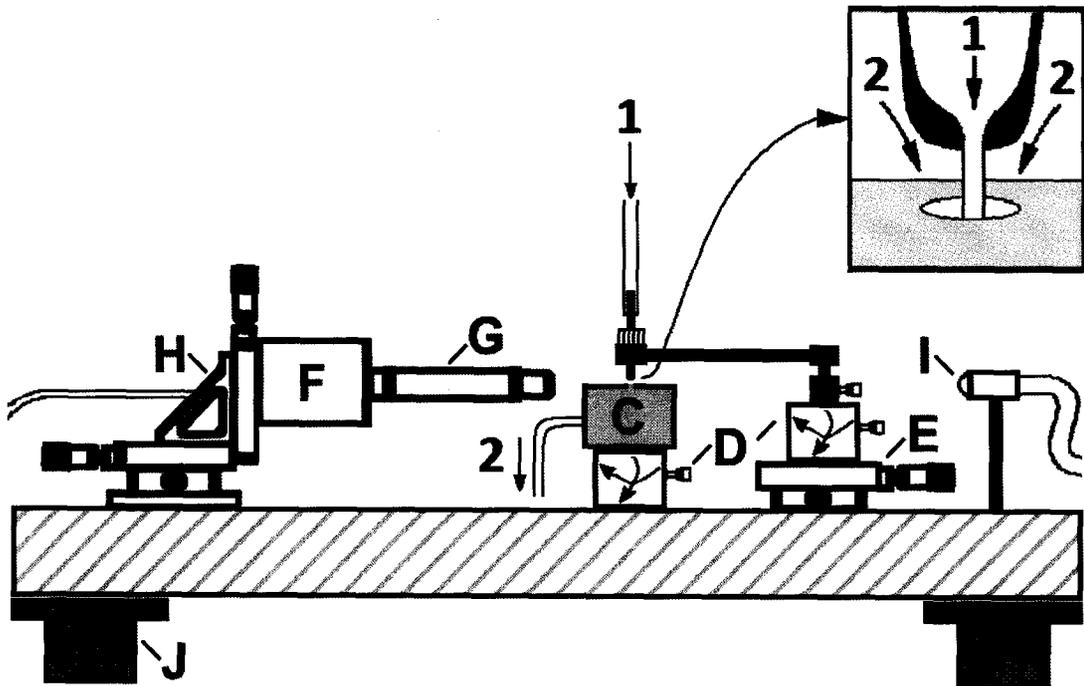


Figura 3

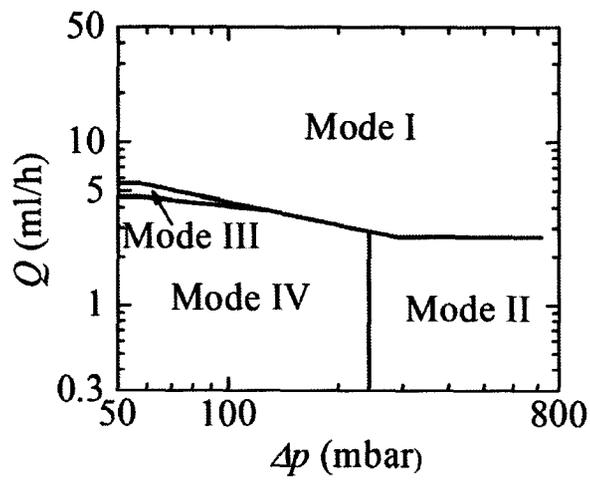
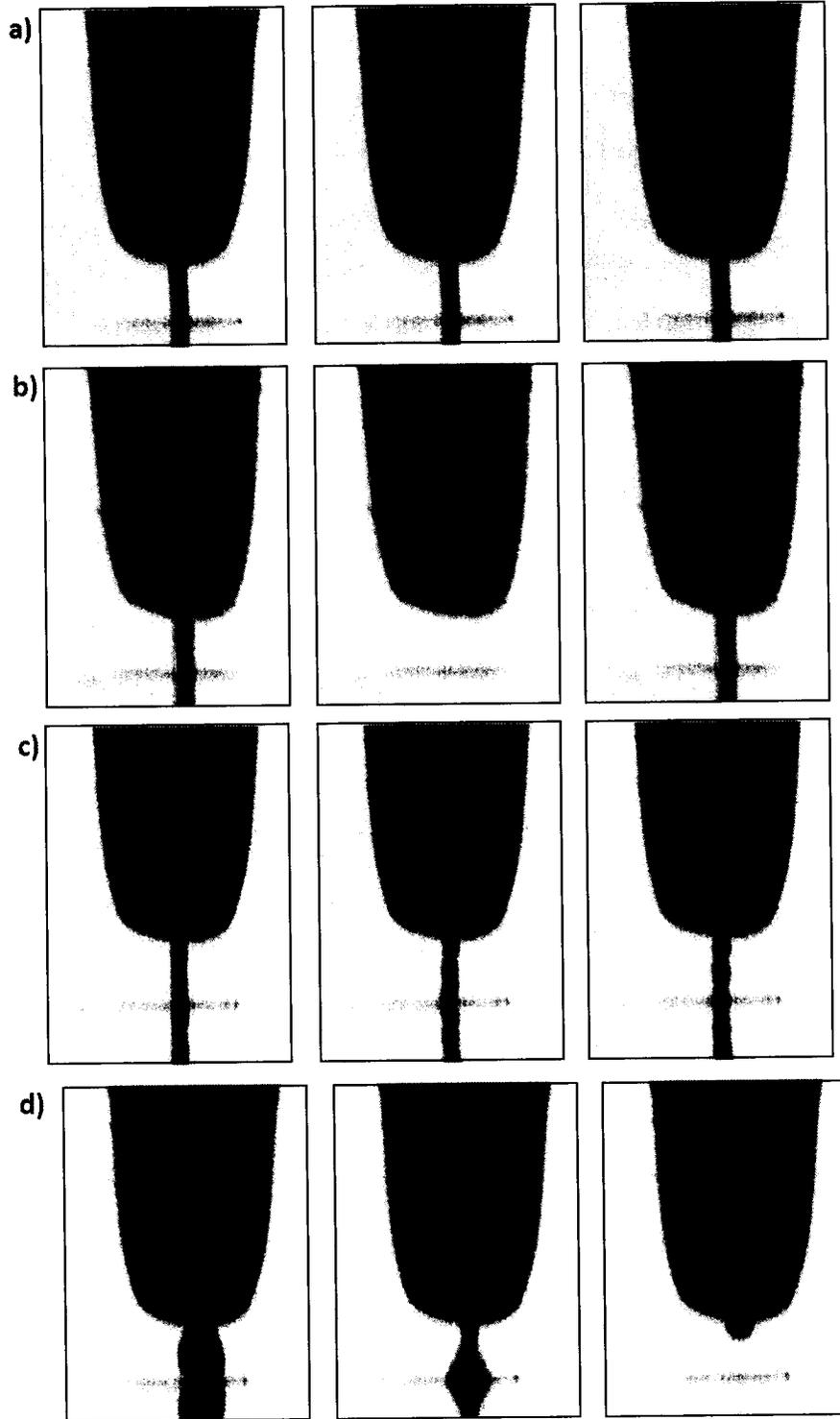


Figura 4



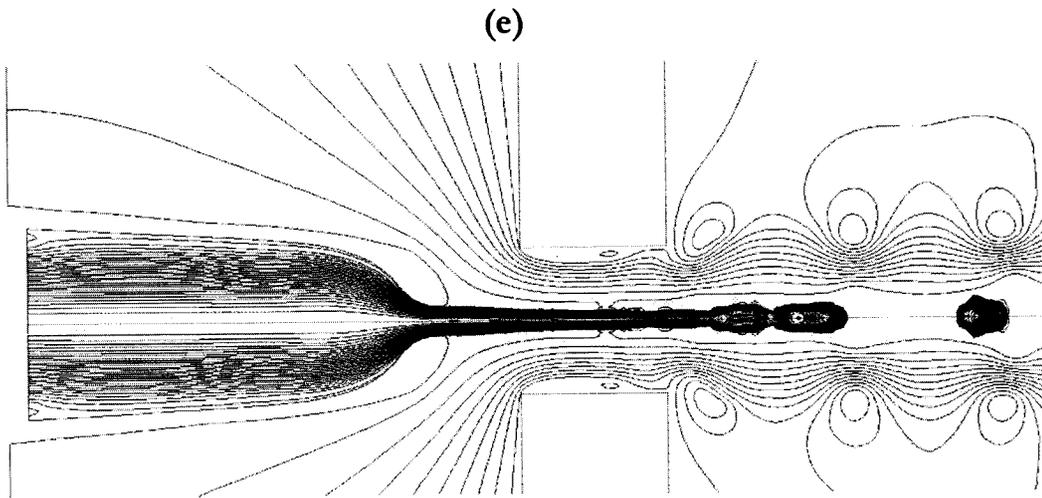


Figura 5

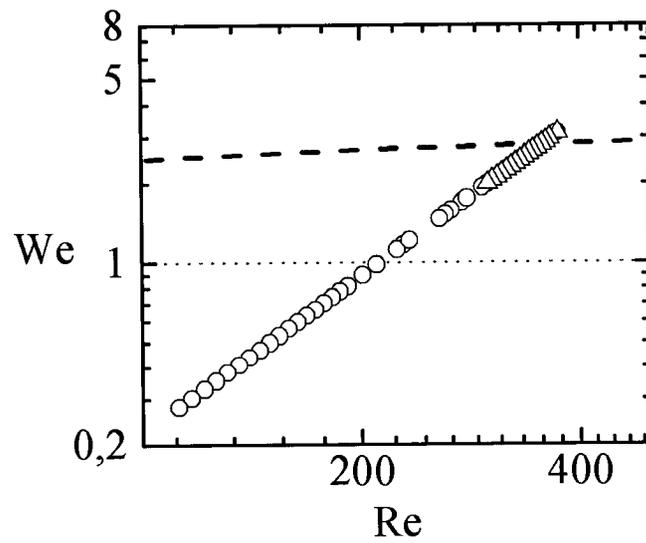


Figura 6

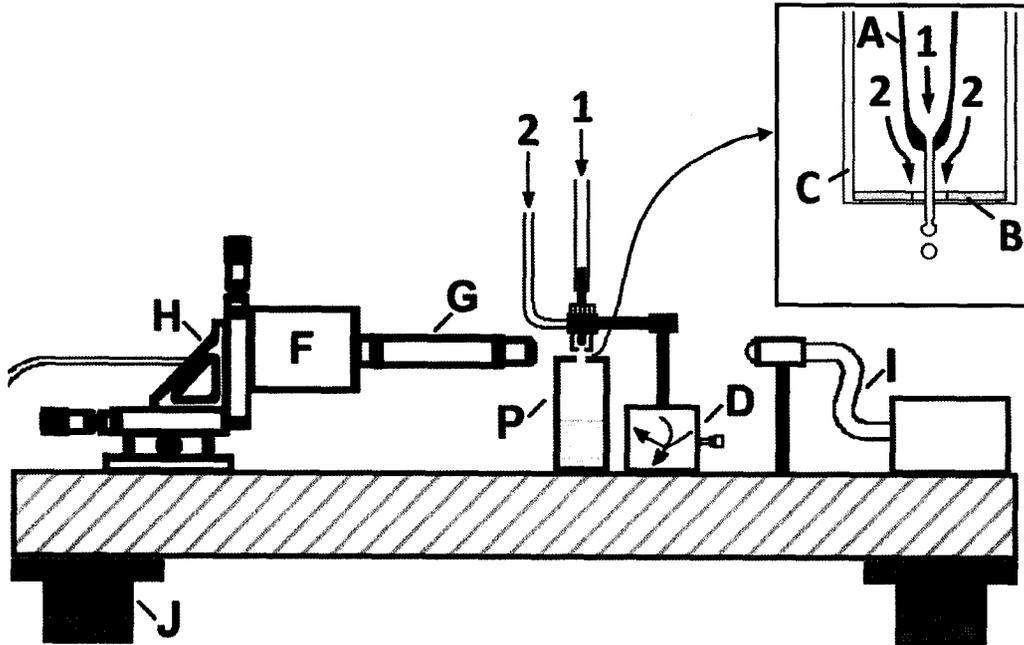


Figura 7

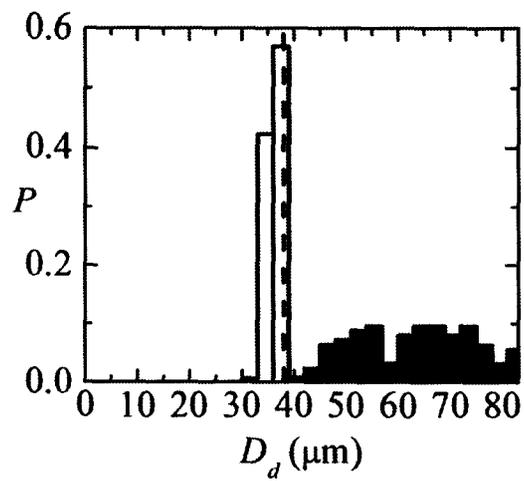


Figura 8

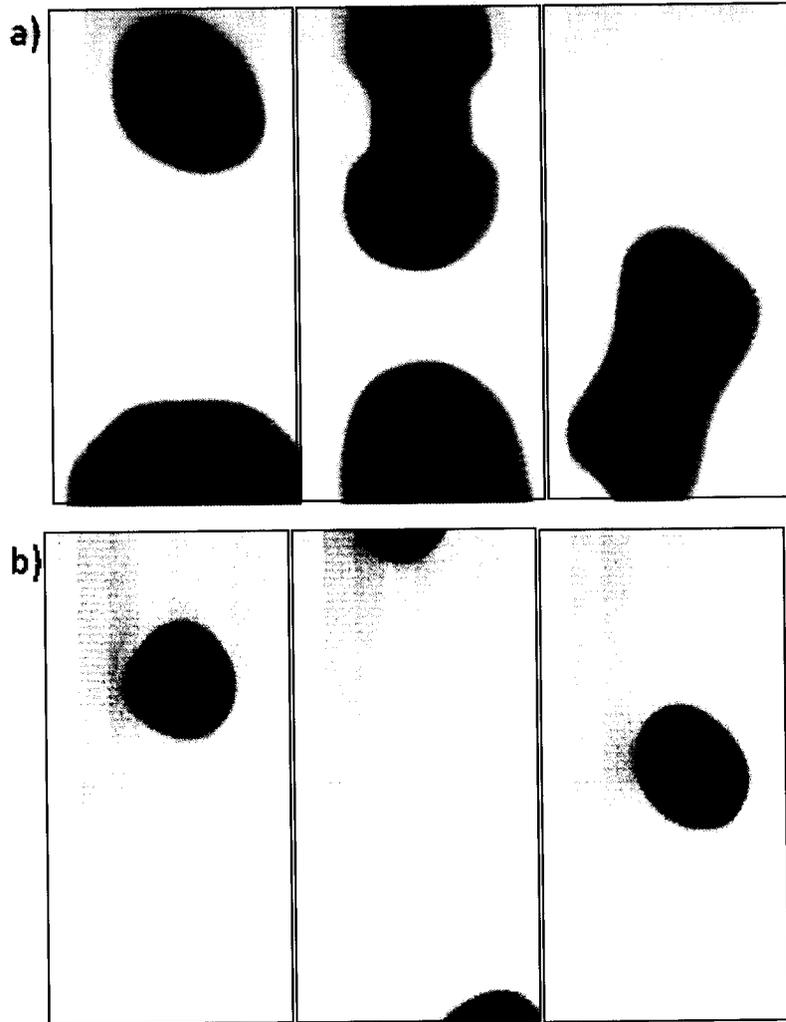


Figura 9